

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет



О. В. Ратушний

**VI ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УКЛАД:
ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СИСТЕМ,
ЯКІ ПЕРЕДАЮТЬ ЕНЕРГІЮ РІДИНИ**

Монографія

Рекомендовано вченою радою Сумського державного університету



Суми
Сумський державний університет
2020

УДК 621.22(477)(02.064)

P25

Рецензенти:

В. І. Склабінський – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв Сумського державного університету;

А. І. Панченко – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри механотронних систем та транспортних технологій Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного

*Рекомендовано до видання
вченою радою Сумського державного університету
(протокол № 4 від 14 листопада 2019 року)*

Ратушний О. В.

P25 VI технологічний уклад: перспективи розвитку систем, які передають енергію рідині : монографія / О. В. Ратушний. – Суми : Сумський державний університет, 2020. – 212 с.

ISBN 978-966-657-812-2

У монографії на основі розгляду історії насособудування і законів розвитку технічних систем досліджуються можливості розвитку насосів як систем в епоху нового шостого технологічного укладу. Особлива увага приділяється перспективам і можливостям передавання енергії рідині на мікрорівні та створенню контрроторних насосних систем.

Видання може бути корисним для науковців, аспірантів, студентів і всіх, хто цікавиться перспективами насособудівної галузі у XXI столітті та новими можливостями передавання енергії рідині.

УДК 621.22(477)(02.064)

ISBN 978-966-657-812-2

© Ратушний О. В., 2020

© Сумський державний університет, 2020

ЗМІСТ

С.

ВСТУП	5
Розділ I ІСТОРІЯ ВИНИКНЕННЯ ТА РОЗВИТКУ НАСОСОБУДУВАННЯ	14
1.1 Насособудування від давніших часів до початку XX сторіччя	14
1.2 Насособудування в СРСР і Україні	21
1.3 Насособудування на Сумщині.....	25
1.4 Сучасний насосний парк. Класифікація насосів.....	42
1.5 Резюме розділу I.....	56
Розділ II ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ РОЗВИТКУ СКЛАДНИХ СИСТЕМ	57
2.1 Про категорії розвитку.....	57
2.2 Ентропія і розвиток	58
2.3 Ентропія й інформація	67
2.4 Резюме розділу II.....	74
Розділ III ЗАКОНОМІРНОСТІ РОЗВИТКУ НАСОСНИХ СИСТЕМ	75
3.1 Теорія розвитку технічних систем	75
3.1.1 Загальні міркування	75
3.1.2 Функціональність	76
3.1.3 Структурність	77
3.1.4 Організація.....	79
3.1.5 Системний ефект (якість)	79
3.2 Закони розвитку технічних систем	80
3.2.1 Загальні положення	80
3.2.2 Закон повноти частин системи	82
3.2.3 Закон енергетичної провідності системи	83
3.2.3.1 Можливості прямих перетворень видів енергії	88
3.2.4 Закон узгодження ритму частин системи	93
3.2.5 Закон динамізації технічної системи	94
3.2.6 Закон підвищення ступеня репольності системи	96
3.2.7 Закон нерівномірності розвитку системи	97
3.2.8 Закон переходу з макро- на мікрорівень	99
3.2.8.1 Ефекти турбулентності, вихори та нанороботи	101
3.2.8.2 Хімотроніка й осмос	106
3.2.8.3 МГД-насос і ефект Юткіна	109
3.2.9 Закон переходу в надсистему	110

3.2.9.1 Капілярність.....	113
3.2.9.2 Інші ефекти і явища, які реалізують насосний принцип на надсистемному рівні.....	122
3.2.10 Закон підвищення ступеня ідеальності	124
3.3 Резюме розділу III.....	125
Розділ IV ВИКОРИСТАННЯ КОНТРРОТОРНИХ ЛОПАТЕВИХ СИСТЕМ У ТЕХНІЦІ	126
4.1 Здвоєний прямоточний гідротурбінний агрегат	126
4.2 Контрроторні конструкції вентиляторів	130
4.3 Контрроторні корабельні гребні гвинти	139
4.4 Контрроторні конструкції авіаційних двигунів	145
4.5 Контрроторні конструкції вітродвигунів	150
4.6 Контрроторні турбіни для перетворення енергії океану	154
4.7 Багатоступінчасті контрроторні системи	159
4.8 Резюме розділу IV.....	160
Розділ V КОНТРРОТОРНИЙ ЕФЕКТ У НАСОСОБУДУВАННІ	161
5.1 Осьовий контрроторний насос	161
5.2 Дослідження осьового контрроторного насоса	165
5.3 Контрроторна лопатева система відцентрового насоса	171
5.4 Дослідження відцентрового контрроторного комплексу	175
5.4.1 Уточнення теоретичної моделі відцентрової контрроторної системи	182
5.5 Від’ємна циркуляція швидкості на вході в робоче колесо насоса як контрроторний ефект	185
5.5.1 Дослідження вхідної циркуляції на параметри відцентрового ступеня.....	187
5.6 Резюме розділу V	199
ВИСНОВКИ.....	200
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	201

ВСТУП

Початок ХХІ століття характеризується глобальними трансформаціями, сутність яких полягає у формуванні VI технологічного укладу^{1, 2}, де в реальному секторі економіки буде переважати інтелектуальна праця. Наше століття має всі тенденції стати століттям людини – саме з нею будуть пов'язані нові можливості та перспективи. Принциповою відмінністю нового технологічного укладу (ТУ) є те, що головна мета розвитку суспільства визначається як підвищення якості життя людей на основі технологічного прогресу та фундаментальної науки. Головними стануть відносини «суб'єкт – природне середовище».

Наш світ загалом та наше суспільство зокрема опинилися в точці біфуркації, тобто в такій точці, у будь-якому околі якої всі можливі сукупності якісних властивостей об'єкта істотно відрізнятимуться один від одного.³ Ця категорія вважається певним моментом вибору, коли попередня траєкторія розвитку тієї чи іншої системи стає нестабільною і з'являються нові варіанти розвитку, а з ними і можливість вибору шляху в майбутнє⁴. Це належить і до розвитку багатьох технічних систем, зокрема й до тих, які передають енергію рідині.

Відзначимо також, що в точках біфуркації флуктуації хаотичні процеси на мікрорівні мають макроскопічну величину, тобто стають відчутними і набувають вагомості на макрорівні, на рівні системи. Водночас флуктуації, вносячи істотний елемент невизначеності, детермінують вибір одного певного напрямку еволюції з безлічі можливих. Тому для успішного розв'язання актуальної загалом для суспільства найважливішої проблеми вибору майбутнього вектора розвитку всіх його сфер, зокрема пов'язаних із виробництвом різних технічних систем, необхідно приділити особливу увагу дослідженню відповідних процесів на мікрорівні із залученням у комплексі методів природничих наук у межах нових міждисциплінарних підходів⁵.

Отже, сьогодні постає актуальна проблема визначення мети й вибору майбутнього вектора розвитку (парадигми) різних систем, оскільки в околі точки біфуркації немає можливості відкласти її рішення⁶. Відзначимо, що неувага до питань, пов'язаних з особливостями переходу до VI технологічного укладу, і відповідна неминуча відсутність розуміння принципів розвитку різних систем (соціальних, технічних тощо) у майбутньому з урахуванням біфуркаційного характеру цього переходу може сприяти втіленню в життя неочікуваних сценаріїв їхнього розвитку (або регресу), навіть абсолютно деструктивних. Але водночас відзначимо, що в околі точки біфуркації з'являється переважна кількість можливостей саме для подальшого прогресу.

¹ Иванов В. В. Стратегия прорыва: технологии, образование, наука / В. В. Иванов, Г. Г. Малинецкий. – Москва : URSS-ЛЕНАНД, 2016. – 300 с.

² Иванов В. В. Инновационная парадигма ХХІ / В. В. Иванов. – Москва : Наука, 2015.

³ Математический энциклопедический словарь / гл. ред. Ю. В. Прохоров. – Москва : Сов. энциклопедия, 1988. – 847 с.

⁴ Николис Д. Динамика иерархических систем. Эволюционное представление / Д. Николис. – Москва : Мир, 1989. – 488 с.

⁵ Малинецкий Г. Г. Синергетика и прогнозы будущего / Г. Г. Малинецкий, С. П. Курдюмов. – Москва : УРСС, 2003. – 288 с.

⁶ Ратушный А. В. Путь к новой парадигме развития: особенности перехода к VI технологическому укладу и постиндустриальному обществу / А. В. Ратушный, А. А. Дрофа // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ» (за галузями знань «Технічні науки»). – 2017. – № 60. – С. 199–205.

Із 70–80-х років ХХ століття і до сьогодні економіку, промисловість, технології визначає V технологічний уклад, основою якого є мікроелектроніка. Серед передових галузей цього ТУ – електронна промисловість, телекомунікації, обчислювальна техніка. Зокрема приблизно з 2010 року у світі йде інтенсивне становлення VI технологічного укладу – епохи розвитку і широкого використання нанотехнологій, відновлювальних джерел енергії («зеленої енергетики») і в перспективі – енергії термоядерного синтезу (рис. 1). Перехід від V до VI ТУ, як і всі попередні переходи, пов’язані, як бачимо, зі зміною головного енергоносія епохи. Потрібно мати на увазі, що прийдешній технологічний уклад орієнтований не стільки на технологічні зростання, скільки на підвищення якості життя суспільства загалом. Його основу становитимуть фундаментальна наука та міждисциплінарні наукові підходи⁷.

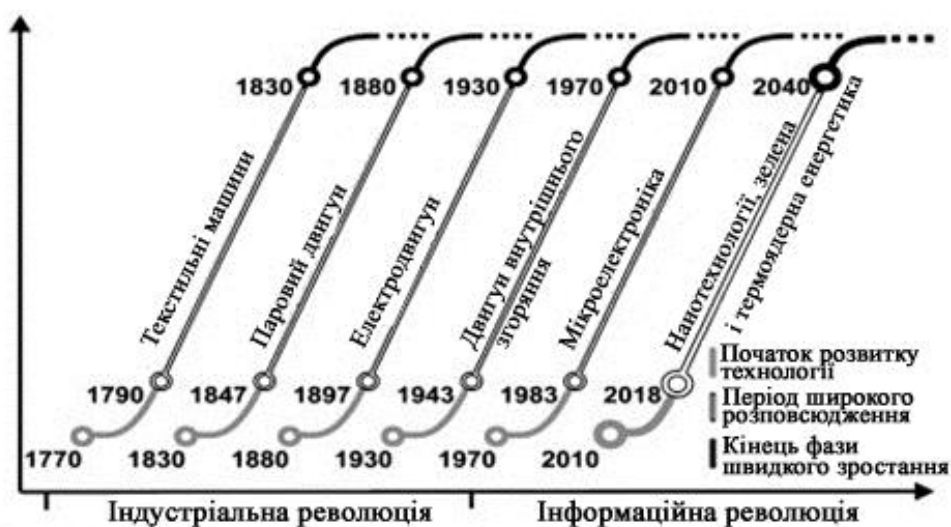


Рисунок 1 – Періодизація технологічних укладів

До того ж загальновідомим є факт, що без підтримки фундаментальної науки потенціал прикладних досліджень обмежений у часі і в кінцевому підсумку вичерпується, унаслідок чого та чи інша країна потрапляє в технологічну залежність від інших держав, які активно переходять до VI технологічного укладу.

Відзначимо також, що обґрунтування неминучості переходу до фактично нового стану суспільства було сформульовано ще на самому початку ХХІ століття. Так А. Д. Панов, досліджуючи планетарну систему⁸, котра містить у собі біосферу і людську цивілізацію, у процесі її історичного розвитку, що являє собою послідовність відносно стабільних епох (біологічних і соціальних еволюцій) і революцій, які їх розділяють (точок біфуркації), підкреслює її векторний характер. Відзначається важлива особливість, яка полягає в тому, що еволюція відбувається в напрямку ускладнення структури і віддалення глобальної планетарної системи від стану термодинамічної рівноваги⁹.

⁷ Иванов В. В. Перспективный ТУ: возможности, риски, угрозы // Экономические стратегии. – 2013. – № 4. – С. 2–5.

⁸ Панов А. Д. Кризис планетарного цикла Универсальной истории // Вселенная, пространство, время. – 2004. – № 2 (3). – С. 28–34.

⁹ Назаретян А. П. Цивилизационные кризисы в контексте универсальной истории / А. П. Назаретян. – Москва : ПЕР СЭ, 2001.

Так звані революції в цьому контексті – це переворот у розвитку планетарної системи внаслідок розв’язання кризи еволюційного процесу, виділені за допомогою експертного оцінювання фахівців різного профілю. Ці революції (від виникнення аеробної еукаріотичної фауни, «кембрійського вибуху» і початку антропогену до промислових і інформаційних революцій нового часу і сучасності) утворюють збіжну послідовність точок, що мають властивості автомодельності.

Механізм планетарних революцій має особливість використання так званого потенціалу надлишкової внутрішньої різноманітності. Під цією категорією мається на увазі те, що деякі структури, що виникають на попередній фазі розвитку планетарної системи, але не відіграють у ній помітної ролі, після революції стають істотними системоутворювальними факторами. Унаслідок такого «природного відбору» розвиваються саме ті форми, які визначають наступний етап розвитку. Тобто революція в такому контексті мається на увазі як суттєва перебудова планетарної системи, а не поява нової форми. На підставі цього можна відзначити певну внутрішню єдність революцій планетарного циклу і розглянутих вище змін технологічних укладів. Отже, ще раз переконуємося в тому, що саме сьогодні особливо актуальний пошук нових можливостей і принципів розвитку тих чи інших глобальних і локальних систем, пошуку «непоміченого» серед уже наявних підходів, ідей, технологій і конструкцій.

Потрібно зазначити, що тривалість розглянутих історичних епох постійно скорочується – виявляється ефект «прискорення» історичного часу. Тобто чим вище рівень організації планетарної системи, тим швидше вона еволюціонує і, відповідно, все менше часу потрібно для настання наступної кризи і відповідної революції. Проте тривалість історичних епох скорочується закономірно – в однаковій пропорції. У цьому і полягає властивість автомодельності.

Водночас ідеальна автомодельна послідовність у цьому разі виражається рівнянням

$$t_n = t^* - \frac{T}{\alpha^n},$$

де $\alpha > 1$ – коефіцієнт прискорення історичного часу, що показує, у скільки разів кожна наступна глобальна планетарна епоха коротше, ніж попередня;

T – тривалість інтервалу часу, що описується;

n – номер революції;

t^* – деякий момент часу (точка), названий сингулярністю¹⁰.

Сутність точки сингулярності полягає в тому, що автомодельна послідовність t_n , яка сходиться при $n \rightarrow \infty$, необмежено наближається до точки t^* , ніколи її не переходячи. Щодо планетарної системи це означає, що її звична еволюція навіть у деякому околі точки сингулярності не зможе тривати, оскільки революції в підсумку повинні були б змінювати одна одну через зникні короткі відрізки часу. Особливо важливо відзначити, що розрахований спосіб відповідного моделювання, очікувана межа розглянутої послідовності – сингулярність – випадає на 2015 рік із похибкою приблизно в 15 років. Цей результат загалом має підтвердження і серед інших дослідників¹¹.

¹⁰ Дьяконов И. М. Пути истории. От древнего человека до наших дней / И. М. Дьяконов. – Москва : Восточная литература, 1995.

¹¹ Капица С. П. Феноменологическая теория роста населения Земли // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166. – С. 63–80.

Одночасно констатуємо, що характер еволюції і розвитку всієї планетарної системи під час переходу через точку сингулярності неминуче має докорінно змінитися. Вочевидь, є необхідність вибору нової парадигми буття людства – траєкторії розвитку в постсингулярну епоху. Ця теза, як бачимо, визначає саму сингулярність як згадану вище точку біфуркації з усіма притаманними їй особливостями. На підставі цього можна зробити висновок про те, що постсингулярна епоха фактично буде відповідати принципово новому VI технологічному укладу, який формується сьогодні.

Отже, можна відзначити, що наше суспільство підійшло до дійсно переломного моменту своєї історії, перебуваючи в околі точки сингулярності-біфуркації, у якій збіглися зміни основних закономірностей розвитку багатьох його сфер.

Особливий інтерес являє собою збіг викладених вище тез із результатами дослідження істориків, виконаний за допомогою математичного моделювання.¹² Так, виявляється, що наше суспільство живе за циклічними законами, які являють собою 144-річні великі цикли, які діляться на чотири 36-річні підцикли, які, зі свого боку, складаються з трьох 12-річних періодів.

Останній, нині чинний 144-річний цикл, почався в 1881 році, коли наше суспільство в повному обсязі почало переходити в епоху індустріальної революції. Ця дата надзвичайно точно узгоджується з періодизацією технологічних укладів (див. рис. 1), де на 1880 рік випадає зародження третього «електричного» укладу. Завершиться цикл у 2025 р., що також добре корелює з наведеними вище даними про час настання сингулярності звичної еволюції планетарної системи (2015 р. + 15 років). Знову звертаючись до періодизації технологічних укладів, відзначимо, що нинішній великий історичний цикл (1881–2025 рр.) увібрав у себе останні три уклади, а початок широкого впровадження технологій майбутнього VI укладу випадає вже на 2018 р., тобто фактично в точку сингулярності-біфуркації. З огляду на все вищенаведене неможливо не констатувати унікальність поточного історичного моменту та відповідної великої відповідальності сучасного людства за майбутнє і прогрес. Початком глобальних змін може слугувати пандемія, викликана коронавірусною інфекцією COVID-2019. Тобто людство *вже* увійшло до епохи змін.

Також ми хочемо особливо відзначити, що VI технологічний уклад вже почав впроваджуватися у світі, і не побачити початок певних докорінних змін, пов'язаних із буттям людства, неможливо. Водночас біфуркаційні зміни описуються зараз не тільки концепцією зміни технологічних укладів, а й ідеями переходу до постіндустріального суспільства, а також III і IV промисловими революціями^{13, 14}. Особливості цих процесів під час формування цілісної парадигми розвитку, до того ж з деякі особливості можна певним способом порівняти з ноосферогенезом, описаним В. І. Вернадським¹⁵.

Водночас дуже важливо відзначити, що кожен новий великий історичний цикл знаменується появою якоїсь нової всеосяжної ідеї, нових глобальних принципів розвитку всіх систем – від суспільства, його інформаційного та промислового комплексів до окремого індивіда і конкретного класу технічних систем. Можна зауважити, що спроби осмислити

¹² Спицнадель В. Н. Основы системного анализа / В. Н. Спицнадель. – Санкт-Петербург : Изд. дом «Бизнес-пресса», 2000. – 321 с.

¹³ Белл Д. Грядущее постиндустриальное общество. Опыт социального прогнозирования / Д. Белл. – Москва : Академия, 1999.

¹⁴ Мельник Л. Г. Теория развития систем : монография / Л. Г. Мельник. – Сумы : Университет. кн., 2017. – 416 с.

¹⁵ Вернадский В. И. Научная мысль как планетное явление / В. И. Вернадский. – Москва : Наука, 1991. – 271 с.

процес розвитку тих чи інших систем і вироблення відповідних нових ідей фактично і є своєрідними флуктуаціями, здатними вплинути на наше майбутнє.

Розглянемо далі системи, що передають енергію рідині, або насоси. Як відомо, насос – це технічна система, що здійснює перетворення енергії робочого органа на механічну за своєю природою енергію потоку рідини. До того ж вид енергії, що перетворюється на механічну енергію робочого органа насоса (наприклад, робочого колеса) може бути різним залежно від виду привода, прийнятого для раціонального використання в тих чи інших умовах.

Необхідно звернути особливу увагу на той факт, що принципові конструкції і базис теорії (основне рівняння лопатевих машин, сформульоване Л. Ейлером) найпоширенішого типу насосів – динамічних – формувалися ще за найперших технологічних укладів¹⁶. Отже, сьогодні спостерігається актуальна проблема, що має спрямованість у майбутнє. Вона полягає в пошуку комплексної відповіді на принципове питання про те, чи буде потреба в насосах традиційної конструкції за VI і наступних технологічних укладів, чи варто вже зараз шукати принципово нові підходи передання енергії рідині? На нашу думку, запорука успішного розвитку полягає в пошуку нових технічних рішень, що враховують об'єктивні тенденції і особливості переходу до VI технологічного укладу.

У цьому контексті спостерігається своєрідна діалектика перспектив розвитку насосів як технічних систем. З одного боку, у найближчому майбутньому потужне енергетичне насосне обладнання, що працює на принципах, сформульованих ще Ейлером, незамінне, з іншого – ідеологія переходу до VI технологічного укладу вимагає пошуків принципово нових способів передання енергії рідині (причому на мікрорівні).

Це пов'язано передусім з обмеженістю запасів традиційних невідновлюваних джерел енергії (НДЕ), яких за оптимістичними прогнозами вистачить у середньому лише до кінця ХХІ століття. Саме НДЕ є зараз головним енергоресурсом для приводів насосів. Одночасно людство просто змушене буде в близькому майбутньому все більше переходити до використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) і, відповідно, гармонізувати свої енерговитрати з доступною до споживання кількістю даних енергетичних ресурсів¹⁷. Початок цього переходу і спрямованість на все більше освоєння ВДЕ (насамперед енергії Сонця), по суті, і є однією з основ переходу до VI технологічного укладу. У зв'язку з цим вже сьогодні прогнозуємо у віддаленому поки майбутньому кардинальну і неминучу трансформацію всіх сфер буття людського суспільства і передусім промисловості. Цю трансформацію можна характеризувати масовою відмовою від використання технічних систем, що працюють на принципах, сформульованих у попередніх технологічних укладах і так чи інакше споживають НДЕ. На наш погляд, усвідомлення цього факту вимагає від нас вже сьогодні сміливих комплексних міждисциплінарних пошуків нових концепцій і принципів роботи для технічних систем майбутнього. Особливо це стосується систем, що дозволяють транспортувати рідини, і насамперед воду як найважливіший життєвий ресурс людини. Відзначимо, що такі системи людина потребує і потребуватиме завжди і всюди.

До того ж, звичайно, неможливо, хоча б коротко, не звернути увагу на основну проблему, що стримує на сьогодні розвиток і впровадження систем, які так чи інакше

¹⁶ Михайлов А. К. Лопатные насосы. Теория, расчет и конструирование / А. К. Михайлов, В. В. Малюшенко. – Москва : Машиностроение, 1977. – 288 с.

¹⁷ Твайделл Дж. Возобновляемые источники энергии / Дж. Твайделл, А. Уэйр. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.

використовують ВДЕ. На відміну від невідновлюваних, ці джерела мають істотно (іноді на порядки) меншу щільність потоку, потенційно здатну до вивільнення з них корисної енергії¹⁸. Тобто енергію ВДЕ необхідно перед використанням концентрувати (і відповідно акумулювати), що природно пов'язано з додатковими (часом значними) технічними труднощами. Однак ще раз підкреслимо, що об'єктивна реальність буття людства на планеті Земля не залишає нам іншого шляху, як загалом пошук принципово нових підходів до організації життєвого циклу тих чи інших видів технічних систем.

З огляду на окреслену вище діалектику перспектив насосного обладнання далі будуть запропоновані ідеї для можливої реалізації на «ближню» перспективу – застосування принципів, загалом пов'язаних зі зниженням питомої швидкості, тобто способів, здатних інтенсифікувати передання енергії від відповідної технічної системи до рідини. Реалізація «дальньої» перспективи пов'язана, на нашу думку, насамперед із дослідженням можливостей реалізації передання енергії рідині на мікрорівні. До того ж повноцінне розуміння потенціалу «дальньої» перспективи вимагає глибокого і всебічного вивчення мікроструктури самої рідини, передусім води, а також перспектив безпосереднього взаємоперетворення різних видів енергії, що є завданням для подальшого дослідження в межах цієї тематики.

У межах дослідження «ближньої» перспективи відзначимо одну з основних сьогоденних проблем промисловості – велику енергоємність експлуатації насосного обладнання. Так, у різних галузях насоси споживають 25–60 % від всієї енергії, що витрачається^{19, 20}. Водночас майже $\frac{3}{4}$ енерговитрат випадає на динамічні насоси. У зв'язку з цим Європарламент ще у 2005 році ухвалив «Директиву щодо визначення вимог, що ставляться до проектування виробів, які споживають енергію», котра передбачає скорочення загального споживання енергії в Європі до 2020 року на 20 %, а на енергоспоживання насосного обладнання – на 40 %²¹. У контексті переходу до VI технологічного укладу виконання цієї «Директиви...» вважається закономірним і, найголовніше, неминучим етапом гармонізації енергоспоживання, що передбачає, на підставі намічених цифр суттєву зміну підходів у сучасній промисловості та насособудуванні зокрема.

Варто зазначити, що досі, розглядаючи таку енергетичну проблему на трьох ієрархічних рівнях: «насос», «насосний агрегат» і «насосний агрегат у складі системи (мережі)», фактично не приділяють увагу можливості застосування різних приводів насоса, відмінного від електродвигуна²². Уже цей факт є явною суперечністю щодо концепції переходу до наступного технологічного укладу. Отже, розширюючи певним способом межі «Директиви...», необхідно розглядати не тільки і навіть, можливо, не стільки питання зниження й оптимізації споживання енергії насосним обладнанням, а підвищення ефективності всієї системи (ланцюжка) перетворення і передання енергії від первинного

¹⁸ Соренсен Б. Преобразование, передача и аккумуляция энергии : учебно-справочное руководство / Б. Соренсен. – Долгопрудный : Интеллект, 2011. – 296 с.

¹⁹ СИНТ'09 : материалы V Международной конференции. – Воронеж : Научная книга, 2009. – 356 с.

²⁰ Escorpump.ru'2009 : Тезисы докладов международной научно-технической конференции. – Москва : Из-во РАПН, 2009. – 458 с.

²¹ Europump Variable Speed Pumping: guide to successful applications. – Brussels : Hydraulic Institute and Europump, 2004. – 172 p.

²² Ратушный А. В. Пути уменьшения энергопотребления насосным оборудованием / И. А. Ковалев, А. В. Ратушный // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2010. – № 3, Т. 1. – С. 86–97.

джерела енергії до рідини. Одночасно особливу увагу, звичайно, потрібно звертати на можливість прямого перетворення різних видів енергії одна на одну.

Загалом зменшення енергоспоживання окремого насоса під час забезпечення ним заданих параметрів напору і витрати досягається завдяки підвищенню його ККД. Багато-річний досвід досліджень, розробок і виробництва насосів провідними компаніями світу забезпечує сьогодні досить високі значення цього показника в оптимальному режимі залежно від питомої швидкохідності. Тому очікувати якихось істотних проривів, і отже, зниження енергоспоживання не доводиться. Орієнтовно резерви підвищення ККД відцентрових насосів можна оцінювати у 2–3 % для насосів із питомою швидкохідністю $n_s = 300$ – 100 , 3–5 % – для $n_s = 100$ – 70 і на 5–10 % для $n_s = 60$ – 30 ^{23, 24}. Причому, як показує аналіз балансів енергії, резерви підвищення загального ККД полягають не стільки у зменшенні гідравлічних втрат (хоча вони, звичайно, є особливими для високих n_s), скільки в об'ємних і механічних втратах (що особливо характерно для $n_s = 60$ – 30). Отже, можна зазначити про те, що подальше системне дослідження способів підвищення енерго-ефективності відцентрових насосів низької і наднизької питомої швидкохідності також є актуальним завданням на «ближню» перспективу розвитку насособудування в наступну технологічну епоху.

Загалом, розглядаючи це питання, відзначимо, що сьогодні в багатьох галузях промисловості виникла проблема підвищення економічності відцентрових насосів, які забезпечують зростання напору за відносно невеликих подач²⁵. Розв'язання таких завдань багато в чому потрібно шукати в збільшенні інтенсивності енергопередачі в системі «робочий орган насоса – перекачувана рідина». Реалізація цієї ідеї сприятиме можливості застосування одноступінчастого відцентрового насоса замість багатоступінчастого або істотного скорочення кількості ступенів останнього. Отже, у межах «ближньої» перспективи актуальним також є питання пошуку таких способів модернізації геометричних параметрів лопатевої решітки відцентрового насосного ступеня, які сприяли б зростанню її інтегральних характеристик – насамперед напору і ККД. Відзначимо також, що, крім цього, попутно буде вирішуватися не менш актуальне завдання зниження масогабаритних параметрів насосів.

Щодо перспектив відцентрових насосів низьких n_s можна відзначити, що застосування для розв'язання вищезазначених завдань насосів поршневого, гвинтового, вихрового тощо чи якого-небудь іншого типу або не бажано з міркувань економічності, або взагалі неможливо через певні особливості. Крім того, загальновідомо, що лопатеві насоси мають низку переваг (масогабаритні, експлуатаційні, надійні) порівняно з близькими з ними в галузі застосування насосами інших типів.

На підставі цього контексту виділимо одну фактично нову ідею для практики насособудування. У галузях насосо-, авіа-, суднобудування відомі осьові агрегати з так званими контрроторними лопатевими решітками. Під контрроторністю мають на увазі принцип компонування динамічної лопатевої машини, згідно з яким два ротори з лопатевими решітками і загальною віссю обертання наближені один до одного і обертаються в протилежних

²³ Ржебаева Н. К. Расчет и конструирование центробежных насосов : учеб. пос. / Н. К. Ржебаева, Э. Е. Ржебаев. – Сумы : СумГУ, 2009. – 220 с.

²⁴ Ковалёв И. А. Исследование путей повышения экономичности ступени центробежного насоса низкой быстроходности ($n_s = 40$) : автореферат... канд. техн. наук, спец. : 05.193 – гидравлические машины / И. А. Ковалёв. – Харьков : ХПИ им. В. И. Ленина, 1970. – 22 с.

²⁵ Ратушний О. В. Підвищення напірності ступеня відцентрового насоса шляхом удосконалення лопатевої гратки робочого колеса : автореферат... канд. техн. наук, спец.: 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати / О. В. Ратушний. – Суми : СумДУ, 2015. – 20 с.

напрямах. Водночас кожен ротор спирається на свої опори і має окрему систему підведення (або відведення) механічної енергії.

Потрібно зазначити, що застосування таких конструкцій здатне істотно інтенсифікувати процес енергопередачі від лопатевої системи до рідини або значно збільшити осьову силу взаємодії роторної частини і рухомої через неї рідини, що, зі свого боку, сприяє в разі зниження питомої швидкохідності перспективі зростання напору контрроторного ступеня порівняно зі звичайною на десятки відсотків. До того ж використання принципу контрроторності загалом і особливо стосовно відцентрових насосів зокрема на сьогодні широкого розповсюдження не отримало, що пов'язано з недостатнім проведенням теоретичного й експериментального дослідження особливості робочого процесу в таких лопатевих системах, їхніх переваг і недоліків, а також труднощами під час конструювання і виготовлення. Сьогодні це ж саме можна зазначити загалом і щодо інших згаданих способів.

На підставі вищесказаного можна зазначити, що основні напрямки розв'язання окреслених проблем пов'язані з подальшим продовженням наукових пошуків для створення насосного обладнання з новими принципами дії, зокрема й ускладнення робочого процесу гідромашини²⁶.

Отже, на період найближчого десятиліття випадає момент зміни відразу декількох циклів суспільного розвитку. Ці зміни пов'язані з пошуком нової концепції, ідеї розвитку, а також із поступовим переходом на принципово інші технологічні рейки подальшої організації промислового комплексу, пов'язані з розумінням і організацією різних процесів на мікрорівні і неминучістю узгодження енергетичних проблем людства з доступними, насамперед відновлюваними, джерелами енергії.

У контексті особливостей переходу до VI технологічного укладу, розглядаючи технічні системи, що здійснюють передання енергії рідині (насоси), як одні з найбільш енергоємних машин сучасності виділили два діалектично пов'язаних перспективних способи їхнього розвитку (на «ближню» і «дальню» перспективи), спрямованих на інтенсифікацію передання енергії рідині загалом відомими, але такими, що поки не знайшли широкого застосування способами, а також пов'язаних із необхідністю дослідження можливостей передання енергії рідині на мікрорівні на основі аналізу можливостей прямого перетворення різних видів енергії відповідно.

Головною методологічною основою цього дослідження є теорія розвитку технічних систем та її закони, що застосовуються до насосів.

Як певне резюме цього підрозділу і преамбули всієї роботи варто зазначити, що способи реалізації можливих перетворень різних видів енергій на механічну енергію рідини, засновані на концепції переходу до VI технологічного укладу, звичайно не претендують на всеосяжний характер, а покликані поставити вектор майбутніх досліджень. Вони спрямовані на реалізацію ідеї максимального скорочення ланцюжків перетворення і передання енергії від первинного її джерела і носія до безпосередньо робочого органа тієї чи іншої технічної системи, що здійснює корисну роботу. Однак не може залишатися без уваги закономірність теорії розвитку технічних систем, безпосередньо пов'язана з переходом енергопередачі на

²⁶ Евтушенко, А. А. Развитие теории рабочего процесса, практики конструирования и применения динамических насосов : монографія / А. А. Евтушенко. – Сумы : СумГУ, 2013. – 515 с.

мікрорівень, що полягає в тому, що чим складніше робочий процес машини, тим нижче її ККД²⁷.

Тому ми тепер повинні чітко усвідомити такий принцип. Незворотність переходу до VI технологічного укладу і відповідне все більш широке залучення відновлюваних джерел енергії вимагає від нас пошуків нових принципів роботи тих чи інших класів технічних систем. Машини, які будуть працювати на нових принципах, у яких робочий процес буде відбуватися на рівні окремих частинок речовини, також матимуть більш низький ККД, аніж техніка, що працює на відомих принципах і так чи інакше споживає НДЕ. Це своєрідна і неминуча «плата» за переорієнтацію промисловості на використання відновлюваних джерел енергії.

Ще раз підкреслимо, що перехід до VI технологічного укладу і все більш широке залучення ВДЕ та відповідне зниження ККД технічних систем – це об'єктивний і незворотний шлях розвитку усієї техніки у XXI столітті. Звісно ж, ми маємо можливості удосконалення наявних машин, але робити це нескінченно без принципових змін у робочому процесі неможливо.

Відзначимо також, що багато з розглянутих у цьому дослідженні принципів, які потенційно здатні забезпечити насосний ефект вимагають ретельного підходу до хімічного складу перекачуваного середовища. Загалом можна припустити перспективність перекачування «мікрорівневими насосами» однорідних і чистих рідин і передусім чистої води як найбільш поширеної на Землі і необхідної людині рідини.

У зв'язку з цим у подальшому проявляється необхідність вивчення рідкого агрегатного стану речовини H_2O з метою пошуку відповіді на фундаментальне питання, що полягає в тому, як можливо впливати на саме перекачуване середовище (на рівні його елементарних частинок) для того, щоб на макрорівні обумовити рух конкретного об'єму рідини (подачу до споживача). Але це, на наш погляд є предметом окремого фундаментального дослідження. У цій роботі лише обґрунтовується актуальність такого дослідження в межах перспектив переходу до VI технологічного укладу.

²⁷ Хубка В. Теория технических систем / В. Хубка ; под. ред. К. А. Люшинского ; пер. В. В. Ачкасов, Н. И. Зуек, Е. Б. Матвеева. – Москва : Мир, 1987. – 208 с.

РОЗДІЛ І

ІСТОРІЯ ВИНИКНЕННЯ ТА РОЗВИТКУ НАСОСОБУДУВАННЯ

Досліджуючи питання пошуку нових підходів із передання енергії рідині, зупинимося передусім на питанні історичного розвитку насособудування загалом і окремих видів насосних технічних систем зокрема.

Насособудування – це окрема галузь машинобудування, що забезпечує функціонування та розвиток всіх основних галузей економіки – енергетики, нафтовидобувної та нафтопереробної промисловості, трубопровідного транспортування більшості рідин і гідротранспортування сипких матеріалів, водопостачання та водовідведення в житлово-комунальному господарстві та промисловості; без них не змогли б працювати підприємства вугледобувного, переробного та сільськогосподарського комплексів. Зазначимо, що за даними EuroPump²⁸ насосне устаткування в різних галузях споживає 25–60 % всієї потужності. Розподіл енергоспоживання насосами та іншим устаткуванням подано на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Розподіл споживання електроенергії різним обладнанням

До того ж майже 75 % енерговитрат випадає на динамічні насоси (рис. 1.2). На підставі цього першочергову увагу щодо пошуків нових способів розвитку насособудування на «ближню» перспективу будемо приділяти саме цій групі насосів.

1.1 Насособудування від давніших часів до початку ХХ сторіччя

У давніх культурно розвинених країнах, наприклад, у Єгипті, Вавилоні та Китаї, які мали великі території з різко вираженим сухим кліматом, зрошення площ, що використовувалися для сільського господарства, було найважливішим життєвим питанням. Перші великі громади людей у населених пунктах і містах неминуче стикалися з проблемою питного водопостачання і потребою у водопостачанні загалом. Доказом цього важливого

²⁸ EuroPump.ru'2009 : тезиси докладов международной научно-технической конференции. – Москва : Из-во РАПН, 2009. – 458 с.

етапу розвитку людського суспільства можуть бути відомі акведуки (водопроводи) в Сицилії (450 років до н. е.), перший (приблизно 312 років до н. е.) римський акведук (16,6 км), акведук 91,7 км Марсія в Римі (приблизно 144 року до н. е.), а також перший напірний водопровід (близько 160 років до н. е., $p \approx 2$ МПа) за Пергамоном. Якщо спочатку розв'язували проблеми каптажних джерел і безнапірного підведення води споживачам, то потім – проблеми подолання різниці висот. Починаючи з цього моменту, тобто з першого пуску водопідйомного механізму, можна відзначити про початок ери розвитку насосів.



Рисунок 1.2 – Розподіл споживання електроенергії за типами насосів

Висловлюючись сучасною мовою, перші водопідйомні пристрої здійснювали підвищення питомої енергії води для її подальшого руху вниз за допомогою підвищення її питомої енергії положення «z» – найпростішої та найдоступнішої з технічного погляду складової.

Сьогодні, піднімаючи, наприклад, відро води з колодязя чи берега річки, ми здійснюємо такий самий процес підвищення енергії рідини. До того ж дві інші складові – питома енергія тиску $\frac{p}{\rho g}$ і питома кінетична енергія $\frac{v^2}{2g}$ – залишаються незмінними.

Відкриття млина нашттовхнуло людей на думку про вдосконалення робочого процесу обертання жорнів. Так, вперше в історії людства була винайдена машина, що працювала без людських рук. Водяний млин значно полегшив працю наших предків. Перша згадка про водяний млин належить до того часу, коли було відкрите водяне колесо – перший найпростіший гідродвигун (рис. 1.3)²⁹.

Водопідйомне колесо – найдавніший відомий нам водопідйомний механізм. Величина напору цього пристрою становила 3–4 м, максимальна подача – 8–10 м³/год. А так звані ланцюгові насоси (нескінченні ланцюжки з прикріпленими ковшами) використовувалися до 170 років до н. е. Тоді в Каїрі вже був колодязь глибиною 91,5 м, з якого добувалася питна вода за допомогою ланцюгового насоса. Інколи такий насос називають норія (рис. 1.4).

²⁹ Большая советская энциклопедия (БСЭ) : в 30-ти т. – Москва : Сов. энциклопедия, 1970.

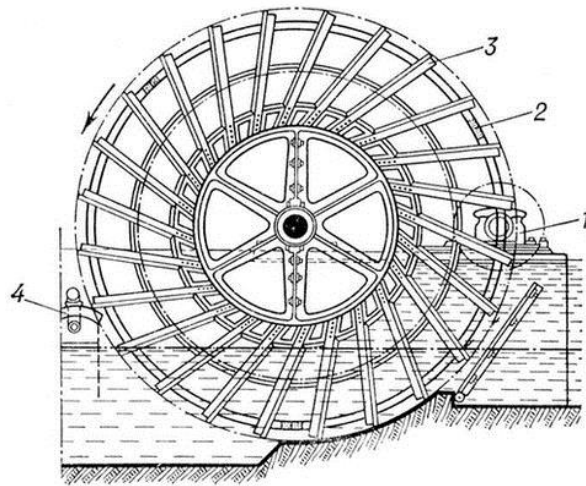


Рисунок 1.3 – Водопідйомне колесо з лопатями: 1 – привод; 2 – колесо; 3 – лопаті;
4 – приймальний пристрій

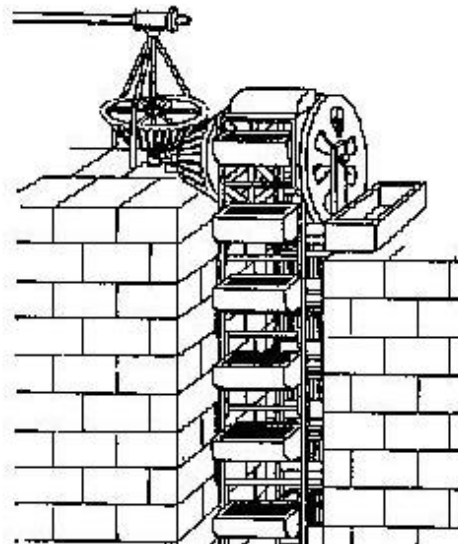


Рисунок 1.4 – Норія для підйому рідини

Першу згадку про млин, що працює силою води, зробив давньоримський вчений Вітрувій. Рух від водяного колеса на жорно передавався за допомогою ступінчастих передач і декількох коліс. Винахід водяного млина став вершиною розвитку техніки в античні часи і початком пошуку технічних рішень епохи Відродження.

У добу Ренесансу застосовувалися три типи водяних коліс:

- 1) нижньобійні (оберталися завдяки кінетичній енергії води);
- 2) середньобійні (використовували частково кінетичну енергію і частково енергію ваги води);
- 3) верхньобійні (приводилося в рух силою води, що на нього падала).

Всі ці типи водяних коліс, по суті, були гідродвигунами і для підйому води використовувались у поєднанні з водопідйомним колесом. Разом із ними використовувались і інші гідропідйомні механізми – журавлі, ворота, гвинти Архімеда та інші пристрої. Всі вони, використовуючи живу мускульну силу людей, тварин або енергію течії води,

забезпечували підйом води з невеликою об'ємною подачею і невеликим напором для потреб дрібних ремісничих виробництв³⁰.

Принципово новий крок у справі забезпечення більш високих напорів (питомих енергій води) було зроблено у II–I століттях до н. е. і полягав він у створенні поршневого насоса. Це вже був насос, у якому підвищення енергії води здійснювалося завдяки другій складовій питомої енергії, а саме – завдяки потенціальній енергії тиску. І це поклало початок створення насосів гідрооб'ємного типу, зокрема всіх сучасних різновидів: поршневих, плунжерних, гвинтових, зубчастих, коловратних тощо.

Першим насосом відносно вдалої конструкції був поршневий насос, збудований давньогрецьким механіком-винахідником Ктезибієм із Олександрії у 140-х роках до н. е. Це був двоциліндровий пожежний насос із всмоктувальним і напірним клапанами, повітряним врівноважувальним ковпаком і важелем-балансиром для ручного привода (рис. 1.5). У цій конструкції, розробленій майже 2200 років тому, неважко розпізнати всі основні деталі, притаманні і сучасним ручним пожежним насосам. Відомості про розробки Ктезибія збереглися у працях Герона і римського архітектора-вченого Вітрувія.

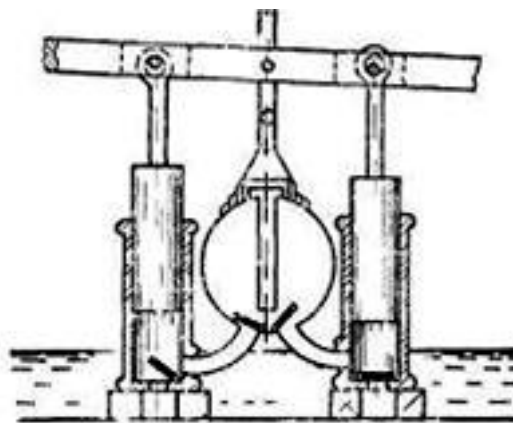


Рисунок 1.5 – Перший поршневий насос Ктезибія

У XV–XVI ст. на зміну ремісничо-цеховій організації виробництва виникла мануфактура, що призвело до розширення масштабу виробництва і більшої його спеціалізації, вдосконалення знарядь праці. Вимоги до насосів і умови їхнього застосування ставали більш різноманітними. Крім поршневих, стали створювати насоси обертальної дії для напірної подачі рідкого середовища у великих об'ємах. Рамеллі (1530–1590 рр.) у 1588 р. описав чотири різновиди обертальних насосів, що дуже нагадують за принципом дії сучасні роторні об'ємні насоси (рис. 1.6).

Ідея використання відцентрового поля для подачі води виникла в Леонардо да Вінчі (XV ст.), але не була реалізована. Французький інженер Бланкано (1566–1624 рр.) за цим самим принципом побудував відцентровий насос із відкритим обертовим робочим колесом (рис. 1.7).

Із зростанням значення гірничої справи і для загальної індустріалізації виникла об'єктивна потреба видобутку води з великих глибин на поверхню землі. Від «водяних мистецтв» середньовічної гірничої справи, які описав Агрікола, до перших водяних насосів із

³⁰ Кириллин В. А. Страницы истории науки и техники / В. А. Кириллин. – Москва : Наука, 1986. – 512 с.

паровим приводом (початок XVIII ст.), розроблених і збудованих англійцем Ньюкоменом, відчувається сильний вплив гірничої справи на розвиток насособудування.

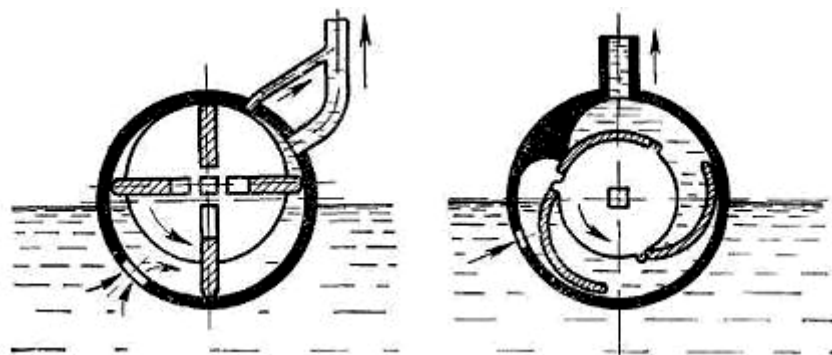


Рисунок 1.6 – Роторний об'ємний насос

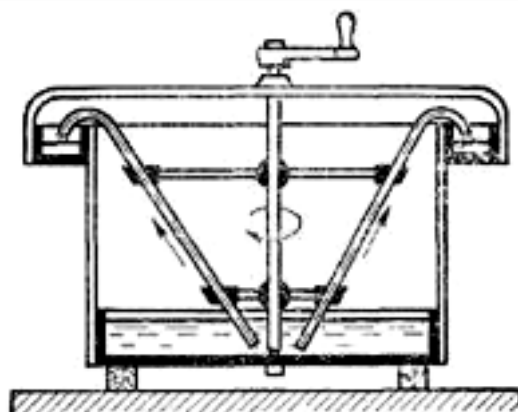


Рисунок 1.7 – Відцентровий насос із відкритим обертовим робочим колесом

Так званий насос Ньюкомена є першим представником балансирних насосів. У ньому робочий хід поршня здійснюється від балансира не в стадії розширення пари або заповнення парового циліндра, а після заповнення циліндра паром і наступним за ним впорскуванням води, який викликає конденсацію пари, а це означає, що енергія робочого ходу отримується винятково завдяки атмосферному тиску, що діє на паровий поршень. Тому з боку привода необхідно було передбачувати циліндри великих діаметрів для того, щоб збільшити потужність насоса.

Незабаром з'явилися балансирні насоси, у яких для переміщення поршня використовувалась енергія розширення або тиску пари. Найбільший балансирний насос цього виду з добовою продуктивністю $32\,700\text{ м}^3$ ($1365\text{ м}^3/\text{год}$) і напором приблизно 52 м був встановлений у 1860 році в Лондоні.

Відцентровий насос однієї з перших найбільш вдалих конструкцій був винайдений у 1689 році французьким фізиком Д. Папеном (1647–1714 рр.). Насос складався із дволапатевого робочого колеса, що обертається в циліндричному корпусі постійного перерізу, і використовувався для відкачування ґрунтових вод. Він мав низку істотних недоліків, а головне – був малоефективним. Незабаром Д. Папен удосконалив конструкцію машини,

застосувавши багатолопатеве робоче колесо і спіральну відводну камеру. У такому вигляді насос Папена (рис. 1.8) нагадує сучасний одноступінчастий відцентровий насос.

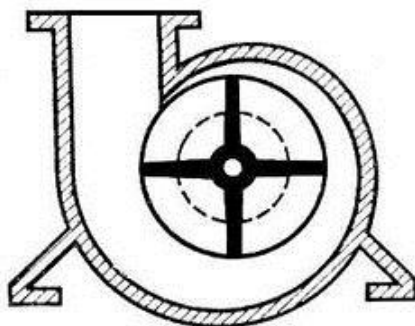


Рисунок 1.8 – Відцентровий насос Папена

У 1750 році Л. Ейлер розробив теорію робочого процесу лопатевих гідромашин і в 1754 році запропонував конструкцію відцентрового насоса, який не отримав тоді практичного застосування через відсутність високообертового двигуна. А в 1755 р. публікується трактат Ейлера «Загальні принципи руху рідин», який започаткував теоретичну гідродинаміку.

Класичну форму робочого колеса радіального типу, властиву сучасним відцентровим насосам, було використано лише в 1818 році в Бостоні в так званому «Масачусетс-наосі» Андреасом. Тоді мова йшла про двопоточний спіральний насос із напіввідкритим робочим колесом і радіальними прямими лопатями. У 1846 р. Г. Андреас довів, що криволінійні лопаті забезпечують кращий ефект нагнітання, ніж прямі.

У 1832 році російським інженером А. А. Саблуковим (1783–1857 рр.) був винайдений перший у Росії відцентровий насос, названий ним «Водогін» (рис. 1.9). Його чотирилопатеве робоче колесо з радіальними лопатками встановлювалося в циліндричний корпус із невеликим радіальним зазором. Як аналог під час розроблення конструкції насоса А. А. Саблуков використовував винайдену і побудовану ним у 1832 році відцентрову повітродувну машину.

Англійський промисловець Джон Гвінеї приблизно в 1850 році поставив на ринок перший двопоточний спіральний насос із закритим робочим колесом і зігнутими лопатями, створений на підставі дослідів Андреаса. Тоді одноступінчасті насоси мали невеликі значення створюваного напору. Кінцевим результатом досліджень було створення першого багатоступінчастого відцентрового насоса, який був запатентований у 1851 році. Цей насос без напрямних зворотних підвідних лопаток був значно поліпшений Осборном Рейнольдсом (1842–1912 рр.), якому був виданий патент на багатоступінчастий відцентровий насос із напрямним апаратом і зворотними підвідними каналами. Від цього насоса Рейнольдса до сучасних багатоступінчастих відцентрових насосів високого тиску зроблений відносно невеликий крок, який полягає, по суті, лише в поліпшенні конструкції деталей і гідравлічних характеристик проточної частини насоса.

Проте всі розглянуті вище насоси, як і конструкції деяких інших винахідників того часу, не набули широкого практичного застосування. Вони виявилися малоефективними з огляду на те, що для них не було необхідного за потужністю і частотою обертання привода. Використовувалася переважно м'язова сила людей і тварин або гідропривод у вигляді водяного

колеса. Поява в кінці XIX ст. парових турбін, електродвигунів, двигунів внутрішнього згоряння сприяло значним конструктивним змінам і вдосконаленню насосів всіх типів.

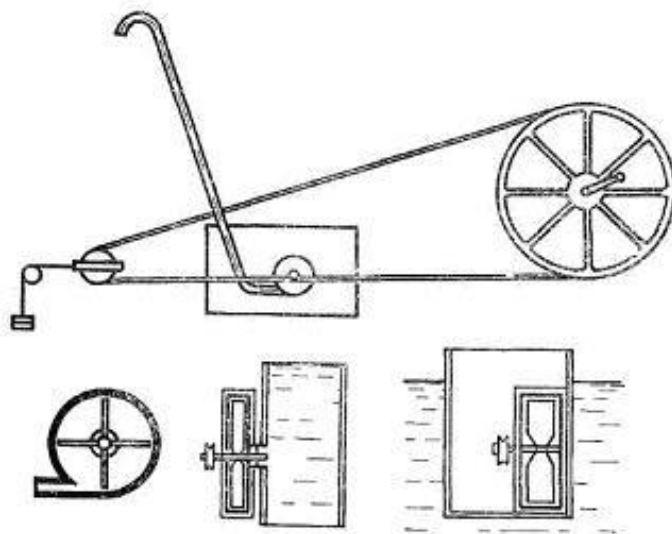


Рисунок 1.9 – Відцентровий насос «Водогін»

У 1899 році російським інженером В. А. Пушечниковим був розроблений дуже прогресивний насос – багатоступінчастий вертикальний відцентровий для підйому води із свердловин глибиною до 250 м. Цей насос був побудований у Парижі на заводі Фарко (в історію насособудування увійшов під назвою «насос Фарко»), мав подачу 200 м³/год, коефіцієнт корисної дії – 0,7 і призначався для водопостачання Москви. Одночасно насособудування удосконалювалося в США, Франції, Німеччині, Швеції тощо.

Розроблення теоретичних основ розрахунку, наявність експериментальної бази на початку XX століття створили сприятливі умови для швидкого розвитку насосо- і компресоробудування. До 30-х років XX століття широкого розповсюдження в галузі водопостачання отримали поршневі насоси. Однак вони мають низку істотних недоліків порівняно з відцентровими та осьовими, які дотепер поступово витіснили поршневі насоси. Початкові етапи розвитку теорії гідравлічних машин (зокрема насосів) пов'язані з ім'ям академіка Петербурзької академії наук Л. Ейлера – автора теорії робочого процесу відцентрового насоса. Ця теорія стала основою розрахунку насосів.

Найважливіший період розвитку теорії гідромашин – початок XX століття, коли відомим російським ученим Н. Є. Жуковським була розроблена теорія підйомної сили крила, а на її основі – методи розрахунку робочих органів лопатевих гідромашин (насосів, повітродувки, турбін). Після того як професором Пфлейдерером була встановлена залежність між кінцевою кількістю лопатей і гідравлічними характеристиками насоса, лопатеві насоси отримали подальший розвиток³¹.

Сучасний період розвитку і вдосконалення насосів характеризується подальшим поглибленням знань особливостей робочого процесу динамічних насосів, пошуків способів підвищення їхніх техніко-економічних показників роботи, уточнення методики розрахунків, використання досягнень матеріалознавства, комп'ютерних технологій, зокрема математичного

³¹ Бурдаков А. А. Центробежные насосы / А. А. Бурдаков. – Ленинград : Госмашметиздат, 1932. – 196 с.

моделювання, появою спроб використовувати вихрову енергопередачу, комбінований робочий процес.

1.2 Насособудування в СРСР і Україні

Після революційних років (1905–1917) та громадянської війни перед молодого державою гостро постали питання розбудови вщент зруйнованої економіки для підйому сільського господарства і життєвого рівня населення. Тому у планах перших п'ятирічок передбачався випереджальний розвиток електроенергетики (побудова теплових і гідравлічних електростанцій) як бази для гірничодобувної галузі, металургії, машинобудування, хімічної промисловості та побутового електропостачання і теплофікації³². Всі ці галузі не могли обійтися без відповідного насосного обладнання – насосів, приводних двигунів, трубопроводів та арматури. Проте в дореволюційній Росії таке насосне обладнання, особливо великої потужності, майже не виготовлялось і закуповувалося в закордонних фірмах.

Зрозуміло, що обрати такий безперспективний спосіб розбудови своєї економіки молода держава не могла. Тип паче, що в країні тоді були вже власні наукові та інженерні кадри, здатні організувати виробництво гідравлічних машин, зокрема насосів, на вітчизняних підприємствах. Насамперед це були вчені відповідних кафедр вищих технічних навчальних закладів, фахівці низки галузевих проектно-конструкторських інститутів і підприємств.

У СРСР вже до 1930 року утворилися три наукові школи насособудування на кафедрі і в лабораторії гідравлічних машин:

– МДТУ ім. М. Е. Баумана під керівництвом професора І. І. Куколевського, що вивчала робочий процес турбін і насосів і розвивала експериментальні методи дослідження насосів;

– Харківського політехнічного інституту під керівництвом академіка Г. Ф. Проскури, яка досліджувала гідромашини, зокрема розроблювала теорію робочого процесу осьових (пропелерних) насосів;

– Ленінградського політехнічного інституту під керівництвом І. М. Вознесенського, що розвивала нові методи розрахунку лопатевих нагнітачів на основі теорії потенційної течії та теорії вихорів.

У ці ж самі роки професор П. М. Каменєв розробив теорію розрахунку струминних апаратів і здійснив їхнє практичне використання з високим ККД. Велике значення в розвитку насособудування та його наукових основ мають ці ВНЗ, а також спеціалізовані проектні інститути – «Союзводоканалниипроєкт», «Гипрокоммунводоканал», «Мосводоканалпроект», «Мосгражданпроект», «Гипроводхоз» та інші.

Розвиток електроенергетики зумовив, зі свого боку, створення вітчизняного енергомашинобудування. До кінця 30-х років ХХ ст. великі реконструйовані (ЛМЗ ім. Сталіна, Кіровський, «Електросила», «Червоний котельник») і заново побудовані (Харківський турбогенераторний, Уральський турбінний тощо) заводи майже повністю задовольняли потреби в парових котлах, турбінах і турбогенераторах. Ще перед війною, у 1940 році, Ленінградський металічний завод ім. Сталіна побудував першу у світі парову турбіну потужністю 100 000 кВт при 3000 об./хв. Однак насосне обладнання для паротурбінних установок постачалося зазвичай як імпорт.

³² Фролов К. В. Наука о машинах – основа машиностроения / К. В. Фролов, А. А. Пархоменко, М. К. Усков. – Москва : Наука, 1987. – 360 с.

Уперше в СРСР було опановано виробництво сталеві кованої арматури для установок високого тиску. У 1933 році в Сумах був виготовлений перший радянський компресор високого тиску, що започаткувало розвиток вітчизняного важкого компресоробудування.

На території Радянського Союзу існувало сім головних організацій із насособудування:

- ВАТ «НВО «Гідромаш»;
- ВАТ «ГМС Насоси» (Лівгідромаш);
- ВАТ «Уралгідромаш»;
- ПАТ «Завод Южгідромаш»;
- ВАТ «Сумський завод «Насосенергомаш»;
- АТ «Молдовагідромаш»;
- ПАТ «Свеський насосний завод».

Коротко розглянемо діяльність кожного з них.

ПАТ «НВО «Гідромаш», м. Москва

У 1931 році на базі гідравлічного відділу ЦАГІ був створений спочатку Гідроенергетичний інститут, потім на його базі – ВНДГідромаш, а з 1991 року до 1996 року – НВО «Гідромаш». Саме тут у 1933 році був збудований перший кавітаційний стенд.

Унаслідок значних науково-дослідницьких і конструкторських робіт були створені деякі гідротурбінні агрегати: радіально-осьові та поворотно-лопатеві гідротурбіни з циліндричним щитом для регулювання витрат води й автоматичним регулятором швидкості прямої дії; спіральні радіально-осьові гідротурбіни з регулюванням витрат води циліндричним напрямним апаратом; автоматичні проточні та котельні регулятори швидкостей.

У 1935–1937 роки вперше у світі радянськими конструкторами під керівництвом М. Г. Кочнева та І. І. Куколевського були створені осьові насоси великої подачі (15 м³/с). Подальші теоретичні та конструктивні розробки дозволили випускати насоси з подачею до 40 і 60 м³/с.

У 50-ті роки ХХ ст. виникла велика потреба у створенні нових рядів насосів для загальносудових систем, а також у розробленні спеціальних конденсатних насосів для вантажних систем танкерів, криголамів та інших спеціальних судів. Наприкінці 50-х років ХХ ст. група конструкторів під керівництвом С. С. Руднева та А. С. Єреміної створили типову конструкцію судового немоноблочного вертикального насоса та моноблочного судового насоса із закріпленням робочого колеса безпосередньо на валу двигуна. Для забезпечення самовсмоктування насосів були проведені великі дослідження під керівництвом Ю. В. Прокоф'єва.

У 1953–1958 роки була створена низка головних циркуляційних відцентрових насосів для установок з виробництва ядерного палива. У створенні цих насосів брали участь В. М. Сергієвський, К. І. Неситов та інші. У 1954–1955 роках під керівництвом І. В. Давидова були створені перші кисневі насоси.

До нових розробок 50-х років ХХ ст. відносять 17 типорозмірів трициліндрових плунжерних насосів типу ХТР. Забезпечення конкурентоспроможності і технічного рівня вимагало зменшення малогабаритних показників завдяки підвищенню частоти обертання. Безперервно підвищуються вимоги до надійності та довговічності обладнання.

Створюється велика номенклатура консольних, заглибних і герметичних хімічних насосів різних типів із подачею 3–1600 м³/год і напором 10–240 м з температурою від –40 °С до +100 °С.

Вдосконалені поворотно-лопатеві осьові насоси з діаметром робочого колеса 1,1 м і 1,85 м для водопостачання ТЕЦ та АЕС. Розроблений також найбільший осьовий насос із діаметром робочого колеса 2,6 м для Каршинського магістрального каналу.

У 1976 році розроблені та поставлені на Нововороженську АЕС чотири діагональних насоси з подачею до 8 м³/с і напором до 23 м. Було створено для ДРЕС 4 типи діагональних насосів марок 130, 170 і 220 ДПВ з подачею від 8 м³/с до 16 м³/с і напором від 16 м до 24 м. Створена конструкція осьових насосів типу ОП та О для рідин із характерними фізико-хімічними властивостями. У ці ж самі роки під керівництвом О. П. Соколова створюються поршневі прямодійні пневматичні насоси.

ПАТ «ГМС Насоси» (Лівгідромаш), м. Лівни, Орловська область

У 1947 році був створений завод із виробництва гідротурбін для невеликих ГЕС, а з 1951 року завод стає самостійним підприємством – «Лівенським насосним заводом». З 1963 року входить до складу ВО об'єднання «Лівгідромаш».

У грудні 1959 року для засвоєння нових марок насосів створюється спеціальне конструкторське бюро насосів (СКБН), яким керував І. Е. Ошеров. У 1965 році на базі СКБН був організований Лівенський філіал ВНДГідромаш, який був спеціалізований на створенні та впровадженні майже всіх об'ємних, лопатевих і вихрових насосів малої потужності.

Починаючи з 1953 року було організовано серійне виробництво відцентрових насосів НД, живильних насосів 2,5 ЦВ, великих лопатевих насосів 2ЛК-20-22 та гідротурбін різних марок потужністю до 1800 кВт. Наприкінці 50-х р. – на початку 60-х років ХХ ст. виробництво малих гідротурбін поступово зменшилося завдяки розв'язанню проблеми електропостачання народного господарства. Завод почав спеціалізуватися на виробництві насосів для оснащення хімічної, нафтової, енергетичної промисловості, сільського господарства.

ВАТ «Уралгідромаш», м. Сисерт, Свердловська область

З 1942 року завод виготовляє гідротурбіни малої та середньої потужностей для ГЕС і був перейменований в Уральський завод гідравлічних машин. За період до 1967 року на заводі було виготовлено близько 1650 гідротурбін загальною потужністю 1500 МВт. Виготовлення перших насосів розпочалось у 1947 році.

ПАТ «Завод Южгідромаш» (м. Бердянськ) заснований у 1884 році, а з 1946 року спеціалізується на виготовленні насосного обладнання для всіх галузей народного господарства.

Підприємство **АТ «Молдовгідромаш»**, Кишинівський завод герметичних насосів (КЗГН) було створено в 1957 році. Він виготовляє та реалізує здебільшого заглиблювані, герметичні електронасоси.

ПАТ «Свеський насосний завод» (м. Свеса, Сумська область) засновано у 1870 році, який із 1926 року почав виробництво відцентрових насосів для хімічної апаратури. Пізніше

спеціалізувалися на створенні та виробництві поршневих живильних насосів для малопотужних парогенераторів, великих поршневих насосів для гідротранспорту тощо.

Розвиток вітчизняного насособудування дав можливість здійснити будівництво дуже великих районних систем водопостачання Криму, Донбасу, Криворіжжя, низки промислових районів Сибіру та Уралу.

Роки після Другої світової війни знаменувалися прискореним науково-технічним прогресом у насособудуванні. Великі темпи розвитку народного господарства СРСР, створення нових галузей промисловості поставили нові, більш складні завдання перед насособудівниками. Необхідно було в найкоротші терміни виконати великий об'єм робіт із розроблення, дослідження та освоєння виробництва широкої номенклатури нових типів і конструкцій насосів, параметри яких значно відрізнялися від параметрів тих, що випускалися раніше. Був здійснений перехід на випуск насосів із високоякісних сталей, що дозволяло збільшити ресурс насосів із тисяч годин до десятків тисяч годин. Це, зі свого боку, сприяло зменшенню витрат на ремонтні роботи, зниженню кількості резервних насосів і зменшенню площ насосних станцій.

На період із 1990 до 1999 роки випали глобальні зміни: розпад СРСР і розвал централізованої системи радянської економіки як єдиного народногосподарського комплексу, що призвело до падіння виробництва в насособудуванні на 75 %. Але, незважаючи на це, кількість виробників насосів збільшилася майже втричі. Насособудівні підприємства розпочали період ринкових відносин і жорсткої конкуренції. Постало питання про долю окремих галузей промисловості, зокрема в Україні, що стала тоді незалежною державою. Великі галузі промисловості України (вугільна, металургійна, хімічна та ін.) змогли самоорганізуватися або організуватися за допомогою держави і стали працювати з відносно стійким режимом роботи. Більш непросто складалася доля машинобудівного комплексу, який за радянських часів в Україні не був так структурований, як загалом у СРСР. Частина підприємств спочатку були самодостатніми і стали самовизначатися («Південмаш», м. Дніпро, «Турбоатом», м. Харків та інші), ще частина підприємств розділилися на малі і середні, нарешті, ще частина – самоліквідувалися або перепрофілювалися. У цих умовах у найбільш складному становищі опинилися підприємства – виробники малопотужних галузей промисловості України. До них належали і підприємства насособудівного профілю, які втратили налагоджені в СРСР ринки поставок і збуту. На період перебудови в СРСР виробляли насосну продукцію близько 100 підприємств із загальним обсягом випуску до 1,5 млн шт./рік.

Водночас в Україні виробляли насоси для цивільних галузей більше ніж 30 підприємств, провідними з яких є Сумський завод «Насосенергомаш» (відцентрові насоси для паливно-енергетичних галузей, водопостачання, меліорації і вакуумні насоси золотникового типу – всього близько 130 типорозмірів із річним випуском близько 10 тис. шт.), Сумське МНВО (відцентрові насоси для АЕС, заводнення нафтових пластів і інших галузей – всього близько 50 типорозмірів із річним випуском близько 1,5 тис. шт.), Бердянський завод «Южгідромаш» (відцентрові насоси для теплових електростанцій, свердловини заглибні типу ЕЦВ – всього близько 50 типорозмірів із річним випуском близько 15 тис. шт.), Свеський насосний завод (здебільшого насоси об'ємного типу – всього близько 80 типорозмірів із річним випуском близько 30 тис. шт.).

Помітним кроком щодо участі держави у створенні насособудівної галузі України стало надання двом організаціям ВНДІАЕН (м. Суми) і ВНДІГідропривод (м. Харків) статусу головних організацій із насособудування. Далі ці дві організації розділили повноваження:

ВНДІАЕН – головна організація з динамічних насосів і ВНДГГідропривод – головна організація з об’ємних насосів.

На початку своєї діяльності ВНДІАЕН у статусі головної організації України з динамічних насосів привернув кафедру гідромашин (сьогодні – прикладної гідроаеромеханіки (ПГМ) СумДУ) як партнера зі спільної діяльності з розвитку насособудівної галузі України. Організаційною формою такої діяльності стала міжгалузєва проблемна науково-дослідна лабораторія гідродинамічних машин і приводів. Вона була створена в 1993 році при СумДУ спільним наказом Мінпромполітики і Міністерства освіти України.

1.3 Насособудування на Сумщині

Історично так склалося, що Сумщина і насамперед її обласний центр – м. Суми стали широко відомі на теренах СРСР і далеко за його межами як місце, де функціонує флагман машинобудування СМНВО, один із потужних хімічних комбінатів з випуску хімічних добрив, на «Селмі» випускають електронні мікроскопи і мас-спектрометри, де група Шосткінських підприємств випускає унікальну хімічну продукцію і де, поряд із цим, виокремлюється потужна насособудівна галузь разом із своїм головним науково-дослідним і проектно-конструкторським інститутом і кафедрою прикладної гідроаеромеханіки Сумського державного університету.

Імідж Сумщини як центру науки і виробництва потужних лопатевих насосів для енергетики, зокрема й атомної, для добування, магістрального транспортування нафти та її подальшого перероблення, для водовідведення вугільних шахт і комплектування насосних станцій зрошувальних систем, промислового та комунального водопостачання і для десятків таких замовників міцно склався у другій половині минулого століття та утримується таким і сьогодні.

Насособудування на Сумщині, як уже зазначалося вище репрезентують ПАТ «Сумське МНВО», де насосне виробництво виділене в окремий потужний напрямок, ПАТ «Сумський завод «Насосенергомаш» та ПАТ «Свєський насосний завод». Окремі типи насосів випускають також Охтирський завод «Нафтопромаш» і Конотопський завод «Червоний металіст». Крім того, після переходу в 90-ті роки ХХ ст. на нові принципи управління промисловістю на Сумщині створилися і функціонують близько 20 малих і середніх підприємств насособудівного профілю. Наукові дослідження, розробку технічної документації та визначення технічної політики в насособудуванні здійснюють фахівці Науково-дослідного і проектно-конструкторського інституту атомного та енергетичного насособудування ВНДІАЕН (м. Суми) та вчені кафедри прикладної гідроаеромеханіки Сумського державного університету разом із низкою інших кафедр. Крім того, саме в цьому університеті готують інженерні кадри для насособудівної галузі, ведуть наукові дослідження та працює аспірантура і спеціалізована рада із захисту дисертацій.

ПАТ Сумський завод «Насосенергомаш»

Історія Сумського насосного заводу налічує декілька етапів. Першим етапом вважається збудований на початку ХХ сторіччя під керівництвом І. С. Погуляйченка завод, що виготовляв і ремонтував сільськогосподарські машини. Підприємство перебувало у вигідному

становищі завдяки своєму близькому розташуванню до залізниці та до населеної околиці міста і було невеликим, у ньому працювало близько 120 осіб³³.

З 1920 року цей завод був названий «Стельмаш – 2», а також був створений завод «Стельмаш – 1», який був розташований біля Харківського мосту. А в 1930 році підприємство «Стельмаш – 2» отримало офіційну назву «Завод сільськогосподарських машин імені Артема». Першим його директором був Петро Олександрович Костюченко. Також цього року було створено фабрично-заводське училище. До 1932 року завод значно зріс, випускав 11 найменувань виробів, на ньому працювало 809 кадрових робітників і 184 службових, зокрема 15 інженерно-технічних працівників.

Водночас поряд із заводом сільськогосподарських машин імені Артема швидкими темпами розвивався Сумський машинобудівний завод імені М. В. Фрунзе. Саме тому завод сільськогосподарських машин імені Артема в 1933 році увійшов до складу машинобудівного заводу і став цехом центрифуг на чолі з начальником Іваном Павловичем Гайдаром.

Швидкими темпами розвивалась енергетика – провідна галузь народного господарства. Поряд із відновленням зруйнованих під час Великої Вітчизняної війни електростанцій відбувалося будівництво нових гідравлічних і теплових електростанцій, які треба було забезпечувати обладнанням.

З 1946 року почався випуск центрифуг типу РНВ-600х360 під гумірування на неіржавіючу сталь і алюміній. А в подальшому виготовлялися центрифуги марок ПМ-3 і УВ-1 для зневоднення вугілля.

Вітчизняна промисловість майже повністю задовольняла потреби в парових котлах, турбінах, генераторах та іншому обладнанні. Але відцентрові насоси для теплових електростанцій доводилося закуповувати за кордоном.

Так, у 1949 році на базі цеху центрифуг було організовано завод із виробництва відцентрових насосів – Сумський насосний завод. Цього ж самого року вже була виготовлена перша продукція – пересувна водопонижувальна установка для Волго-Донського каналу. Ці установки відкачували воду з прилеглих до поверхні землі водоносних шарів. Також було заплановано випуск 57 насосів, зокрема нафтових, бойлерних, артезіанських, живильних і для перекачування чистої води.

Вже в 1950 році колектив заводу збільшився вдвоє і досяг 739 осіб.

У перший період своєї діяльності (до 1952 року) завод виготовляв близько 20 типів насосів середнього та низького тиску. Визначальною подією другої половини 50-х років ХХ ст. для заводу стало виготовлення живильних насосів для енергетичних блоків потужністю 200–300 МВт і теплових електростанцій.

Переломним у діяльності підприємства був 1956 рік, коли почалася організація виробництва насосного обладнання для потужних енергетичних блоків країни та нафтової промисловості.

Сумські насоси були необхідні не лише енергетиці, але і багатьом іншим галузям народного господарства країни. Вже з кінця 1958 року виготовляється перша серія великих живильних насосів. За 10 років (1950–1960 роки) завод опанував виробництво близько ста різних типів насосів. За цей час загальна площа будівель зросла в 6,5 раза, зокрема площа виробничих цехів – у 4,6 раза.

³³ Роки творення. Історичний нарис. – Суми : Слобожанщина, 1999. – 292 с.

Серед виготовлених за цей час машин були відцентрові насоси для перекачування холодних і гарячих нафтопродуктів, насоси для транспортування бензину і керосину магістральними трубопроводами, установки для зниження рівня ґрунтових вод, що широко використовувалися під час будівництва Волго-Донського каналу і Волзької гідроелектро-станції.

Опанували також випуск конденсатних насосів високої всмоктувальної здатності і великих нафтових насосів для магістральних трубопроводів. Важливим етапом для колективу заводу була організація виробництва живильних насосів високого тиску для потужних теплових електростанцій із підвищеними параметрами пари.

Також у 1956 році було створено самостійне госпрозрахункове спеціальне конструкторське бюро живильних насосів (СКБ-ПН). Почалося освоєння вакуумних насосів, що забезпечують залишковий тиск до трьох мікрон ртутного стовпа. У грудні цього ж самого року в цеху № 2 було випущено перший вакуумний насос ВН-6.

Основою для розвитку вакуумного виробництва в СРСР слугувала все більша потреба авіації і космонавтики в техніці для наземних випробувань. Космічні апарати, а отже, і люди, що керували ними, повинні були проходити випробування в умовах різких перепадів тиску та температури. Тому промисловість повинна була їх забезпечити вакуумною технікою. Серійний випуск цих насосів почався в 1957 році в новому корпусі відцентрових насосів.

У відділі головного конструктора була організована група з вакуумних насосів, яку очолив М. О. Нікелін. У подальшому вона була перетворена на бюро. Конструктори групи розробили нові вакуумні насоси ВН-7, ВН-300, ВН-500. Згодом бюро було перетворено на відділ головного конструктора вакуумних насосів.

У країні з кожним роком зростали об'єми видобування нафти, а отже, збільшувалася мережа трубопроводів. Вимагалися трубопроводи все більших діаметрів і більшої протяжності. Почалося будівництво нафтопроводу «Дружба». Для його обладнання були потрібні насоси великої продуктивності. Оскільки в СРСР таких насосів ніхто не випускав, доводилося закупати їх в Італії. Це були насоси типу ОУ8. Спеціальне конструкторське бюро живильних насосів, що функціонувало при заводі, спроектувало насос 16НД 10x1 для нафтопроводів із продуктивністю 2200 м³/год.

У 1969 році завод опанував 10 найменувань мікронасосів, що використовувалися для регенерації відходів продуктів життєдіяльності на орбітальній космічній станції. У розробленні технології виготовлення цих насосів брали участь Л. С. Куно, М. Г. Аверін.

Безперервно збільшується експорт насосів, лише в 1970 році 38 найменувань різних типів насосів були відправлені замовникам у 24 країни світу (Індія, ОАР, Афганістан, Туніс, Іран, Алжир, Сирія, Туреччина, Пакистан, Греція та інші).

28 грудня 1970 року Міністерство хімічного і нафтового машинобудування СРСР видало наказ № 257 «Про організацію науково-виробничого об'єднання енергетичного насособудування (НВО «Насосенергомаш») у місті Суми. Цим наказом Український філіал ВНДІГідромашу був перетворений на Всесоюзний науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут атомного та енергетичного насособудування (ВНДІАЕН).

З 1 січня 1974 року до складу НВО «Насосенергомаш» входили Сумський насосний завод і ВНДІАЕН. Водночас завод та інститут збереглися як самостійні господарські одиниці, що користуються усіма правами юридичної особи.

За чверть століття випуск насосів на заводі збільшився більш ніж у 20 разів, об'єм валової продукції – більш ніж у 15 разів, кількість працівників зросла у 8,2 раза, продуктивність праці – у 3,2 раза. Якісно і кількісно змінилася номенклатура продукції.

У НВО «Насосенергомаш» виконувалися науково-дослідні роботи, конструкторські розробки, виготовлялися дослідні зразки й опановувалося серійне виробництво нових видів насосів, гідромуфт, комплектних насосних агрегатів для магістральних нафтопроводів, устаткування для атомної і теплової енергетики.

Створення насосного обладнання для атомних електростанцій було складною науково-технічною проблемою. Насоси – це один із важливих видів тепломеханічного устаткування АЕС. Тому в атомному насособудуванні послідовно здійснювалось установлення на збільшення одиничних потужностей насосних агрегатів. Зі свого боку збільшення одиничних потужностей і специфічні умови роботи АЕС висували якісно нові, винятково жорсткі вимоги до всіх техніко-економічних показників і насамперед до надійності, довговічності та економічності насосного обладнання. Подальше збільшення одиничних потужностей вже не могло вироблятися завдяки простому механічному нарощуванню габаритів і ваги. Вимагали використання принципово нових конструкторських рішень, застосування нових матеріалів, модернізацію насосів.

До 1976 року в СРСР планувалося введення декількох блоків АЕС потужністю 6–8 мільйонів кВт. З 1976 р. до 1980 р. ці величини потужностей збільшилися в 1,5–2 рази. На початку 80-х років ХХ ст. номенклатура насосів для АЕС вже становила близько 136 штук без урахування комплектації насосів різними електродвигунами та допоміжним устаткуванням. Відцентрові машини конструкції тих часів були здатні перекачувати 10 000–12 000 м³/год рідини, не знижуючи своєї продуктивності за будь-яких кліматичних умов.

До кінця 1989 року сумськими насосами були обладнані всі вітчизняні атомні і теплові електростанції, нафтопромисли і магістральні нафтопроводи, великотоннажні лінії з виробництва мінеральних добрив, інші народногосподарські об'єкти, зокрема блоки для ДРЕС, турбоустановки на ТЕЦ, блоки на АЕС потужністю 440 МВт, 1000 МВт і 1500 МВт, нафтопроводи «Дружба» і «Самотлор-Уфа-Альметевськ», технологічні лінії з виробництва 600 т і 1360 т аміаку за добу.

Потужні живильні насоси, що виготовлялись у Сумах, почали діяти на Придніпровській, Назарівській, Зміївській, Південно-Уральській, Криворізькій і багатьох інших найбільших електростанціях країни.

Перехід до ринкової економіки в 90-ті роки ХХ ст. вимагав радикального відновлення всієї маркетингової діяльності підприємства. Необхідно було не лише виробляти, але і збувати вироблену продукцію, просувати її на ринки Європи, Азії, Близького Сходу.

За ці роки підприємством було опановано більш ніж 90 найменувань насосного обладнання: спеціальні відцентрові типу СК200-75 і ЦНС НЖ 150-20 для охолодження турбогенераторів потужністю 800 тисяч та 1 мільйон кВт, турбомолекулярний вакуумагрегат ТВА-5000, підпірний НМП 3600/2500 для нафтових станцій, відцентровий ЦН-1000-220, вакуумні типу ВН-50 Ф для очищення фтору, конденсатний типу КСВ-1000-95, аварійний живильний типу СПЕ-300-70; СПЕ-1650-75 для блоків 1 мільйон кВт атомної енергетики, особливо серійне виробництво насосів НМ-5000, НМ-7000 для нафтопроводів Західного Сибіру, МСК-1500, МСК-1000 – для кислотного промивання котлів та інші.

У 2005 році ВАТ «Сумський завод «Насосенергомаш» входить до складу інвестиційно-промислової групи «Гідравлічні машини і системи»³⁴. Ця дата була початком нового етапу в розвитку акціонерного товариства. На підприємстві швидко починають зростати об'єми виробництва, завод почав активно укладати контракти на поставку продукції для нових атомних і теплових станцій Китаю, Індії, Ірану та інших країн. Завод вийшов на нові ринки збуту: Японії, Великобританії, Індонезії, США, Туреччини, Ємену, Єгипту. Були розроблені нові насоси, призначені для нафтової промисловості, теплової й атомної енергетики: підпірні (для ВАТ АК «Транснафта»), магістральні (для нафтопроводу «Східний Сибір – Тихий океан»).

ПАТ «ВНДІАЕН»

Як вже було зазначено раніше, наказом Мінмашприбору СРСР від 4 січня 1956 року випуск енергетичного насосного устаткування було покладено на Сумський насосний завод з організацією при ньому конструкторського бюро живильних насосів (СКБ-ПН). Головним інженером бюро було призначено С. С. Серікова.

Головними завданнями новоствореного бюро були:

- проектування (на підставі науково-дослідних, теоретичних робіт ВІГМу) і впровадження нових високоекономічних живильних насосів високого тиску і допоміжного устаткування до них;
- проектування та впровадження великих насосів високого тиску для різних галузей народного господарства;
- модернізація наявних конструкцій живильних насосів із метою підвищення їхньої економічності, зменшення їхньої ваги і собівартості виробів;
- проектування та впровадження у виробництво високопродуктивних технологічних процесів виготовлення насосів високого тиску;

Спочатку бюро складалося з двох відділів – конструкторського та технологічного. Першим завданням було розроблення технічного проекту живильного насосного агрегата ПЕ 320-180/200 для енергоблоків Придніпровської ДРЕС із турбіною ПВК-150 (К-150-130) ХТТЗ. Крім цього, у перший рік свого існування бюро здійснило роботи із закінчення проекту нової випробувальної станції насосів і розробило техно-робочий проект живильного насоса ПЕ 218-45 за ГОСТ 7363-53.

Було розроблено агрегат ПЕ-320-180/200 на частоти обертання 6300 об/хв та 3000 об/хв. У його складі застосовувалася потужна гідродинамічна муфта, що було новизною для вітчизняного насособудування.

До кінця року конструкторський відділ бюро розширився до 33 осіб, а технологічний – до 10.

У зв'язку із збільшенням номенклатури та об'ємів робіт, що виконувалися наприкінці 1957 року, була проведена реорганізація конструкторського відділу. Він був розділений на бюро живильних насосів і мережевих насосів, бюро гідромуфт, нафтових конденсатних насосів, бюро автоматики та КВП, бюро експериментальних робіт. Технологічний відділ мав два сектори: технологічних процесів і конструкторський (розроблення оснащення).

³⁴ ОАО Сумський завод «Насосенергомаш». 60 років. – Суми : Слобожанщина, 2009. – 187 с.

У 1957–1958 роки бюро здійснювало розробку живильних насосних агрегатів ПЕ-320-180/200, ПЕ 430-180/200 для блока 200 МВт із турбіною К200-130 Ленінградського металевого заводу, ПЕ 500-180 для ТЕЦ, а також конденсатних насосів 16КсВ-11х4, 12КсВ-9х4 для тих самих турбоустановок, мережевих насосів 12СД-10х20 і 14СД-10х2.

У 1957 році бюро спільно із Сумським насосним заводом опанували головний зразок живильного насоса ПЕ 218-45, а в 1958 р. виготовляється головний зразок живильного насоса ПЕ 320-180 і бустерний насос 8ПД-9. Головний зразок насоса ПЕ 320-180 був відправлений для проведення промислових випробувань (в експлуатаційних умовах) на першому блоці 150 МВт Придніпровської ДРЕС, насос ПЕ 430-180 – на Південно-Уральську ДРЕС (блок 200 МВт). Також були виготовлені головні зразки конденсатних насосів 16 КсВ-11х4 для блоків 150 і 200 МВт. До 1960 року була проведена модернізація живильних насосів ПЕ 320, ПЕ 500 і ПЕ 430, після якої споживачі почали отримувати надійні машини з високим ККД.

Організаційна структура СКБ-ПН в 1961 році складалася з чотирьох відділів. До складу конструкторського відділу (очолив В. Т. Чупіс) входили: сектор живильних насосів, сектор нафтових та інших насосів, сектор гідромуфт, лабораторія міцності та динаміки, сектор стандартизації та нормалізації. А також відділ автоматики та КВП і відділ технологічності (начальники відповідно І. П. Ліщинський М. П. Дорошенко). У квітні був організований четвертий, експериментальний відділ, начальником якого призначається В. А. Марцинковський. У його склад увійшли: лабораторія гідромашин, лабораторія міцності та динаміки, виробнича і слюсарно-складальна дільниці.

Також на початку 60-х років ХХ ст. в конденсатних насосах для блоків 200 і 300 МВт для покращання кавітаційних характеристик почали застосовувати передувімкнені колеса.

У грудні 1963 року для виготовлення надійних і високоекономічних живильних насосів високого та надвисокого тисків, а також конденсатних насосів із великими подачами на вході в насос, унаслідок цього було ухвалене рішення про створення в місті Суми експериментально-випробувального комплексу насособудування. Фінансування його побудови взяло на себе Міністерство електростанцій, а у проектуванні були задіяні Харківський відділ інституту «Теплоелектропроект» і Київський інститут «Гіпрохіммаш».

У середині 60-х років ХХ ст. були розроблені та створені деякі вироби для теплової енергетики та нафтової промисловості, зокрема:

- пускорезервний живильний електронасосний агрегат ПЕ 600-300 та бустерний ПД 650-160 для енергоблоків потужністю 300 МВт і турбоустановок Т 250-240;

- турбонасосний агрегат ПТ 450-385 для випробувально-промислового блоку Каширської ДРЕС;

- мережеві насоси на подачу 2500 і 5000 м³/год для теплопостачання великих міст і промислових центрів;

- відцентрові насоси типу МСК на подачу 1000 та 1500 м³/год для кислотного промивання котлів теплоелектростанцій;

- уніфікована група насосних агрегатів типу ЦНС на подачу 150–180 м³/год і напором від 900 м до 1900 м із закачування води в продуктивні пласти для підтримання пластового тиску з метою інтенсифікації добування нафти. Лише за перші п'ять років масового застосування цих виробів додатковий видобуток нафти досяг майже 400 мільйонів тон, і тому зникла необхідність у бурінні 17 тисяч свердловин.

Водночас СКБ-ПН розміщується на виробничих площах у загальному обсязі 379 м², що орендують у Сумського насосного заводу. На початку 1964 року кількість персоналу бюро вже становила 148 осіб.

Розроблюється проект гідромуфти МГ-3000 потужністю 3000 кВт для регулювання насосів потужністю 2000–3000 кВт. Її застосування для трьох насосів блоку 150–200 МВт давало суттєву економію. Також розроблявся проект живильного насосного агрегата ПЕ 580-185/200 без гідромуфти – для блоків із постійним режимом роботи. Крім того, створюється технічний проект насосної стандової установки Воронежського механічного заводу з двома насосним агрегатами ЦН 250-400 з тиском 400 кг/см².

Активно виконувалися роботи із створення систем і засобів комплексної автоматизації. Було створено проекти автоматичного керування, контролю, захисту та сигналізації магістрального нафтового насосного агрегата подачею 4000 м³/год із газотурбінним приводом і вільно-поршневими газогенераторами (було виконано для Луганського тепловозобудівного заводу), живильних і відцентрових насосів типу: ПЕ 720-185/200, ПЕ 380-185/200, СПЕ 380-180 та СПЕ 270-140.

Зважаючи на збільшення номенклатури проектного насосного обладнання і необхідність встановлення більш тісних зв'язків із головним інститутом галузі, СКБ-ПН було перетворено на Український філіал інституту «ВНДГідромаш» («УкрВНДГідромаш»).

Було виконано багато робіт із надання технічної допомоги для електростанцій і насособудівних заводів, зокрема налагодження живильних насосних агрегатів ПЕ 580-185/200 на Невинномиській ДРЕС, ПЕ 600-300 на Криворізькій і Троїцькій ДРЕС; виготовлення робочих органів першого ступеня (робочих коліс і передувімкнених гвинтів) для конденсатних насосів 12КсВ-9х4, 16КсВ-10х5 і 16КсВ-11х4 Придніпровської, Березовської, Зміївської, Черепетської теплоелектростанцій; виготовлення 5 комплектів торцевих ущільнень нафтових магістральних насосів 24НД-14х1 для нафтоперекачувальних станцій нафтопроводу «Дружба»; створення ремонтних креслень 15 імпорتنих кислотних насосів, встановлених у цеху двоокису титану Сумського хімічного комбінату.

У 60–70-х роках ХХ ст. колектив УкрВНДГідромашу поповнився висококваліфікованими спеціалістами – випускниками провідних ВЗН. Інститут було залучено до виконання робіт із проектування та опанування насосного обладнання для атомних електростанцій з енергоблоками одиничною потужністю 440 тис. і 1 млн кВт.

Будівництво АЕС, що розгорнулося на початку 70-х років ХХ ст., зумовило внесення коректив як у профіль, так і статус інституту, а отже, 23 жовтня 1970 року на базі УкрВНДГідромашу утворюється Всесоюзний науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут атомного та енергетичного насособудування (ВНДІАЕН). Влітку 1974 року інститут переміщується на нову територію, де розташовуються корпуси – інженерно-лабораторний, адміністративний, головний виробничий, допоміжний.

Першими виробами, які проходили на стендах ВНДІАЕН за натурних параметрів довготривалі енергетичні та ресурсні випробування, були живильні насоси СПЕ 1650-75 та ПЕА 250-75, а також конденсатні насоси КсВА 1500-120 і ЦН 1500-240 першого і другого підйомів для головного блока Ленінградської АЕС з реактором РБМК-1000 одиничної потужності 1 млн кВт.

У 70-ті роки ХХ ст. в інституті розгорнулися роботи з переводу нафтових магістральних насосів типу НМ із подачею від 1250–12500 м³/год на виготовлення корпусів у сталевому виконанні для трубопроводів, прокладених у суворих умовах Західного Сибіру.

Крім таких машин, для трубопровідного транспорту нафти і нафтопродуктів було також розроблено та опановано підпірні насоси типу НПВ на подачу 150 м³/год, 300 м³/год, 600 м³/год, 1250 м³/год, 2500 м³/год, 3500 м³/год та 5000 м³/год і магістральні насоси в секційному виконанні на подачу від 125 м³/год до 710 м³/год.

Унаслідок експериментальних досліджень були створені торцеві ущільнення, застосування яких дозволяє забезпечити потрібну герметичність, але і суттєво збільшити надійність насосів і знизити експлуатаційні витрати. Створений принципово новий тип механічних ущільнень торцевого типу з імпульсним підживленням змащувального шару та автоматичним регулюванням розміру зазора.

У 1986 році було створено велике об'єднання НВО «Насосенергомаш» у складі: ВНДІАЕН, заводи – «Центроліт», насосний (м. Суми), насосний (м. Свеса), «Южгідромаш» (м. Бердянськ). Але це об'єднання виявилось складним для керування та неефективним, тому розпалося.

Для ВНДІАЕН це об'єднання спонукало до чергової модернізації серійної номенклатури насосного заводу. Протягом року здійснювалася робота зі зміни структур об'єднання, зміни їхніх функцій, реорганізації ВТД і ВГК. Ухвалюється рішення про створення на ВНДІАЕН відділу серійного виробництва, а ГКП із серійного виробництва призначається О. Ф. Лясін, який до цього був заступником директора ВНДІАЕН.

Тоді ж розпочалася чергова кампанія з покращання підготовки кваліфікованих кадрів – організація на підприємствах філіалів кафедр. На базі ВНДІАЕН в НВО «Насосенергомаш» у 1988 році створюється філіал кафедри гідромашин СФ ХПІ (завідувач філіалу – канд. техн. наук О. І. Швіндін). Робота філіалу координувалася і велася в тісному співробітництві із завідувачем кафедри гідромашин А. О. Євтушенком, викладачами та асистентами (Н. К. Ржебаєва, В. Г. Неня, О. Г. Гусак). За 16-річну діяльність філіал сприяв формуванню і випуску більш ніж 300 спеціалістів-насосників.

У цей самий період було розроблено і виготовлено зразок головного циркуляційного насоса ГЦН-20000 продуктивністю 20 000 м³/год, частотою обертання 1500 об./хв та температурою до 300° С для першого контуру блока АЕС з реактором ВВЭР-1000 одиничною потужністю 1 млн кВт.

Крім насосів для паливно-енергетичного комплексу, створювалися також вироби для великотоннажних технологічних ліній із виробництва мінеральних добрив, газохімічних комплексів, суднобудування. Одночасно проводилися роботи із стандартизації та уніфікації насосного обладнання, зокрема такі як:

- державні стандарти на живильні і конденсатні для атомної і теплової енергетики, мережеві, нафтові магістральні, а також багатоступінчасті секційні насоси;
- міждержавний (у межах СНД) стандарт на методи випробувань динамічних насосів (згідно з ТК-245 РФ);
- галузевий стандарт України на вимоги безпеки до відцентрових насосів для подачі нафти та нафтопродуктів.

На базі ВНДІАЕН створений Технічний комітет із стандартизації ТК-21 «Насоси динамічні та об'ємні».

За 1986–1989 роки створюються відцентрові насоси типу ЦНС з корозійностійким виконанням для систем підтримання пластового тиску, пускорезервного насосного агрегата ПЕ 600-300-4 для теплових блоків 300МВт, специфічних насосних агрегатів типу «насос – мотор – турбіна» для споруджуваних очисних комплексів СРСР, насосний агрегат АЦНУ 63-

1000 для закачування зрідженого двоокису вуглецю в нафтові пласти з першою автоматикою на мікропроцесорній техніці.

Вперше у світовій практиці насособудування на ВНДІАЕН були створені потужні живильні і конденсатні насоси з підвищеною всмоктувальною здатністю на основі перших ступенів шнеко-відцентрового типу, що захищені авторськими свідоцтвами. Це дало можливість підвищити частоту обертання, а отже, зменшити питому металомісткість насосів, а також забезпечило значне скорочення капітальних затрат під час спорудженні енергетичних блоків (завдяки зниженню висотної відмітки розташування деаератора і більш високої відмітки рівня фундаментної плити станції і конденсатних насосів).

Спеціалісти інституту брали участь у монтажі і проведенні пуско-налагоджувальних робіт на багатьох побудованих у закордонних країнах об'єктах енергетики: Болгарія – ТЕЦ «Маріца-Схід» і АЕС «Козлодуй», Угорщина – АЕС «Пакш», Німеччина – ТЕЦ «Боксберг» і АЕС «Норд», Куба – ТЕЦ «Маріель» та «Ренте», Фінляндія – АЕС «Ловійса».

Внаслідок розпаду СРСР у 1991 році відповідно до Закону України «Про підприємства в Українській республіці» в інституті створюють мале підприємство – Науково-технічний центр атомного та енергетичного насособудування (НТЦАЕН), яке в 1994 році припинило свою діяльність.

У 1992 році ВНДІАЕН отримав статус головної організації України з насособудування і запропонував концепцію розвитку галузі на перспективу, у межах реалізації якої було розроблено близько 50 найменувань насосів. Крім того, розроблено та впроваджено в різних галузях економіки такі вироби:

- турбонасос ПТА 3800-20-1 із суцільнолитим корпусом для енергоблоків АЕС з реактором ВВЭР-1000 одиничною потужністю 1 млн кВт;

- велика група насосного обладнання для Тяньваньської АЕС (Китай), АЕС «Куданкулам» (Індія), АЕС «Бушер» (Іран), АЕС «Чашма» (Пакистан), Ростовської АЕС (Росія) і ТЕС «Сіпат» (Індія);

- насосні агрегати для газотурбінної електростанції комбінованого циклу на Алчевському металургійному комбінаті;

- насоси типу АНЦНЕ на подачу 800 м³/год з напорами від 90 м до 150 м для обладнання Ванкорського нафтового родовища;

- живильний насосний агрегат ПЕ 710-280 для примусової багаторазової циркуляції води в системі охолодження конверторних газів на комбінаті «Криворіжсталь»;

- насосні агрегати АД 12500-10 м і АД 9300-32 м для систем зрошення в Туркменії.

Наприкінці 1992 року головним інженером інституту призначається Е. Є. Ржебаєв, а 1993 року він обирається директором ВНДІАЕН.

Для підвищення ефективності роботи інституту в 1993 році у структуру його управління вносяться такі корективи:

- лабораторія випробувань № 20 перетворена на випробувальний центр (ВЦ);

- на базі відділів № 1 та № 21 утворено відділ живильних і високонапірних насосів № 1, зав. – В. К. Єлін;

- на основі відділів № 3 і № 19 та лабораторії № 24 утворено відділ нафтових і низьконапірних насосів № 3, зав. – А. О. Гусєв;

- на основі лабораторії динаміки відділу № 7 і сектору надійності і якості відділу № 5 утворено відділ динаміки, діагностики і якості № 5, зав. – А. Д. Цема;

- до відділу № 8 приєднано сектор нормоконтролю;
- організована група маркетингу.

У 1993 році ВНДІАЕН зареєстровано в системах УкрСЕПРО та в Системі ГОСТ РФ як випробувальна лабораторія, що входить у сертифікаційний комплекс Держстандарту РФ – СЦ «Наст хол».

У 1998 році директором ВНДІАЕН став В. О. Ступін, а у 2001 році – І. Б. Твердохліб.

У ці ж самі роки в інституті була розроблена та впроваджена система керування якістю проектування і виготовлення насосів, що відповідає вимогам стандарту ISO 9001:2000, що затверджено Сертифікатом відповідності, виданим Міжнародним бюро з якості Bureau Veritas Quality International (орган акредитації TGA, Німеччина).

У 2000 році в процесі приватизації ВНДІАЕН було перетворено на відкрите акціонерне товариство «Науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут атомного та енергетичного насособудування» (ВАТ «ВНДІАЕН»).

Інститут внесено до каталогу «100 кращих підприємств України», а також у збірник «Київський літопис XXI століття. Визначні імена та підприємства України».

За роки існування ВНДІАЕН за розробленими в ньому проектами було створено і опановано близько 550 найменувань насосів, отримано більше ніж 150 авторських свідоцтв і патентів на виготовлення, підготовані і захищені близько 20 докторських та кандидатських дисертацій. Саме завдяки ВНДІАЕН м. Суми стало одним із визнаних світових центрів насособудування.

ПАТ «СМНПО»

У 1895 році Сумська міська рада подала прохання імператору про дозвіл діяльності Бельгійського анонімного товариства «Сумські машинобудівельні майстерні». Указ про початок його діяльності імператор Микола II видав 15 листопада 1896 р. Товариство складалося з 28 акціонерів, 7 із яких були членами правління. Спостереження над його діяльністю покладалися на колегію комісарів, що складалася з 3 осіб³⁵.

Першим директором «Сумських машинобудівельних майстерень» Бельгійського акціонерного товариства був призначений спеціаліст із будівництва цукрових заводів, інженер Бероунський Альбрехт Йосифович. Для роботи на підприємстві з Бельгії, Франції, Чехії та Польщі були запрошені провідні спеціалісти і кваліфіковані робітники, більшість із яких потім працювала на підприємстві аж до початку Другої світової війни.

Головним завданням заводу було виготовлення загалом машин, а особливо парових, обладнання для цукрових заводів, замовлень для залізниці, лиття із заліза, сталі, міді та інших металів. Основний капітал на початку складався з 1 млн 620 тис. франків і був розділений на 3240 акцій, кожна по 500 франків, або 405 тис. рублів золотом. Оскільки переважав капітал із боку Бельгії, то й підприємство вважалося бельгійським АТ.

Будівельні роботи були розпочаті в лютому 1896 року, а вже до кінця року головні цехи заводу – ливарний, механічний, ковальський, модельний, машинне відділення, парова – були побудовані. Тоді ж були здані в експлуатацію будівля головної контори, казарма для учнів, бараки для робочих і три житлові будинки для службовців.

³⁵ Черняк В. Г. На шаг опережая время. К 110-й годовщине со дня основания ОАО «Сумское МНПО им. М. В. Фрунзе»: Краткий исторический очерк / В. Г. Черняк, О. Ф. Нестеренко, Л. Г. Старовойтова. – Сумы : Мрія-1, 2006. – 280 с.

У 1897 році анонімне товариство «Сумські машинобудівні майстерні» випустило першу продукцію. Тоді на підприємстві працювало 350 осіб.

На початку ХХ століття розширюється номенклатура продукції, що випускається. Почалося виготовлення випарних апаратів, бурякових різок, фільтр-пресів, водяних насосів для цукрової промисловості, семафорів і стрілок для залізної дороги. У цей самий період підприємство почало освоювати випуск перших центрифуг для цукрових заводів. Це були машини клепаної конструкції з ручним вивантаженням осаду.

У 1908 році на Сумському машинобудівному заводі була виготовлена перша вітчизняна парова машина потужністю 300 кінських сил. Вона стала гарною рекламою, і в підприємства з'явилася достатня кількість замовлень.

З 1912 року змінюється назва акціонерного товариства на анонімне товариство «Сумські машинобудівельні заводи». До цього часу на підприємстві працює понад 700 осіб.

Починаючи з 1914 року, з початком Першої світової війни, діяльність заводу була орієнтована лише на випуск військової продукції. Після 1917 року деякий час підприємство і зовсім не функціонувало. У 1922 році в Сумах створюється так зване «Металооб'єднання». У складі об'єднання завод відновлює роботу і має назву «Перший державний машинобудівельний завод ім. Х. Г. Раковського». У листопаді того самого року на заводі була створена школа фабрично-заводського учнівства, де набули навичок спеціальностей машинобудівного профілю тисячі робітників.

До кінця 1922 р. – початку 1923 року становище на підприємстві було ще вкрай важким. Не вистачало кваліфікованих робітників, сировини. Основні цехи майже не діяли, оскільки не вистачало коштів на закупівлю матеріалів. Зважаючи на важке становище на заводі, радянська влада взяла під свою опіку всі процеси, що відбувалися на підприємстві. Заводу було передана будівля колишнього Дворянського зібрання, де розмістився «Клуб металістів».

До 1925 року підприємство випускало цілу низку обладнання: насоси для забруднених і густих рідин, кислотостійкі насоси; був освоєний випуск аміачних і вуглекислотних компресорів, газових насосів, повітряних двоступінчастих компресорів середнього тиску, суперцентрифуг на 15,5 оборотів за хвилину, турбоповітродувок; вперше на заводі застосовується електрозварювання хімічної апаратури з неіржавіючої сталі.

У 1926 році підприємство виробило продукції в сумі 1655 тис. карбованців за цінами 1913 року, що становило 4,2 % всієї продукції машинобудування України. Наступного року відбувалася подальша робота з реконструкції і будівництва нових виробничих потужностей підприємства, насамперед потужного трипролітного котельного цеху, силової станції, заводської лабораторії. У цей період на підприємстві працювало близько тисячі осіб, випуск продукції порівняно з 1913 роком збільшився в 1,6 раза. У 1928 році «Першому державному машинобудівному заводу» було присвоєно ім'я Михайла Васильовича Фрунзе.

Значною подією для машинобудівельного заводу кінця 20-х років ХХ ст. стало освоєння методу електродугового зварювання. Як свідчать документи, у 1928–1929 господарських роках виробництво хімапаратури посідало друге місце в номенклатурі виробленої продукції. Завод ім. М. В. Фрунзе було визнано одним із найважливіших об'єктів господарювання, а випуск валової продукції доведений до 14 млн карбованців.

У 1930 році в країні була затверджена програма розвитку важкої індустрії. На заводі також був узятий курс на технічне вдосконалення виробництва і впровадження нових технологічних процесів. З цією метою були введені в експлуатацію нові чавуноливарний

і компресорний цехи, трохи пізніше – інструментальний і насосно-компресорний. Отже, на початку 30-х років ХХ ст. керівництво важкого машинобудування країни визначило остаточний план профілю заводу як підприємства хімічного і нафтового машинобудування. Фахівці опанували нові види теплообмінників, гідравлічних насосів високого тиску, повітряних і холодильних компресорів для отримання синтезу аміаку. Вже в 1932 році випуск хімічного обладнання становив 75 % всієї продукції.

У 1932 році завод отримав дуже важливе завдання: виготовити для споруджуваного гіганта хімічної індустрії Березніківського хімкомбінату два важких надпотужних поршне-вих компресори для синтезу аміаку, на тиск 300 атмосфер, продуктивністю 10 000 м³ газу на годину. Освоєння нових видів продукції змушувало керівництво заводу впроваджувати нові технології. Так, наприклад, з 1935 року почалася довголітня співпраця підприємства з Інститутом електрозварювання ім. Є. О. Патона. Унаслідок цього у 30-ті роки ХХ ст. були опановані методи зварювання нікелевих і хромонікелевих сталей, розпочато виробництво зварної апаратури для кислотовмісних і корозійних середовищ. А в 1940 році Сумський машинобудівний завод ім. М. В. Фрунзе увійшов до 20 найбільших підприємств СРСР, вперше впроваджено процеси автоматичного зварювання під флюсом. Був виготовлений унікальний надпотужний компресор для синтезу аміаку на тиск 850 атмосфер.

У 1948–1950 роках підприємство зробило великий внесок у створення атомної галузі країни. На машинобудівельному заводі ім. М. В. Фрунзе виготовлялися перші апарати для ядерної енергетики. До того часу підприємство мало потужну виробничу базу, кваліфікований склад ІТП, робітників і службовців, які розв'язували складні завдання із зміцнення вітчизняного промислового потенціалу.

1950–1965 роки – це період, коли неухильно підвищувався виробничий потенціал заводу, вдосконалювалися і переоснащувалися багато цехів, створювалися проекти нових машин і апаратів. Поряд із розвитком хімічного апаратобудування на перші рубежі виходить таке складне і найбільш необхідне в ті роки обладнання, як важкі компресори з великою продуктивністю і високим тиском. Цього вимагали створювані виробництва азотних мінеральних добрив, пластмас, процеси глибокої переробки нафти тощо.

У 1950 році був створений потужний (дворядний) газовий компресор марки ПГ-166/320 для стиснення азотоводневої суміші у виробництві мінеральних добрив на тиск 320 атм. продуктивністю 10 000 м³ на годину. Найбільший внесок у створення машини зробили: провідний конструктор М. М. Миронов, головний технолог В. А. Карбовничий і головний інженер заводу П. Т. Гончаренко. Такі компресори мали великий попит у Болгарії, Польщі, Китаї. Для забезпечення випуску перших важких компресорів опановано технологію відливання великогабаритних деталей, таких як циліндр першого ступеня компресора вагою більше ніж 28 тонн.

У 1952 році робітники заводу виготовили новий, ще більш потужний компресор ПГ-266/320 продуктивністю 16 000 м³/год. Ця машина стала основною у всіх створюваних виробництвах азотних мінеральних добрив. Перші компресори такого типу були поставлені на Північно-Донецький хімкомбінат, а також до Болгарії і в Китай.

У механічному цеху № 2 (зараз механоскладальний цех № 6) організовується виготовлення компресорів середньої продуктивності. Успішно опановують установки для стиснення повітря в кисневих виробництвах і циркуляційні поршневі насоси для отримання азотних добрив. Тут також налагодили виготовлення промислового вертикального компресора

для стиснення повітря, блоків осушування повітря. Усього в цей період на заводі опанували випуск 20 найменувань компресорів.

Створення нових компресорів у 50-ті роки ХХ ст. не лише дозволило відмовитися від імпорту такого зарубіжного обладнання, але й дало можливість заводу самому вийти на міжнародний ринок. Починаючи з 1950 року встановлюються тісні виробничі і технічні зв'язки з багатьма країнами Європи, Азії та Африки. Сумчани постачають їм компресори, різні види хімічного обладнання насосів. Особливо тісна співпраця налагоджується з країнами РЕВ. Завод надав велику допомогу в становленні та розвитку азотно-тукових і нафтохімічних виробництв у Болгарії, Румунії, Польщі, Китаї, коксохімічних виробництв в Індії, Кореї, В'єтнамі, хімічної промисловості в Чехословаччині, Угорщині, Румунії.

Ливарники освоюють унікальні, складні відливання для опозитних компресорів, такі як картер і циліндр першого ступеня, вагою близько 30 тонн із високоміцного чавуну. Такі відливання не мали аналогів у вітчизняному машинобудуванні.

На заводі в ці роки освоїли випуск водокільцевих і ротаційних вакуум-насосів і компресорів великої продуктивності. Такий вид обладнання користувався попитом у споживачів металургійної, вугільної, гірничорудної, целюлозно-паперової, цукрової та інших галузей промисловості. У подальшому випускалися водокільцеві насоси та компресори з титану і корозійностійких сталей для агресивних середовищ у хімічній промисловості.

У 1950 році на заводі вперше у країні освоюється промислове напівавтоматичне зварювання під шаром флюсу. Цей метод став черговим кроком у витісненні ручного зварювання. Виготовляються основні елементи стартових комплексів для космодрому Байконур, системи заправки і складні барокамери.

У 1960 році також вперше в країні на машинобудівельному заводі конструкторським бюро поршневих компресорів на чолі з І. В. Симоновським була розроблена принципово нова, більш прогресивна, якісна й економічна конструкція важких поршневих компресорів в опозитному виконанні. Це дозволило значно зменшити металомісткість і габарити машин, підвищити їхню якість, надійність і довговічність роботи. Перший вітчизняний опозитний компресор 50ТГ-130/200 був виготовлений на заводі і відвантажений Руставському хімкомбінату.

Бурхливий розвиток газодобувної галузі, інтенсивна газифікація промисловості і побуту, а також наявність можливості експорту газу вимагали будівництва магістральних газопроводів і газоперекачувальних агрегатів для компресорних станцій. Перші газоперекачувальні агрегати ГПА-Ц-6, 3/56-1, 44 виготовлені в 1973 році з робочої документації, розробленої конструкторською групою під керівництвом І. В. Симоновського. Всього за період 1973–1975 років було випущено 64 агрегати. Паралельно з освоєнням виробництва ГПА компресорним заводом вперше у вітчизняному машинобудуванні були виготовлені два компресори 4М40-1, 12/250-2500 для виробництва поліетилену високого тиску на Новополицькому хімкомбінаті.

Цього часу було запропоновано об'єднати зусилля двох заводів із єдиною організаційною структурою, створивши у такий спосіб, виробниче об'єднання. Незабаром вийшов наказ міністра про створення виробничого об'єднання у складі заводу ім. М. В. Фрунзе і заводу важких компресорів із призначенням на посаду генерального директора В. М. Лук'яненка, а об'єднанню було присвоєно назву «Сумське виробниче об'єднання ім. М. В. Фрунзе».

На основі конструкторського відділу відцентрових компресорів була створена Сумська філія спеціального конструкторського бюро із створення повітряних і газових турбохолодильних машин (м. Москва) – СФ СКБ ТХМ, начальником якого був призначений Ю. Ф. Комлик.

У липні 1980 року до складу об'єднання передано споруджуваний завод атомного енергетичного насособудування із завданням освоїти випуск головних циркуляційних насосів ГЦН-195 для атомних електростанцій на період 1981–1985 рр. Вже в 1981 році виготовлено перший головний циркуляційний насос ГЦН-195 (потужністю 8 000 кВт, подачею 20 000 м³/год теплоносія для реактора енергоблоку ВВЕР-1000; масою агрегата 140 тонн), а з 1982 року розпочато їхнє серійне виготовлення.

За період 1976–1980 років забезпечене постачання замовникам обладнання за номенклатурою Держплану СРСР: 320 газоперекачувальних агрегатів ГПА-Ц-6,3, 178 важких компресорів, 5260 центрифуг, 6203 насоси, хімапаратури і спецвиробів для оборонної та космічної галузей, 77 комплектних технологічних ліній із виробництва мінеральних добрив, етилену і гелію. Крім цього, були введені в експлуатацію 4 стенди блоку натурних випробувань газоперекачувальних агрегатів типу ГПА-Ц-6,3 і перший стенд натурних випробувань головних циркуляційних насосів ГЦН-195, виготовлено понад 1000 тонн нестандартного обладнання.

У 1983 році завершено постачання газоперекачувальних агрегатів для 7 пускових компресорних станцій газопроводу «Уренгой – Помари – Ужгород».

Необхідно було освоїти виробництво труб діаметром 1400 мм у холодостійкому виконанні, потужної будівельної техніки, газоперекачувальних агрегатів потужністю 16–25 кВт, приладів і автоматичних систем управління, металопрокату і різних комплектувальних виробів, необхідних для обладнання компресорних станцій. Зі збільшенням випуску агрегатів типу ГПА-Ц-6,3 завод повинен був освоїти й організувати серійний випуск нового агрегата потужністю 16 МВт, з тиском від 56–100 атмосфер. Всього за цей період необхідно було поставити 396 агрегатів типу ГПА-Ц-6,3 і 193 агрегати типу ГПА-Ц-16. За 1981–1985 роки на підприємстві ввели в експлуатацію 105,9 тис. м² виробничих площ. На компресорному виробництві завершили спорудження єдиного комплексу цехів № 2, № 14, № 16 із випуску ГПА.

24 травня 1985 р. був виданий наказ «Про організацію Сумського машинобудівного науково-виробничого об'єднання імені М. В. Фрунзе». Воно було створено на основі Сумського виробничого об'єднання ім. М. В. Фрунзе і ВНДІкомпресормашу, до складу якого дещо раніше увійшов СФ СКБ ТХМ.

Агрегати, що були виготовлені у 80-ті роки ХХ ст. в об'єднанні, надійно працюють на численних компресорних станціях магістральних газопроводів Росії, Туркменістану, Узбекистану, інших країн СНД, у Болгарії, Польщі. Крім цього, випускалося багато іншого обладнання: поршневі компресорів, компресорних станцій, наприклад, для великотоннажних виробництв аміаку, для стиснення водню, азоту, освоюється випуск компресорів малих баз і багато іншого.

Для випуску такого складного обладнання відповідно потрібна була більш сучасна база верстатів, інструментів і кваліфікованих кадрів. Якщо в 1972 році в об'єднанні було два верстати з ЧПУ, то до 1985 року їхня кількість зросла до 130 одиниць. Почався випуск багатосекційних, високонапірних відцентрових насосів типу ЦНС. Пізніше була освоєна нова модифікація насоса типу ЦНС в кислотостійкому виконанні. На основі насосів типу

ЦНС в об'єднанні розробили конструкції комплектних блочних насосних станцій у складі насосних блоків, блоків розподілу, автоматики й управління. Насоси, виготовлені в об'єднанні, працюють в Ірані, Сирії, Аргентині, Пакистані та інших країнах. Їхнє виготовлення було організовано в цехах № 5 і № 15 на основі прогресивних технологій.

У цеху № 22 організували ділянку верстатів із ЧПУ, впровадили верстати для глибокого свердління довжиною до двох метрів, був задіяний обробний центр моделі 50ДВС, що забезпечує виконання повного чистового оброблення корпусу насоса ГНЦ-195М і таких самих великотоннажних деталей.

Було облаштовано новітнім обладнанням котельно-зварювальний цех № 23. У ньому встановили і впровадили комплексно-механізовані переналаджувальні установки фірми «Deuma» (ФРН) і «Breda» (Італія), оснащені засобами автоматичного зварювання під шаром флюсу, у середовищі захисних газів, наплавлення звичайними і стрічковими електродами в комплекті з маніпуляторами вантажопідйомністю від 10 тонн до 100 тонн. Ці установки дозволили автоматизувати процеси приварювання товстостінних патрубків до корпусів головних циркуляційних насосів атомних електростанцій, зварювання цілої низки велико-вагових вузлів інших насосів, а також газоперекачувальних агрегатів і хімічного устаткування. Організована також спеціалізована ділянка з первинного оброблення ливарних дефектів корпусів-равликів насосів ГЦН із подальшим контролем ультразвукової та кольорової дефектоскопії.

У цеху № 24 (нині цех № 22) були створено та впроваджено стенди для збирання виймальних частин головних циркуляційних насосів і насосів II контуру, стенди гідровипробувань та унікальні стенди випробувальної станції для проведення натурних випробувань насосів на робочі параметри тиску і температури.

Під час механічного оброблення головного вала в цеху № 5 технологи застосували методи пластичної деформації, інструмент із гексаніту, алмазне шліфування. Створили спеціалізовану ділянку, оснащену трьома електрошлаковими печами, розрахованими на виготовлення деталей вагою до 2,5 тонни і 0,5 тонни і двома індукційними печами для виплавлення металу електродів, що сплавляються. Усе це дозволило забезпечити річну економію металу до 400 тонн і значно знизити працевитрати на механічне оброблення.

За 5 років було випущено: газоперекачувальних агрегатів – 606 одиниць, зокрема типу ГПА-Ц-16 – 210 одиниць, з них 17 агрегатів – понад план; головних циркуляційних насосів ГЦН-195 – 42 комплекти; обладнання комплектних технологічних ліній із виробництва мінеральних добрив, етилену і гелію – 51 комплект; важких компресорів – 159 штук; насосів різних типів – 9624 штуки; центрифуг різних типів – 5744 штуки; введені в експлуатацію стенди № 2 та № 3 для натурних випробувань ГЦН-195; введена в експлуатацію випробувальна станція для натурних випробувань агрегатів типу ГПА-Ц-16 і кульової арматури.

У 1986 році генеральним директором об'єднання став О. М. Дьяченко, головним інженером – А. А. Воронко. Працюючи в умовах самофінансування (1986–1990 роки), об'єднання значно поліпшило результати своєї виробничо-господарської діяльності. Обсяг виробництва зріс в 1,6 раза, собівартість знизилася на 12,5 %, що дало можливість збільшити прибуток в 2,4 раза. Зростання продуктивності праці становило 158,3 %. Середня заробітна плата зросла на 27,9 %.

У період 1986–1990 років на підприємстві триває зростання номенклатури і обсягів випуску обладнання для паливно-енергетичного комплексу країни. Було виготовлено та

відвантажено 531 газоперекачувальний агрегат загальною потужністю 7023 МВт. У 1986 році сумчани поставили чотири поршневі компресори 6ГМ40-16/100-420 на 420 атм. і технологічне обладнання для видобутку газового конденсату методом сайклінг-процесу для родовища в районі смт Котельви Полтавської області. Для освоєння і ремонту нафтових і газових свердловин в об'єднанні почали виробництво самохідних установок КОРО 1-80 вантажопідйомністю 80 тонн.

У 1987 році була здана в експлуатацію перша компресорна станція газліфтного видобутку нафти (КС «Самотлорська») загальною вагою технологічного обладнання 3200 тонн. Всього ж виготовили і поставили за період 1987–1990 років у райони Західного Сибіру шість таких комплексів для різних нафтогазодобувних об'єднань. У цьому самому році для освоєння газоконденсатних місценароджень створили блочно-комплектну установку на тиск 500 атмосфер – УКСП-16/500 для зворотного закачування газу в пласт із метою збільшення виходу конденсату, який є відмінною сировиною для отримання моторного палива. Перша така установка (КС «Тимофіївська») працює в об'єднанні «Полтавагазпром» в Україні.

У 90-х роках ХХ ст. відбувається освоєння різних видів кульових кранів від ДУ 6 мм до 1400 мм, арматури тиском до 400 атм., насосів масляних різних типів, зокрема гвинтових на високий тиск, хімічних у корозійностійкому виконанні (наприклад, для укомплектування установки газліфтного видобутку нафти необхідно більше ніж 3 тис. одиниць арматури 80 типів, 138 насосів 13 типів); реконструювання металургійного комплексу виробництва обважнених бурильних і провідних труб.

У цей період йде пошук і відновлення розірваних зв'язків із замовниками Західного Сибіру, Узбекистану, Туркменістану на виробництво обладнання для нафтогазової галузі. Був розроблений, виготовлений і зданий в експлуатацію новий, потужний агрегат типу ГПА-Ц-25 потужністю 25 000 кВт, удосконалено конструкцію агрегатів типу ГПА-Ц-6,3 потужністю 6300 кВт і створені агрегати типу ГПА-Ц-16С потужністю 16 000 кВт із вітчизняним судновим двигуном ДП НВКГ «Зоря» – «Машпроект» (м. Миколаїв).

Спроекували і виготовили дослідний зразок установки з перероблення конденсату КПК-25000, яка забезпечує перероблення 25 тис. тонн за 1 рік конденсату або 46 тис. тонн легкої нафти, одночасно отримуючи 30–50 % бензину і 50–70 % дизпалива.

25 лютого 1994 р. об'єднання було перетворене на відкрите акціонерне товариство «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання ім. М. В. Фрунзе» (ВАТ «СМНВО ім. М. В. Фрунзе»). Обсяги виробництва продукції зросли на 11,6 %, питома вага обладнання, яке вироблялося тоді на експорт, становила 62,4 %.

Наприкінці 90-х років ХХ ст. ВАТ «СМНВО ім. М. В. Фрунзе» було залучено до виготовлення продукції для газопроводів «Ямал – Західна Європа», «Росія – Туреччина», будівництва об'єктів для поховання відходів ядерного палива для Чорнобильської АЕС, постачання обладнання в Іран, Туреччину, країни СНД та інші.

Була проведена велика робота, результатом якої стало отримання (одними з перших в Україні) у 1997 році сертифіката відповідності системи якості міжнародного стандарту ISO 9001:1994. ВАТ «Сумське НВО ім. М. В. Фрунзе» було також затверджене Державним підприємством НАЕК «Енергоатом» Міністерства палива та енергетики України як корпоративний постачальник насосного обладнання та запасних частин до нього для українських АЕС.

З 2001 року сертифіковані осьові відцентрові компресори та еспандер-компресори для застосування в нафтовій, хімічній, газовій промисловості на відповідність стандарту API-617; маслосистеми управління змащування, ущільнення вала і допоміжне обладнання – API-614.

Вперше конструкторами заводу для забезпечення подачі природного газу в пласт тиском 12,0 МПа на установці КС-2.4-ЦГТП/0.4-12 був застосований компресор високого тиску з частотою обертання ротора 14 500 об./хв, з авіадвигуном типу Д-336, потужністю 6,3 МВт (м. Запоріжжя). У наступні роки були введені в експлуатацію: КС-1.2-ЦГТП/0.11-5.6 на Качанівському ГПЗ і установки у складі КС «Солоха» Полтавської області – КС-4.0-ЦГТП/0.49-5.5.

Важливе значення в роботі ВАТ із створення нової техніки в галузі компресоробудування, газопромислового і газопереробного обладнання має спеціальне конструкторське бюро турбокомпресорних машин (СКБ ТКМ). До спеціалізації СКБ ТКМ належить: відцентрові і поршневі компресори потужністю 0,5–25,0 МВт; блочно-комплектні газоперекачувальні агрегати з газотурбінним і електричним приводом, блочно-комплектні компресорні установки для лінійних і дотискних компресорних станцій, станцій ПСГ, газліфта нафти, збору та транспорту нафтового газу, сайклінг-процесу й газоперероблення. Крім того, в СКБ ТКМ здійснюється конструювання кульової арматури DN 10.1400 мм під тиск 2,5–10 МПа, а також розроблення енергетичного й енергоутилізаційного обладнання на основі використання газотурбінного привода авіаційного типу.

З 2007 року ПАТ «Сумське НВО ім. М. В. Фрунзе» входить у фінансово-промислову групу «Енергетичний стандарт», а у 2011 році ВАТ перетворено на Публічне акціонерне товариство.

ПАТ «Свеський насосний завод»

Це підприємство розташоване в м. Свесі Ямпільського району Сумської області, засноване ще в 1870 році і має неабиякий досвід і традиції з проектування і випуску насосів. Від сумських насособудівельних підприємств воно відрізняється тим, що здебільшого спеціалізується на випуску насосів об'ємного принципу дії, причому поршневого типу. Серед них поршневі електро-, пневмо-, паро- і гідропровідні насоси різноманітного призначення, одно- і двоплунжерні високого типу.

Підприємство випускає і динамічні насоси в обмеженій номенклатурі. Серед них відцентрові консольні насоси широкого призначення, артезіанські, зокрема нафтові, вертикальні напіванурені насоси для відкачування рідин із відкритих об'ємів, а також деякі типи багатоступінчастих живильних насосів. Усього Свеський насосний завод випускає більше ніж 200 найменувань насосної продукції.

Характерно, що більшість насосів випускаються за власною технічною документацією, розробленою потужним заводським КБ. Про кваліфікацію конструкторів свідчить той факт, що у 80-ті роки ХХ ст. саме їм було доручено спроектувати перший у СРСР гідротранспортний насос для трубопровідного гідротранспортування твердих матеріалів (руди та вугілля) на великі відстані. Головний зразок такого насоса був виготовлений і успішно пройшов випробування на Норильському гірничо-збагачувальному комбінаті.

Уряд, щоб відмовитися від закордонної купівлі таких насосів вартістю в декілька мільйонів доларів, мав наміри організувати їхній випуск саме на Свеському насосному заводі. Для цього було передбачене будівництво спеціальних виробничих потужностей. Але з розпадом СРСР цим намірам здійснитися не судилося.

1.4 Сучасний насосний парк. Класифікація насосів

Як відомо, насоси – це гідравлічні машини, призначені для підвищення питомої механічної енергії рідини (напору). Це потрібно для того, щоб рідина могла подолати опори трубопроводів, піднятися на певну висоту, виконати механічну роботу під час взаємодії з твердою поверхнею або матеріалом тощо.

Процес підвищення напору рідини в насосі відбувається завдяки силовій взаємодії робочих органів насоса і рідини, що протікає через його проточну. Водночас робочі органи насосів, що контактують із рідиною і передають їй енергію, використовують енергію від зовнішнього джерела – двигуна, турбіни (парової, газової, гідравлічної), двигуна внутрішнього згоряння тощо. Повнота передання енергії від привода до рідини оцінюється повним коефіцієнтом корисної дії (ККД), що дорівнює відношенню енергії, переданої рідині (E_k), до енергії, підведеної від привода (E_n):

$$\eta = \frac{E_k}{E_n}. \quad (1.1)$$

У сучасних насосах цей важливий показник може досягати 85–90 % і навіть більше. Процес передавання енергії в насосі може бути гідростатичним (стиснення рідини рухомим органом насоса в замкненому об'ємі) або динамічним (силова взаємодія лопатей робочого колеса й рідини, що їх обтікає).

Загалом сутність поняття «робочий процес» насоса, полягає в його основному завданні – забезпеченні необхідного напору за заданої подачі. Якщо розглядати більш вузьке поняття «лопатевий робочий процес», то підкреслюється основна конструктивна особливість роботи лопатевого динамічного насоса – його робочий процес здійснюється завдяки силовій взаємодії лопатевої системи робочого колеса з потоком рідини, що протікає. Розглянемо далі питання, що полягає в тому, чому саме підвищується питома енергія рідини в насосі, у якому здійснюється лопатевий робочий процес. За Б. В. Овсянниковим³⁶ можна сказати, що напір у робочих колесах створюється двома способами

$$H = H_{кор} + H_{цир}, \quad (1.2)$$

де $H_{кор}$ – частина напору, що створюється завдяки дії коріолісових сил інерції (завдяки діагональності, тобто наявності різниці радіусів входу і виходу решіток профілів, через які рухається потік);

$H_{цир}$ – частина напору, що створюється завдяки дії циркуляційних сил (кривизні профілю в решітці – різниці кутів установлення профілю на вході і виході решітки профілів).

Відповідно складова $H_{кор}$ виходить завдяки відцентровому, а складова $H_{цир}$ – завдяки осьовому робочому процесу.

Історично першими в динамічних насосах для створення напору стали використовувати коріолісову силу інерції ($H_{кор}$), і такі насоси одержали назву «відцентрові» (потік

³⁶ Овсянников Б. В. К вопросу о передаче энергии в центробежных и осецентрированных насосах циркуляционными и кориолисовыми силами / Б. В. Овсянников, Б. И. Боровский // Известия вузов. Авиационная техника. – 1966. – № 4. – С. 107–113.

у робочому колесі яких повертається на 90°). Наступним етапом розвитку динамічних насосів стало створення осьових насосів ($H_{\text{цпр}}$) – потік у робочому колесі рухається уздовж осі обертання колеса. Черговим логічним кроком стала поява діагональних робочих коліс – потік у робочому колесі повертається на кут $0^\circ < \theta < 90^\circ$.

У середині минулого століття з'явилися динамічні насоси, у яких використовується так званий вихровий робочий процес (процес турбулентної взаємодії одного об'єму рідини з іншим, що проходить через насос).

Основними експлуатаційними показниками роботи насосів є їхній напір H (або тиск P), об'єм рідини, що перекачує насос за одиницю часу Q і величина споживаної одночасно енергії N . Ці параметри залежать від режиму роботи насоса, який визначається опором Δh споживача (трубопровідною системою). Тому кожний насос характеризується своєю робочою характеристикою (наприклад, для лопатевого насоса вона має вигляд, репрезентований на рисунках 1.8 та 1.9). Точка перетину кривих $\Delta h = f(Q)$ – характеристика мережі і $H = f(Q)$ – напірна характеристика насоса визначає робочий режим насоса Q_p . Бажано, щоб саме в цьому режимі крива $\eta = f(Q)$ мала максимум.

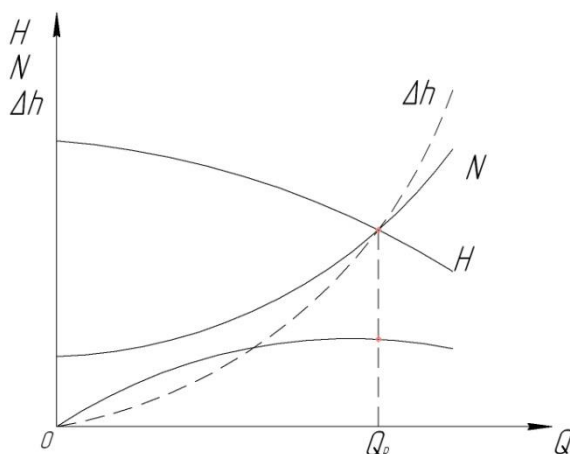


Рисунок 1.8 – Робоча характеристика лопатевого насоса типу ЦН 540-95

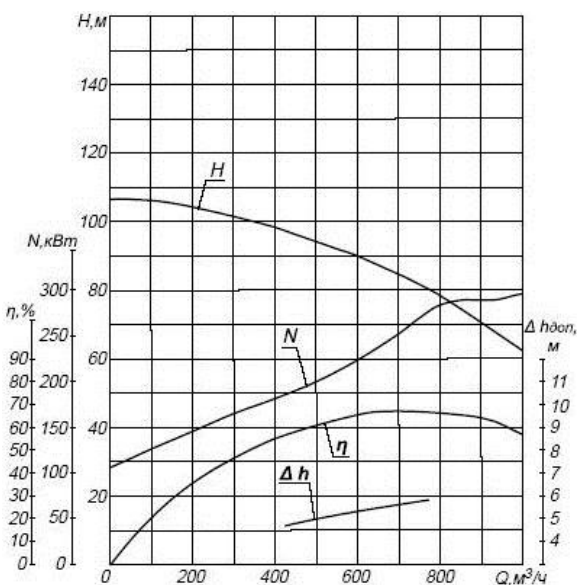


Рисунок 1.9 – Робоча характеристика агрегата

Насоси – це дуже різноманітний і розповсюджений тип машин і механізмів, без яких не може обійтися жодна сфера життєдіяльності людей, такі як:

- житлово-комунальне господарство – водозабезпечення та водовідведення житлових приміщень, забезпечення автономного чи централізованого водяного опалення, санітарно-гігієнічні потреби тощо;
- енергетична – теплові та атомні електростанції, гідроакмулювальні електростанції;
- гірничовидобувна та гірничозбагачувальна галузь;
- нафтодобувна та нафтопереробна промисловість;
- хімічна та металургійна галузі;
- сільське господарство та переробна харчова промисловість;
- трубопровідне гідротранспортування рідких (вода, нафта, нафтопродукти) та твердих матеріалів (пісок, глина, руда, вугілля);

- машинобудівельні підприємства (системи змащування та охолодження, гідроочищення і гідрошліфування, струминне різання тощо);
- системи пожежогасіння;
- системи автоматичного керування та силові виконавчі механізми;
- різноманітні насосні системи на транспортних засобах (ракетно-космічна техніка, авіація, автомобілі та двигуни внутрішнього згорання, морський і річковий транспорт);
- складна та відповідальна медична техніка, така як штучні серце і нирка, примусовий кровообіг і дихання;
- харчова та фармацевтична промисловість.

Таке широка різноманітність місць використання насосів зумовило і надзвичайно широкий спектр їх конструкцій, технічних вимог, робочих параметрів і принципів роботи.

Сучасний парк насосів забезпечує подачі рідин від декількох міліметрів (наприклад, дозувальні насоси) до десятків тисяч кубометрів за годину, напори – до 10 000 м. в. ст. і більше. Енергія, яку споживають, досягає 13–15 тис. кВт (циркуляційні насоси АЕС). А своєрідними рекордсменами за потужністю є турбонасосний агрегат сучасних космічних ракет, який за лічені хвилини використовує близько 170 МВт (для порівняння: потужність Сумської ТЕС – 20 МВт).

Для кращого розуміння різноманітності сучасного насосного парку потрібно розглянути декілька варіантів класифікації насосів. Під класифікацією маємо на увазі принцип розподілення множини об'єктів на окремі групи згідно з їх загальними рисами та ухваленими методами і правилами.

Значна кількість і різноманітність насосного обладнання, що застосовується в багатьох сферах, призводять до великої кількості їхніх класифікаційних схем і, як наслідок, до великої кількості використовуваних класифікаційних ознак, зокрема до найбільш відомих: галузі застосування, принципи дії і конструктивні виконання. Найвідомішою такою класифікацією є розподіл насосів на дві самостійні групи – динамічні й об'ємні. Основою такого розподілу є механізм передання енергії середовищу, що перекачується. Вважається, що в динамічних насосах енергія передається завдяки дії масових (інерційних) сил або сил рідинного тертя, а в об'ємних насосах – завдяки силам тиску на поверхню рідини, тобто витіснення рідини з певного об'єму.

Сьогодні виробники насосного обладнання, об'єднані в Європейську асоціацію Euro pump, користуються класифікацією насосів згідно зі стандартами цієї Асоціації. У новому вигляді ця класифікація групує насоси за сьома характерними ознаками. Виробники України на цій основі розробили більш спрощений варіант³⁷, який групує насоси лише за трьома характерними ознаками: гідравлічним принципом дії, конструктивними ознаками та типом і конструктивними особливостями привода. Наведемо цю класифікацію нижче.

І група – насоси за гідравлічним принципом дії:

1 Відцентровий:

- радіальний;
- канальний;
- півосьовий;

³⁷ ДСТУ 3063-95 Насоси. Класифікація. Терміни та визначення. – Київ : Держстандарт України, 1995.

- осьовий;
- боковоканальний.

2 Об'ємний:

- осциляційний;
- ротаційний.

3 Струминний:

- рідинноструминний;
- водоструминний;
- газоструминний;
- пароструминний.

4 Газліфтний.

5 Гідроударний підйомник.

6 Гідроелеватор.

7 Електромагнітний.

8 Самовсмоктувальний.

Зазначимо, що наведена класифікація за I групою – за принципом дії, на наш погляд, не дуже вдала, неповна і дещо помилкова. Насамперед відсутні повністю вихрові насоси, осьовий насос до відцентрових віднесено не коректно, оскільки в ньому передання енергії відбувається не за допомогою залучення рідини до поля відцентрових сил. І це лише декілька зауважень як приклад.

II група – насоси за конструктивними ознаками:

1 Горизонтальний.

2 Вертикальний.

3 Занурювальний.

4 Одноступінчастий.

5 Двоступінчастий.

6 Багатоступінчастий.

7 Однопотічний.

8 Двопотічний.

9 Багатопотічний.

10 Реверсивний.

11 З опорною основою.

12 З ліхтарем.

13 З опорним ліхтарем.

14 Вбудований.

15 На стояку підшипникової опори.

16 На кронштейні підшипникової опори.

17 З приєднувальним фланцем.

18 Настінний.

19 Моноблочний.

20 Підвісний резервуарний.

- 21 Вбудований у трубопровід.
- 22 Незасмічуваний.
- 23 Безсальниковий.
- 24 З відкидною кришкою.
- 25 З поздовжнім рознімом.
- 26 З поперечним рознімом.
- 27 Двокорпусний.
- 28 З внутрішньою підшипниковою опорою.
- 29 Із зовнішніми підшипниковими опорами.
- 30 Для мокрої установки.
- 31 Для сухої установки.
- 32 З регульованою подачею.

Загальні ознаки:

- 33 Периферійний.
- 34 Вільно-вихровий.
- 35 Тертя дисковий.
- 36 Конусний.
- 37 Спиральнокорпусний.
- 38 Двоспиральнокорпусний.
- 39 Кільцевокорпусний.
- 40 Із секційним корпусом.
- 41 З корпусами ступенів і апаратами напрямними.
- 42 З корпусами ступенів із лопатками випрямними.
- 43 З прямим трубним корпусом.
- 44 З вигнутим трубним корпусом.
- 45 З ротором, виймальним у бік привода.
- 46 Із симетрично розміщеними колесами.
- 47 З консольно розміщеними колесами.
- 48 З колесом між опорами.

Інші ознаки:

- 49 Низьконапірний.
- 50 Високонапірний.
- 51 Надвисоконапірний.
- 52 Базовий.
- 53 Стандартний.

III група – насоси за типом привода та його конструктивними особливостями:

- 1 З механічним приводом.
- 2 З електродвигуном.
- 3 З фланцевим двигуном.
- 4 Із занурювальним приводом.
- 5 З мокростаторним електродвигуном.
- 6 З електродвигуном із захищеним статором.

- 7 З вітроприводом.
- 8 З турбоприводом.
- 9 З пневмоприводом.
- 10 З магнітним приводом.
- 11 З електромагнітним приводом.
- 12 З електромагнітною муфтою.
- 13 З приводом через похилий диск.
- 14 З вбудованим передавальним механізмом.
- 15 З пасовим приводом.
- 16 З важільним регулюванням довжини ходу.
- 17 З кривошипно-шатунним механізмом.
- 18 Паровий із кривошипно-шатунним механізмом.
- 19 Ручний.
- 20 З двигуном геліосиловим.

Нижче наведена розгорнута класифікація об'ємних насосів як осцилювальних, так і ротаційних.

І Насоси об'ємні осцилювальні:

- 1 Похилодисковий.
- 2 Багатовихідний.
- 3 Поршневий:
 - поршневий однорядний;
 - аксіально-поршневий;
 - радіально-поршневий;
 - плунжерний;
 - поршневий дисковий;
 - поршневий диференціальний;
 - поршневий клапанний;
 - поршневий обертово-золотниковий;
 - поршневий із циліндрами опозитними;
 - поршневий різнонаправленої дії;
 - поршневий рівнонаправленої дії;
 - поршневий V-подібний;
 - поршневий прямоточний;
 - поршневий баштовий;
 - поршневий із клапанною пластиною;
 - поршневий із клапанною коробкою;
 - паровий;
 - паровий прямої дії;
 - симплекс;
 - дуплекс;
 - крильчастий;
 - мембранний;

- паропульсатор;
- газозгоряння;
- сильфонний.

II Насоси об'ємні ротаційні:

- 1 Шестеренний.
- 2 Гвинтовий.
- 3 Ротаційно-поршневий.
- 4 Ексцентрично-шнековий.
- 5 Шнековий.
- 6 Шиберний.
- 7 Шиберно-статорний.
- 8 Шиберно-роторний.
- 9 Шланговий.
- 10 Шиберно-еластичний.
- 11 Гелікоїдно-шиберний.
- 12 Зубчастопасовий.
- 13 Рідинно-кільцевий.
- 14 Ланцюговий.
- 15 Колісний ковшовий.
- 16 Ковшовий елеватор.
- 17 Барабанне колесо.
- 18 Шнековий лотковий.

Додатково до цього наведемо більш зрозумілу класифікацію, яка відповідає ЄСКД, ухваленій у країнах СНД. Ця класифікація передбачає групування насосів насамперед за конструктивними та споживацькими ознаками³⁸.

I За робочим процесом (механізмом енергопередачі перекачуваній рідині):

1 Насоси об'ємні (гідростатичні):

- витіснення;
- ротаційні.

2 Насоси динамічні:

- лопатеві;
- вихрові;
- комбіновані.

II За призначенням:

- 1 Турбонасосні агрегати РРД.
- 2 Головні циркуляційні насоси АЕС.
- 3 Живильні.

³⁸ ГОСТ 17398-72 Насосы. Термины и определения. – Москва : Гос. ком. СССР по стандартам, 1978. –

- 4 Конденсатні.
- 5 Мережеві загального призначення.
- 6 Мережеві магістральні.
- 7 Артезіанські.
- 8 Занурювальні.
- 9 Корабельні.
- 10 Пожежні.
- 11 Гідротранспортувальні.
- 12 Фекальні.

III За типом перекачуваної рідини:

- 1 Нафтові.
- 2 Хімічні рідини (луги, кислоти тощо).
- 3 Мультифазні рідини.
- 4 Рідини гарячі і холодні.
- 5 Рідини очищені та забруднені.
- 6 Сильно забруднені рідини.
- 7 Рідини з великою часткою газу.

IV За конструктивними ознаками:

- 1 Одноступінчасті.
- 2 Багатоступінчасті.
- 3 Консольні.
- 4 Однокорпусні.
- 5 Двокорпусні.
- 6 Секційні.
- 7 За розміщенням робочих коліс на валу.
- 8 Однопоточні та двопоточні.
- 9 З горизонтальним валом.
- 10 З вертикальним валом.
- 11 За типом підводу і відводу рідини.
- 12 За типом опор ротора.
- 13 За способом розвантаження ротора від осьових сил.
- 14 За матеріалами основних деталей.
- 15 Герметичні.

V За експлуатаційними ознаками:

- 1 Аварійний.
- 2 Підпірний.
- 3 Відкачки протікань.
- 4 Пускорезервні.

VI За типом приводного двигуна:

- 1 З турбінним приводом (газовим чи паровим).
- 2 З гідротурбінним приводом.
- 3 З електродвигуном.
- 4 Із двигуном внутрішнього згоряння.
- 5 З газопоршневим двигуном.
- 6 З регульованим приводом.
- 7 З нерегульованим приводом.

VII За питомою швидкохідністю n_s (за співвідношеннями напору H і витрати Q):

- 1 З робочими органами наднизької швидкохідності ($n_s \leq 30$) – радіальні.
- 2 З робочими органами низької швидкохідності ($30 \leq n_s \leq 60$) – радіальні.
- 3 З робочими органами нормальної швидкохідності ($60 \leq n_s \leq 90$) – радіальні.
- 4 З робочими органами підвищеної швидкохідності ($90 \leq n_s \leq 300$) – радіально-осьові.
- 5 З робочими органами з швидкохідністю ($300 \leq n_s \leq 600$) – вісерадіальні, діагональні.
- 6 З робочими органами з швидкохідністю ($600 \leq n_s \leq 1200$) – осьові, пропелерні.

Зміна форми проточної частини робочих органів лопатевого насоса залежно від співвідношення напору H і витрати Q схематично продемонстровано на рисунку 1.10.

Далі наведемо деякі приклади класифікацій насосів. На рисунках 1.11 та 1.12 подано варіанти класифікації гідромашин і насосів за принципом дії відповідно, а на рисунках 1.12–1.14 – за конструктивним виконанням і призначенням (відцентрові насоси) відповідно.

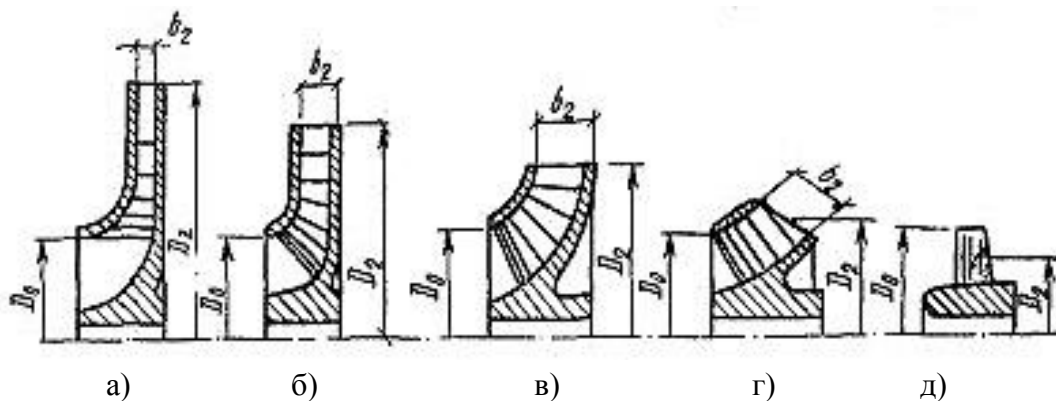


Рисунок 1.10 – Класифікація робочих коліс за коефіцієнтом швидкохідності:

- а) $\frac{D_2}{D_0} \approx 2,5, n_s = 40 - 80$; б) $\frac{D_2}{D_0} \approx 2, n_s = 80 - 150$; в) $\frac{D_2}{D_0} \approx 1,2, n_s = 150 - 300$;
г) $\frac{D_2}{D_0} \approx 1,2, n_s = 300 - 600$; д) $\frac{D_2}{D_0} \approx 0,8, n_s > 600$.

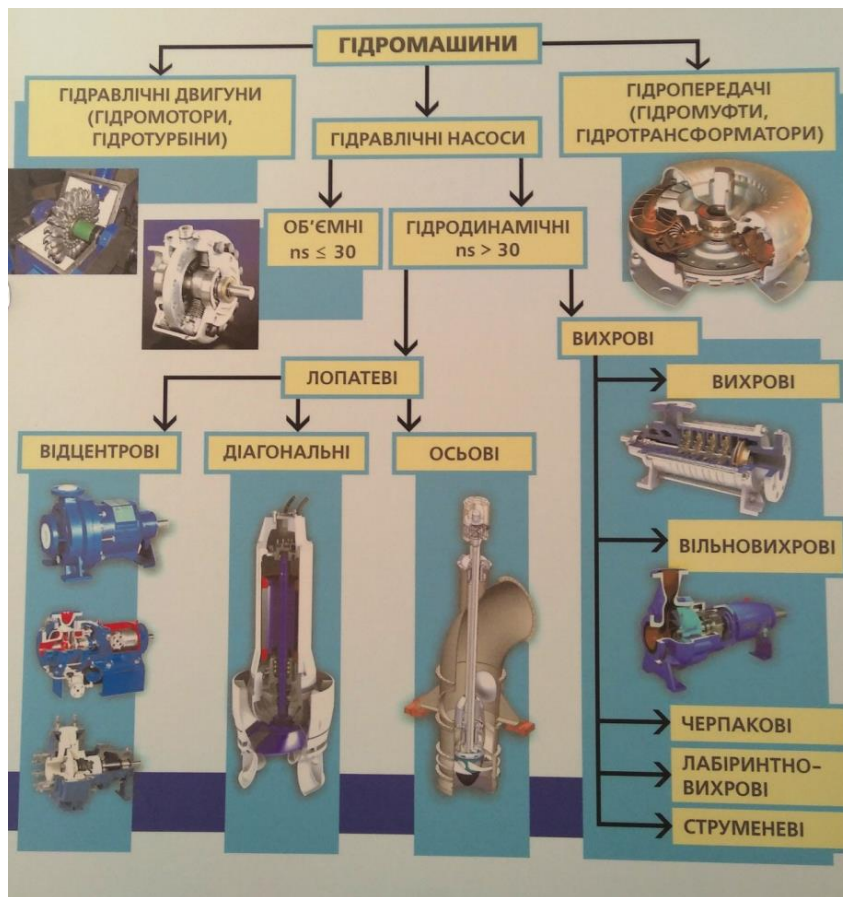


Рисунок 1.11 – Класифікація гідромашин за принципом дії

На рисунках 1.15–1.17 зображені схеми конструкцій насосів різних принципів дії.

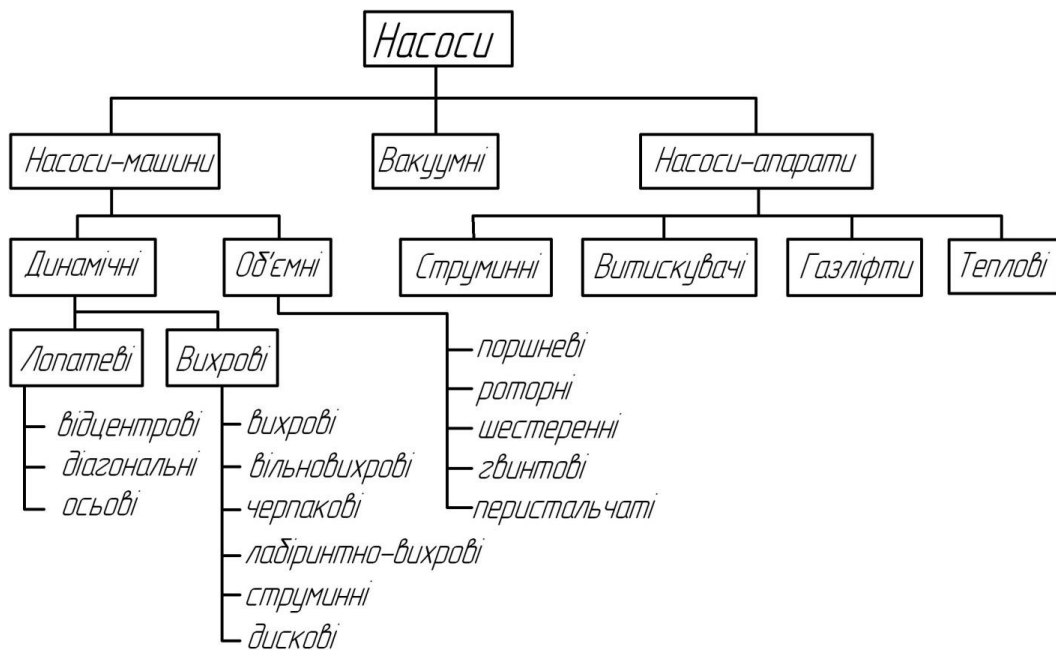


Рисунок 1.12 – Класифікація насосів за принципом дії

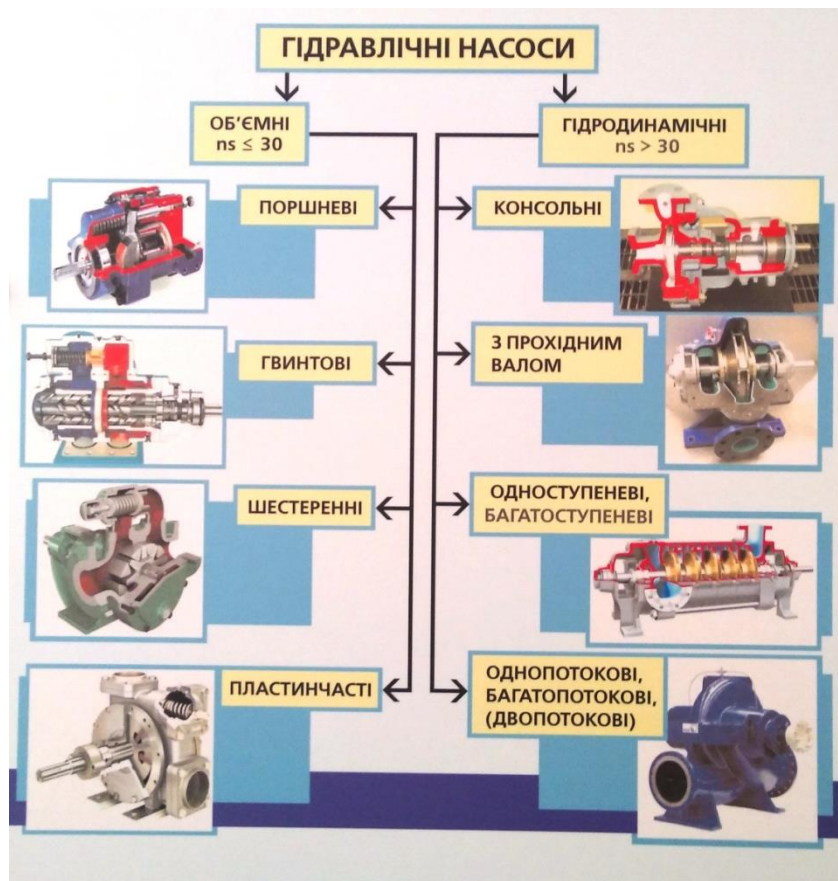


Рисунок 1.13 – Класифікація насосів за конструкційним виконанням

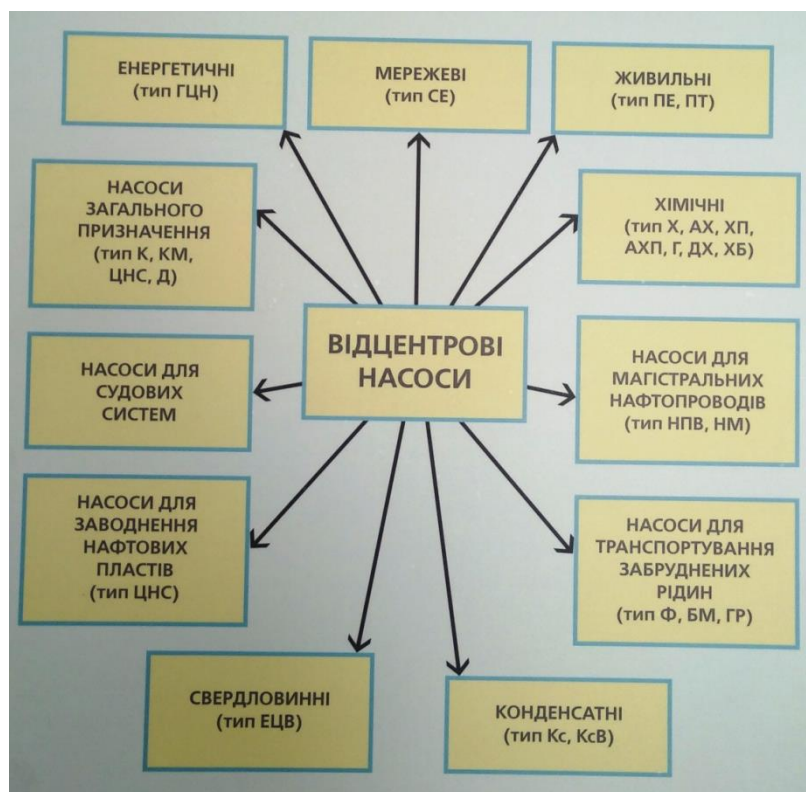


Рисунок 1.14 – Класифікація відцентрових насосів за призначенням

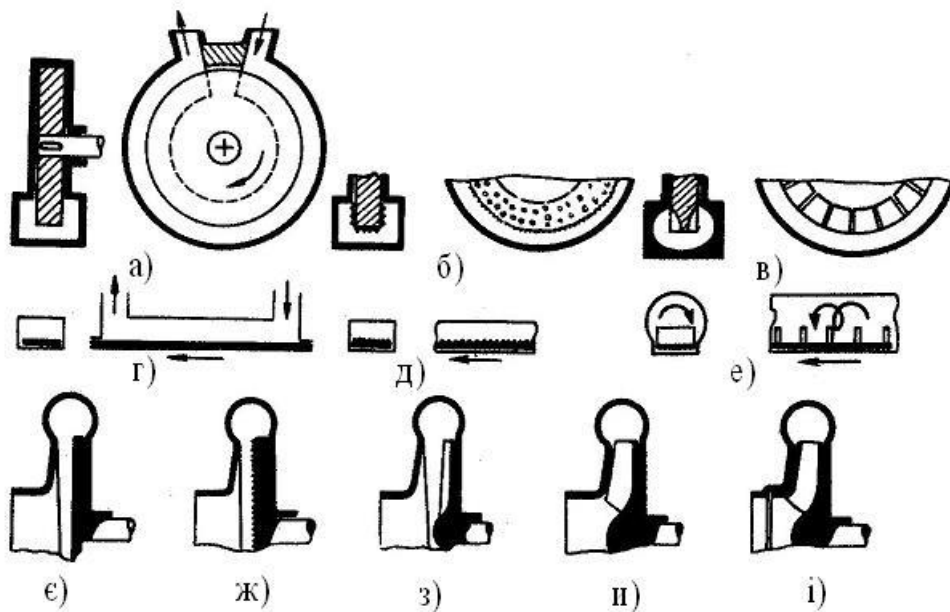


Рисунок 1.15 – Еволюція насоса тертя від «чистого» до вихрового за обертального та лінійного руху робочих органів і від насоса тертя-інерційного до інерційного:

а) тангенціальний дисковий насос – «чистий» насос тертя; б) те ж саме з диском, що має підвищену шорсткість; в) тангенціальний вихровий (поздовжньовихровий) насос; г) ланцюговий насос – «чистий насос» тертя; д) те ж саме з ланцюгом, що має підвищену шорсткість; е) лінійний вихровий (поздовжньовихровий) насос; ж) відцентровий дисковий насос; з) те ж саме з підвищеною шорсткістю; и) відцентровий вихровий (поздовжньовихровий) – тертя-інерційний насос; і) відцентровий лопатевий із відкритим колесом – інерційний насос; і) те ж саме із закритим колесом

Повертаючись до класифікації насосного обладнання за принципом дії, потрібно відзначити думку проф. А. О. Євтушенка³⁹, який вважає, що вона також вимагає свого уточнення на основі відомого інтеграла Бернуллі^{40, 41, 42, 43} щодо енергії, яку одержує перекачуване середовище, що проходить через насос. Цю енергію можна подати у вигляді

$$H = \Delta z + \frac{\Delta P}{\rho g} + \frac{\Delta v^2}{2g} + h. \quad (1.3)$$

Відомо, що енергія положення й енергія тиску в сумі являють собою потенційну енергію рідини ($\Delta z + \Delta P / \rho g$), а швидкісна складова і гідравлічні втрати енергії – її кінетичну енергію ($\Delta v^2 / 2g + h$). Відповідно зберігається поділ насосів на вищенаведені два класи.

³⁹ Євтушенко А. О. Гідродинамічні машини і передачі : навчальний посібник / А. О. Євтушенко. – Суми : СумДУ, 2005. – 255 с.

⁴⁰ Самайлович Г. С. Гидроаэромеханика / Г. С. Самайлович. – Москва : Машиностроение, 1980. – 280 с.

⁴¹ Чугаев Р. Р. Гидравлика / Р. Р. Чугаев. – Москва : Энергия, 1982. – 672 с.

⁴² Каминер А. А. Гидромеханика в инженерной практике / А. А. Каминер, О. М. Яхно. – Киев : Техника, 1962. – 296 с.

⁴³ Приходько О. А. Технічна аерогідромеханіка / О. А. Приходько, Д. О. Сьомін. – Луганськ : Вид-во Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2002. – 170 с.

Об'ємними (гідростатичними) називаються насоси, що змінюють енергію рідини завдяки складовим ($\Delta z + \Delta P / \rho g$) або тільки завдяки величині $\Delta P / \rho g$.

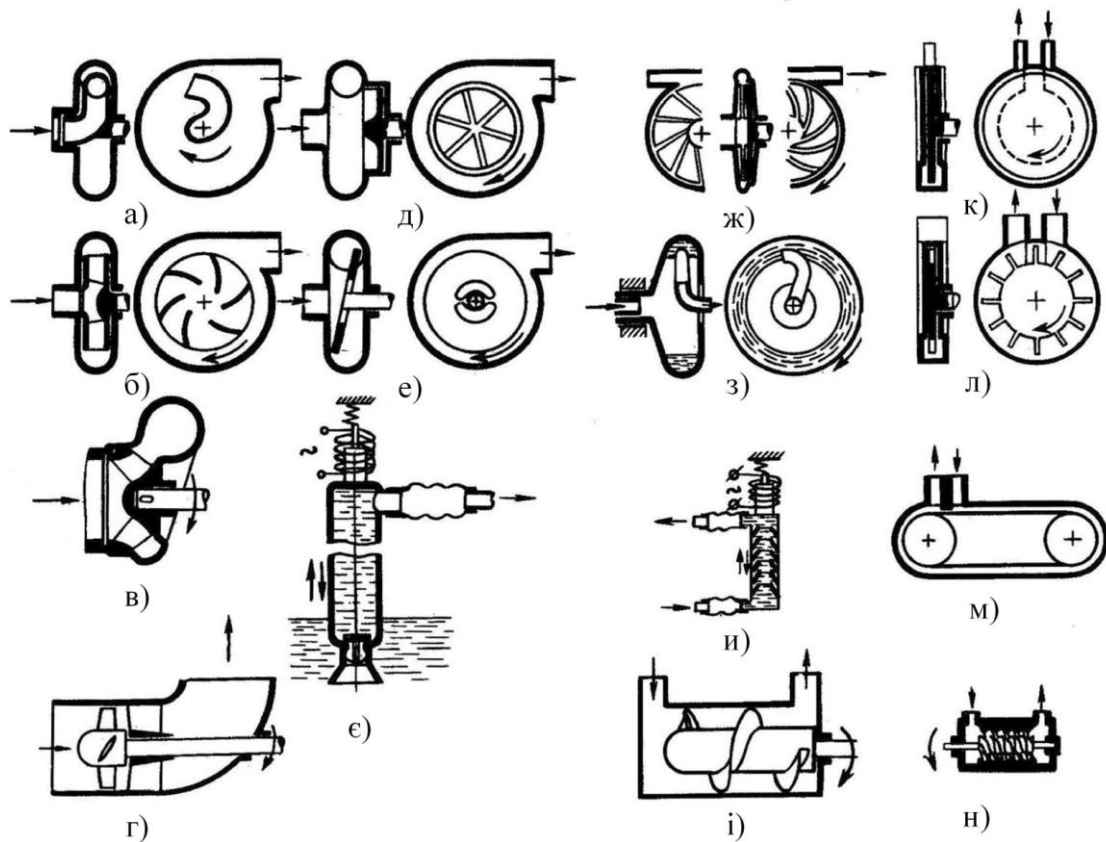


Рисунок 1.16 – Підгрупи та види насосів: інерційні (а), б), в), г), е)),
тертя-інерційні (д), е), ж), з), и), і)), тертя (к), л), м), н)):

а) відцентровий каналний; б) відцентровий лопатевий; в) відцентрово-осьовий лопатевий; г) осьовий лопатевий); д) відцентровий вихровий (поздовжньо вихровий); е) відцентровий похилодисковий); є) клапанний пульсаційний; ж) відцентровий лабіринтний (поперечновихровий); з) черпаковий; и) вібраційний гідроопору (з різним гідравлічним опором перебігу рідини в прямому та зворотному напрямках); і) шнековий; к) тангенціальний дисковий; л) вихровий (тангенціальний); м) ланцюговий; н) осьовий лабіринтний (поперечновихровий)

Динамічними (гідродинамічними) називаються насоси, що змінюють енергію рідини завдяки складовим ($\Delta z + \frac{\Delta P}{\rho g} + \frac{\Delta v^2}{2g}$) або ($\frac{\Delta P}{\rho g} + \frac{\Delta v^2}{2g}$) або тільки завдяки величині $\frac{\Delta v^2}{2g}$.

Останні називаються активними гідромашинами, на відміну від всіх інших перерахованих раніше і названих реактивними.

Найбільш невизначеною величиною в цьому разі є величина h , яку загальноприйнято називати величиною гідравлічних втрат енергії в проточній частині динамічного насоса. Виділимо складові цієї величини

$$h = h_b + h_t, \quad (1.4)$$

де $h_b = H_e + h_{\text{ост. в}}$ – втрати енергії, пов’язані з формуванням вихрових структур різного масштабу в проточній частині насоса;

$h_t = H_t + h_{\text{ост. т}}$ – втрати енергії, пов’язані з формуванням нестационарних процесів у проточній частині насоса.

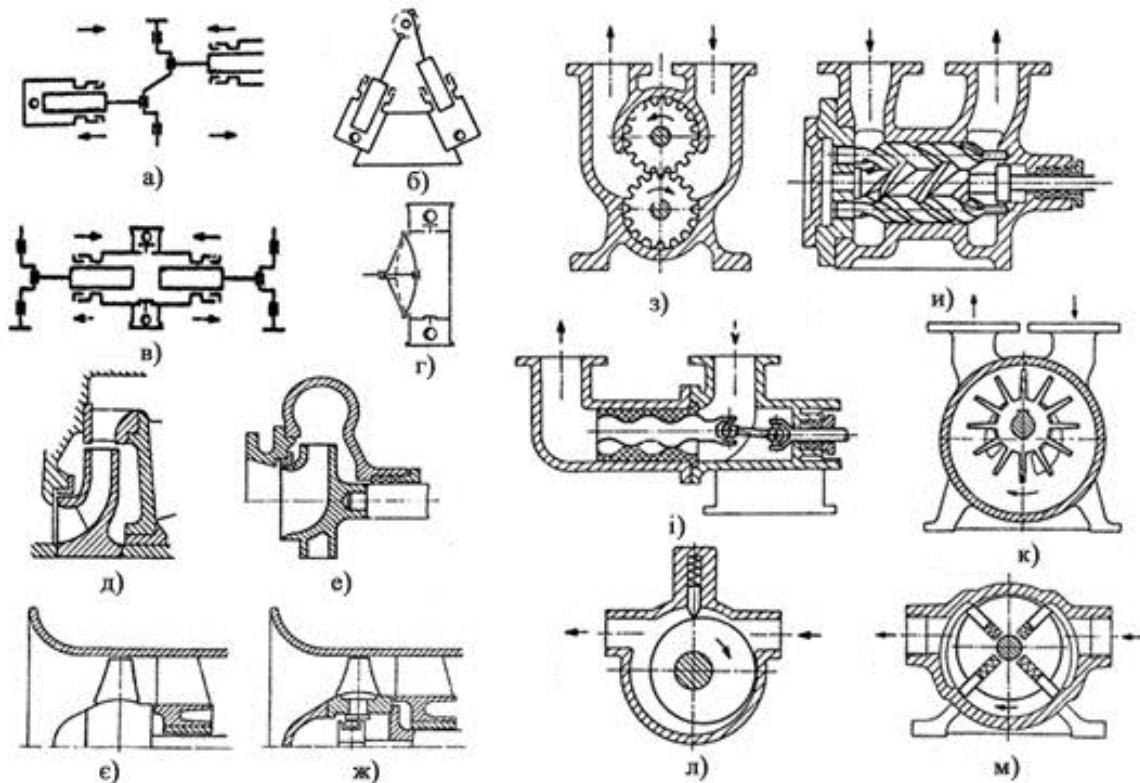


Рисунок 1.17 – Принципові схеми насосів: об’ємні осциляційні (а, б, в, г)), об’ємні ротаційні (з, и, і, к, л, м)), відцентрові (д, е)), осьові (є, ж)):

- а) поршневий з циліндрами опозитними; б) поршневий V-подібний; в) поршневий різноспрямованої дії; г) мембранний; д) радіальний; е) каналний; з) шестеренний; и) гвинтовий; і) ексцентрично-шнековий; к) рідинно-кільцевий; л) шибєрно-статорний; м) шибєрно-роторний

Формування нестационарних процесів і вихрових структур у проточній частині насоса іноді здійснюється цілеспрямовано, водночас вони в подальшому використовуються безпосередньо у здійснюваному робочому процесі конкретного насоса, зокрема підвищують енергію перекачуваного середовища завдяки нестационарним явищам на величину H_t (так званий інерційний напір) і завдяки вихороутворенню на величину H_e .

Відповідно маємо

$$h_{\text{ост}} = h_{\text{ост. т}} + h_{\text{ост. в}} + h_{\text{нє}} \quad (1.5)$$

де h_n – залишкові гідравлічні втрати, не досліджені за своєю природою і, можливо, у подальшому вони також можуть мати свої додаткові складові, які сприятимуть появі насосів із новими принципами дії.

Тоді остаточно маємо

$$H = \Delta z + \frac{\Delta P}{\rho g} + \frac{\Delta v^2}{2g} + H_e + H_t + h_n. \quad (1.6)$$

Водночас може бути продовжена класифікація динамічних насосів за принципом дії за вищенаведеною схемою. Якщо H містить у собі всі складові, що розташовані зліва від величини H_e , у будь-якій комбінації всіх складових, але обов'язково містять величину H_e , то таку групу гідромашин заведено називати вихровими гідромашинами. Якщо ж H містить у собі всі складові, що розташовані зліва від величини H_t , у будь-якій комбінації всіх складових, але обов'язково містять величину H_t , то таку групу насосів називають інерційними насосами.

Такий підхід є суттєвим кроком до істотно більш повної класифікації динамічних насосів за принципом дії. Перевагами пропонованої класифікаційної схеми є її відкритість, здатність вмістити в собі нові наукові знання і конструкторські розробки в галузі динамічних насосів.

1.5 Резюме розділу I

Як бачимо, вітчизняне насособудування загалом і відповідні підприємства галузі Сумщини зокрема розвивалися в напрямку забезпечення насосним обладнанням нових енергоємних галузей промисловості. Судячи з усього, про наявність такої закономірності можна говорити і надалі: у XXI сторіччі насособудування буде йти в ногу з головними тенденціями розвитку промисловості і суспільства загалом.

На підставі цього, для того, щоб зрозуміти, що чекає насособудівну галузь у глобальному стратегічному значенні, необхідно усвідомити основні об'єктивні особливості суспільно-промислового розвитку в нашому столітті. Зазначимо, що в цій роботі не ставиться за мету детально розглядати такі питання. Основні тенденції були викладені у вступі, що дозволяє чітко розгледіти єдиний об'єктивний вектор еволюції технічної системи «насос – розвиток» згідно з ідеологією переходу до VI технологічного укладу.

У зв'язку з цим необхідно розглянути закономірності розвитку технічних систем стосовно насосів з урахуванням особливостей поточного історичного моменту. Цьому присвячений наступний розділ.

РОЗДІЛ II

ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ РОЗВИТКУ СКЛАДНИХ СИСТЕМ

2.1 Про категорії розвитку

Буттям будь-якої системи є її безперервний рух, що відображає своїм змістом загальну невід'ємну властивість – мінливість. Під рухом загалом маємо на увазі спосіб існування матерії, її «зміна взагалі». Сутність руху суперечлива і виявляється діалектикою мінливості і стійкості в їхній нерозривній єдності. Водночас закономірно, що провідне значення в русі має мінливість, оскільки тільки через неї з'являється все нове, а стійкість (спокій) лише фіксує досягнуте в цьому процесі. Однак рух як єдність мінливості і стійкості передбачає наявність і відносної стійкості (стаціонарності) того, що рухається і, відповідно, змінюється. Рух може відбуватися за лінією що сходить, від простих форм до більш складних, від нижчого до вищого. Такий рух, як відомо, називається розвитком⁴⁴. Отже, можна зауважити, що висхідний рух системи, тобто її розвиток, загалом являє собою відносно стійкий процес.

Розглянемо далі категорію розвитку, яка являє собою закономірно спрямовану якісну зміну матеріальних та ідеальних об'єктів. Унаслідок розвитку виникають нові якісні стани об'єкта, які спостерігаються у вигляді змін його складу або структури: виникнення, трансформація або зникнення його елементів або зв'язків⁴⁵.

Характеризуючи процеси розвитку і його механізми, можна відзначити, що вони є досить складними і неоднозначними. Оскільки процес розвитку загалом не універсальний і не однорідний, то загальна висхідна лінія розвитку є інтегральним результатом взаємодії безлічі різних різноспрямованих процесів, що відбуваються всередині неї: прогресивних, що прискорюють розвиток, негативних, що приводять до уповільнення або навіть зупинення розвитку і регресивних, що сприяють деградації. Звісно, прогресивні процеси повинні домінувати, інакше про розвиток будь-якого об'єкта неможливо буде говорити.

З огляду на перераховані вище особливості процесу розвитку можна зробити висновок, що його висхідна спрямованість буде характеризуватися зменшенням кількості негативних і регресивних процесів до їхнього гіпотетичного повного зникнення в деякому ідеальному стані об'єкта. Водночас такий висхідний розвиток будь-якої системи може відбуватися тільки за допомогою цілеспрямованої діяльності людей⁴⁶. Отже, ця діяльність має вирішальне значення у процесі розвитку.

У наведеній вище характеристиці категорії розвитку простежується, на наш погляд, близька аналогія з турбулентною течією, яка характеризується за загальної єдиної спрямованості течії рідини наявністю неусталених зон, зон вихороутворення і зворотних потоків. Загалом турбулентна течія являє собою відносно стійку структуру, вона піддається відповідному моделюванню і вивченню. До того ж справжній розвиток буде аналогічний процесу зниження ступеня турбулізації потоку (тобто зменшення інтенсивності вищевказаних явищ, які є особливостями турбулентної течії).

⁴⁴ Советский энциклопедический словарь / ред. А. М. Прохоров. – 4-е изд., испр. и доп. – Москва : Сов. энциклопедия, 1989. – 1632 с.

⁴⁵ Философский словарь / под ред. И. Т. Фролова. – 7-е изд. – Москва : Республика, 2001. – 719 с.

⁴⁶ БСЭ. – Т. 21. – С. 409.

Будь-яка сучасна технічна система, що передає енергію рідині, а також саме середовище, яке перекачується, є складноструктурованою системою. Відповідно для його дослідження застосовують моделі різних рівнів ієрархії, насамперед мікро- і макрорівня⁴⁷.

На макрорівні систему розглядають як цілісність і описують системою простих диференціальних рівнянь. Цьому рівню властива динамічність – фундаментальна якість розвитку систем як цілого, оскільки воно пов'язане зі спрямованістю і детермінованістю розвитку багатьох систем між точками біфуркації⁴⁸. Водночас, наближаючись до точки біфуркації, принципово необхідно визначити напрямок подальшого руху. Для того, щоб було вибрано напрямок справжнього прогресивного розвитку цих систем, вкрай важливо зрозуміти і вивчити його особливості, а також мету і підсумки цього розвитку на підставі розуміння особливостей VI ТУ. Саме такий підхід, на нашу думку, дозволить не просто успішно подолати цю біфуркаційну зону невизначеності, а й скористатися цією історичною можливістю як трампліном для досягнення прориву в розвитку різних систем: технічних, біологічних, соціальних тощо.

Щодо процесів, що відбуваються на мікрорівні системи, можна відзначити таке. Мікрорівень, або рівень елементарної будови системи відображає фізичні процеси, що відбуваються всередині неї. Дослідження на рівні елементарної будови дозволяє відобразити розподіл певних параметрів, за якими можна отримати інтегральні зовнішні характеристики об'єкта. Крім того, мікрорівнева модель є функціональною, оскільки вона відображає зв'язок внутрішніх і зовнішніх параметрів системи з вихідними. Зрозуміло, що загалом під час вивчення процесів розвитку системи дослідженню на мікрорівні необхідно приділити особливу увагу. Від правильного розуміння мікрорівневих тенденцій буде залежати в підсумку правильність визначення способів розвитку, без перебільшення, цілих класів систем і всього нашого суспільства в майбутньому.

Відзначимо далі, що рівень елементарної будови будь-якого об'єкта репрезентується стохастичними параметрами, що беруть свій початок у термодинаміці. Крім того, зважаючи на характеристику VI технологічного укладу, наведену у вступі, спостерігаємо, що перетворення енергії на цьому новому технологічному укладі можуть здійснюватися тільки на мікрорівні – рівні взаємодії окремих частинок. На основі цього висновку можемо зауважити, що впровадження термодинамічних чи інших аналогій, які дозволяють розглядати поведінку системи на рівні її складових, є доволі актуальним.

2.2 Ентропія і розвиток

Однією з фундаментальних і універсальних категорій на сьогодні є ентропія. У термодинаміці вона вважається визначником міри незворотного розсіювання енергії⁴⁹. Загалом ентропія інтерпретується як міра неупорядкованості деякої системи. Водночас використання категорії ентропії в дослідженнях у багатьох галузях науки і техніки, зовсім віддалених від термодинаміки, допомагає відкривати, по суті, новий спосіб пізнання світу, причин і механізмів виникнення і розвитку різноманітних систем, що самоорганізуються, котрі протистоять ентропії. Вона є універсальною, по суті, категорією, а її використання

⁴⁷ Алексенко О. В. Розробка методів розрахунку та дослідження робочого процесу лопатевих насосів : дисертація на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук / О. В. Алексенко. – Суми : СумДУ, 2005. – 156 с.

⁴⁸ Курдюмов С. П. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем / С. П. Курдюмов, Е. Н. Князева. – Москва : Наука, 1994. – 236 с.

⁴⁹ Базаров И. П. Термодинамика / И. П. Базаров. – Москва : Высшая школа, 1991. – 376 с.

допомагає в новому ракурсі побачити і переосмислити багато явищ навколишнього світу, розвиток технічних систем і всього людства⁵⁰. Водночас ключем до усвідомлення механізмів, які керують процесами розвитку різних об'єктів і систем різної складності, є дослідження не стільки найбільш загальних природничо-наукових категорій – енергії, інформації, речовини, ентропії тощо, а передусім їхньої взаємодії.

З огляду на розуміння категорії ентропії як функції стану, можливо зауважити про певні «особливі» стани системи. Насамперед це крайні, причому ідеалізовані, стани хаосу і безентропійності. Перший із них можна уявити як стан повного розкладання системи і злиття її з довкіллям. З іншого боку, накопичуючи порядок, система наблизатиметься до особливого стану, який буде характеризуватися спеціальними, чітко визначеними і незмінними умовами. Це обумовить припинення всяких варіацій, тобто на будь-які «запити» система буде давати одну і ту ж саму незмінну відповідь.

Відзначимо, що будь-яка система, що перебуває у звичайних, далеких від ідеальних умовах являє собою загалом сукупність підсистем із жорстко детермінованими умовами і досить мінливу підсистему регулювання, яка зобов'язана реагувати на всі зміни зовнішнього середовища⁵¹. Тобто стан будь-якої системи, що працює (біологічної, технічної, соціальної тощо), характеризується наявністю певного співвідношення впорядкованості (детермінованості – D) і ентропійності – S.

До того ж підраховано, що для, наприклад, мовних систем оптимальне співвідношення цих величин $S/D = 0,25$.⁵² Введений параметр отримав назву коефіцієнта стохастичності (G). Візьмемо на себе сміливість вказати, що цей параметр також відображає гармонійний стан системи. З огляду на таку сутність коефіцієнта стохастичності його деякою мірою можна порівняти із золотим перетином⁵³.

Відзначимо коротко про категорію гармонії. Загалом вона вважається стрункістю цілого і його частин. У стані гармонії відбувається злиття різних компонентів об'єкта в єдине органічне і стійке ціле⁵⁴. Водночас важливо відзначити, що гармонійний стан цілісного об'єкта є динамічним результатом якісної відмінності і протилежності елементів, що становлять цю цілісність. Стійкість гармонічного стану виявив ще Аристотель, який вважав, що гармонія – це стан, за якого нічого не можна ні відняти, ні додати. Використовуючи фізичну аналогію, – це стан, схожий із стійкою рівновагою. У математичному сенсі гармонію можна сприймати як певний вид пропорцій, як відповідність частин одна одній і цілому.

У такому контексті ми бачимо фактичне відображення суті коефіцієнта стохастичності, який являє собою математично оптимальний параметр відносин детермінованості й ентропійності системи. До того ж так чи інакше, свідомо і несвідомо коефіцієнт G використовується, і його значення дотримуються під час розвитку багатьох систем. Наприклад, під час створення нових технічних об'єктів розробники прагнуть максимально використовувати всі типові вузли та деталі, тобто всі накопичені і детерміновані в них знання певної галузі техніки. Однак для кожного нового пристрою виникають нові специфічні завдання. На підставі цього

⁵⁰ Седов Е. А. Одна формула и весь мир. Книга об энтропии / Е. А. Седов. – Москва : Знание, 1982. – 176 с.

⁵¹ Алексеев Г. Н. Энергия и энтропия / Г. Н. Алексеев. – Москва : Знание, 1978. – 192 с.

⁵² Степанов Ю. С. Семиотика / Ю. С. Степанов. – Москва : Наука, 1971. – 146 с.

⁵³ Васютинский Н. А. Золотая пропорция / Н. А. Васютинский. – Москва : Молодая гвардия, 1990. – 238 с.

⁵⁴ БСЭ. – Т. 6. – С. 128.

розробникам доводиться шукати нові оригінальні і часом непередбачувані рішення, без яких був би взагалі неможливий прогрес.

Необхідно прагнути, щоб детермінізм і стохастичність перебували в діалектичній гармонійній єдності, оскільки антогоністичні основи, поєднуючись в одному явищі, врешті-решт, є стимулом для розвитку⁵⁵.

Зважаючи на суть коефіцієнта стохастичності, будь-яка нова ідея розвитку повинна багато в чому (на $3/4$!) ґрунтуватися на вже наявному історичному досвіді розвитку тієї чи іншої системи, її традиціях і позитивних напрацюваннях. Новаторство ж (на $1/4$) буде привносити передові проривні технології нового технологічного укладу, які так чи інакше в близькому майбутньому міцно і повсюдно увіллються в наше життя, істотно змінюючи його на всіх рівнях організації суспільства (як свого часу електрика, телефон, автомобіль, авіація, інтернет тощо).

На підставі історичного досвіду змін технологічних укладів, можемо зазначити, що значна кількість ідей і рішень, які становитимуть фундамент нового технологічного укладу, вже висловлена і певним способом сформульована. Тому у процесі розгортання нового ТУ ми багато в чому будемо спиратися на той доробок, що вже є. Це, на нашу думку, і пояснює, на перший погляд, нелогічно високе значення необхідної, «гармонійної» частки детермінованості.

У цьому контексті звернемо особливу увагу на те, що VI технологічний уклад характеризується переважальним значенням зв'язків «суб'єкт – природне середовище». Розвиваючи викладені вище ідеї, можна зазначити, що ті чи інші ідеї та рішення для забезпечення гармонійного розвитку систем необхідно в певному обсязі брати в самої природи. Це буде безпосередньо співвідноситися з проблемою оптимізації енерговитрат людства, розв'язання якої полягає водночас в широкому освоєнні та використанні відновлювальних джерел енергії.

Відзначимо, що багато технічних рішень широкого комплексу проблем людства вже розв'язані природою в процесі еволюції різних організмів. Необхідно лише виявити їх, інтерпретувати для потреб людства і застосувати на практиці. Як приклади з галузей, пов'язаних із гідродинамікою, відзначимо такі. Відомо, що в бобрів і морських видр (каланів) відсутній товстий шар жиру, який зберігає тепло. Проте ці гризуни залишаються теплими і навіть сухими, пірнаючи під воду. Вчених зацікавила будова хутряної шкіри бобрів із метою сконструювати такий самий гідрофобний матеріал штучним способом⁵⁶. У цьому разі було поставлене і розв'язане завдання знайти біологічний еквівалент гідрокостюмів для плавання, щоб тканина якомога швидше висихала після вилучення з води, але одночасно зберігала теплорегульовні властивості. Також відомо, що будова шкіри дельфінів забезпечує їм мінімальний опір під час руху у воді, що вже знайшло застосування у створенні спеціальних покриттів для днищ швидкохідних водних транспортних засобів⁵⁷.

Отже, застосувати рішення, створені природою, є детермінізмом. А стохастичність – це загалом створення технологій, які дозволять використовувати той чи інший принцип для загального блага.

⁵⁵ БСЭ. – Т. 8. – С. 228.

⁵⁶ <https://geektimes.ru/post/281314/>.

⁵⁷ http://www.sivatherium.narod.ru/library/Tomilin/gl_07.htm.

На підставі вищесказаного дозволимо собі як певні висновки такі припущення щодо загалом систем і їхніх станів. Уявімо собі певну шкалу «детермінізм (D) – ентропія (S)». На ній можна виділити такі чотири характерні точки (рис. 2.1):

- 1) безентропійності, яка вже згадувалася як певний ідеальний стан (D_{\max});
- 2) хаотичності (S_{\max}), протилежна по суті до першої точки, у якій система перестає існувати;
- 3) гармонійного (G) або стійкого і стабільного стану системи, що характеризується оптимальним значенням коефіцієнта стохастичності;
- 4) «неповернення», яку за аналогією можна назвати зворотною точкою стохастичності ($\bar{G} = 1/G$). Водночас ця гіпотетична точка характеризуватиметься наявністю такої кількості ентропії або таким рівнем (інтенсивністю) руйнівних і хаотичних процесів, коли система вже за жодних умов не здатна буде виконувати свої функції, хоча буде продовжувати і навіть певним способом функціонувати. До того ж точка \bar{G} є точкою максимальної нестійкості об'єкта. Щодо технічної системи, можна зазначити, що в такому стані вона перестає бути ремонтпридатною, хоча загалом може зберегтися її цілісний вигляд і працездатність окремих вузлів і елементів. Розвиваючи цю тезу і розглядаючи цілі класи технічних систем, можна охарактеризувати цю точку як такий стан, за якого певний клас ТС повністю втрачає можливість до розвитку і стає нездатним повернутися до більш структурованого і високоорганізованого стану. Тобто ця точка визначає стан, коли така система за жодних умов не здатна зменшувати свою ентропію.

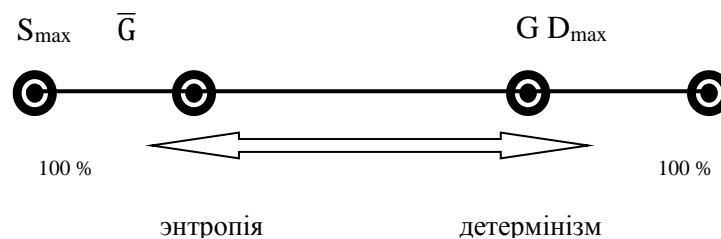


Рисунок 2.1 – Шкала «детермінізм – ентропія»

Щодо тих чи інших технічних систем можна зауважити, що вони перестають бути потрібними суспільству і морально старіють, завершуючи свій розвиток із закінченням певних технологічних укладів. У цьому контексті ще раз акцентуємо увагу на питанні, яке було поставлене у вступі щодо розвитку технічних систем, які передають енергію рідині. Воно полягає в тому, чи буде потреба в насосах традиційних конструкцій за VI і наступних технологічних укладів? Чи буде місце не тільки їм, а й багатьом технологічним і виробничим ланцюжкам, у яких сьогодні наявні насоси, в епоху коли суспільство засновується на ВДЕ і гармонійному бутті людини і природи? На наш погляд, роздуми над цим поки ще, напевно, є риторичним питанням і обумовлюють необхідність пошуку нових способів і підходів до організації систем, що передають енергію рідині, а здебільшого воді, яка є основним ресурсом життєдіяльності людини.

Зважаючи на це положення, виникає закономірне питання про можливість руху систем в околі своїх точок гармонії в той чи інший бік за шкалою «детермінізм – ентропійність». Відзначимо, що стимул для розвитку з'являється тільки в тому разі, коли обидва протилежні початки поєднуються в одне явище, і немає істотного домінування жодного з них. Загалом

процеси зміни, перетворення, розвитку являють собою діалектичні процеси, оскільки в їхній основі лежить не тільки закономірність, а й випадковість.

Крім того, ентропійність – невід’ємна якість всіх живих організмів, що виявляється на різних рівнях (генів у вигляді мутацій, міжклітинних зв’язків, взаємодії різних органів тощо). Без стохастичних міжклітинних зв’язків організм позбувся б можливості адаптації до постійно мінливих зовнішніх умов. Водночас можна говорити про те, що в природі діє якийсь принцип, який перешкоджає зростанню хаосу і безладу. Він полягає в бутті живих організмів, зокрема і людини. Загалом життєдіяльність – це антиентропійний процес. Споживаючи енергію з навколишнього світу, жива істота перебуває в постійному русі – боротьбі за своє існування, який і є, по суті, процесом, спрямованим на зниження ентропії⁵⁸. Те саме можна сказати і про буття технічних систем. Водночас ці системи можуть розвиватися деякою мірою лише дискретно – від поточної моделі до більш досконалої, оновлюючи окремі вузли або конструкцію загалом.

Отже, у єдності необхідності «споживання» ентропії і постійної боротьби за її зниження вбачається суть буття багатьох систем, спрямованого на підтримку динамічної рівноваги свого стану. Розвитком же можна назвати процес, спрямований на досягнення системою гармонійного поєднання параметрів детермінованості й ентропійності, що описується коефіцієнтом стохастичності.

Розглянемо зміну відкритих систем, до яких належить суспільство, людина, будь-яка жива істота, технічна система, беручи до уваги адитивність ентропії як кількісної змінної:

1) усередині системи відбуваються різні процеси, унаслідок яких ентропія змінюється на величину $d_i S$;

2) існують потоки ентропії, спрямовані ззовні в систему або з неї. Позначимо зміну ентропії, пов’язану з її припливом або відтоком $d_e S$.

Отже, загальна зміна ентропії відкритої системи $dS = d_i S + d_e S$. Проаналізуємо це рівняння. Загалом знак при $d_e S$ може бути як позитивним, так і негативним, оскільки приплив ентропії в систему може бути більше або менше, ніж її відтік. Відповідно можуть співвідноситися і параметри $d_i S$ та $d_e S$.

З огляду на сутність поняття ентропії і поставлене завдання вибору прогресивного способу розвитку загалом класу систем, що передають енергію рідині, випадки, коли $dS > 0$, тобто ентропія системи збільшується, нас цікавити не будуть. Розвиток може відбуватися лише коли $dS \leq 0$, що буде докладніше показано нижче. Умова $dS \leq 0$ можлива при $|d_e S| \geq d_i S$ та $\Sigma d_e S \leq 0$, тобто сумарний відтік ентропії із системи буде перевищувати приплив і її виробництво всередині системи.

У біологічних, соціальних, технічних системах через різні процеси, що протікають у них, завжди приводиться ентропія, причому з певною позитивною швидкістю: $\frac{dS}{dt} > 0$. Ця швидкість може дорівнювати нулю тільки в стані рівноваги системи, який для людини означає смерть, а для ТС – повний розпад її структури, злиття з довкіллям і зникнення. Швидкість приросту ентропії характеризується функцією дисипації σ , яка показує, скільки ентропії вироблено в одиницю часу в одиниці об’єму відкритої системи.

Відзначимо, що взагалі, точно кажучи, стосовно категорій розвитку, прогресу необхідно застосовувати не саме поняття ентропії, а його протилежність – негентропії. Отже, під негентропією маємо на увазі міру впорядкованості, структурованості й організованості

⁵⁸ Больцман Л. Э. Избранные труды / под. ред. Л. С. Шлак. – Москва : Наука, 1984. – 586 с.

системи. У підсумку отримуємо, що розвиток системи – це процес росту її негентропії або зменшення ентропії до оптимального (гармонійного) поєднання. Водночас, звісно, вважаємо, що системи, які нас цікавлять, розміщуватимуться в стані лівіше, ніж точка гармонії.

Отже, загалом будь-які відкриті системи потребують безперервного звільнення від тієї ентропії, яку вони змушені виробляти поки живі, поки існують. На підставі того, що ентропія є мірою неупорядкованості, інакше можна зазначити, що будь-яка відкрита система для свого існування і розвитку повинна постійно перебувати в стані самовпорядкування або самоорганізації. Такий стан загалом можна назвати нерівноважним, на відміну від рівноважного (з навколишнім середовищем) – смерті.

Водночас здійснення процесу звільнення від ентропії вимагає постійного споживання системою енергетичних ресурсів із навколишнього зовнішнього щодо неї середовища. Відзначимо, що на підставі вищезазначеного ми отримали фактичне уподібнення цієї енергії негентропії.

Зупинимося далі на певному можливому стані відкритої системи, що характеризується таким виробництвом ентропії всередині системи, який буде точно компенсуватися її відтоком назовні ($dS = d_i S + d_e S = 0$). Назвемо цей стан стаціонарним і зазначимо, що він має низку особливостей.

Так, у разі наближення до стаціонарного стану функція дисипації убуває ($\frac{d\sigma}{dt} < 0$) і, нарешті, набуває такого найменшого значення ($\frac{d\sigma}{dt} = 0$), за якого зростання швидкості приросту ентропії в системі немає. У кожен момент часу в системі міститься однакова кількість ентропії. Отже, можна зазначити, що стаціонарний стан стійкий і система мимоволі не може його покинути. Як приклад можна привести біосферу, яка перебуває в стаціонарному стані, і незважаючи на зовнішні, часом негативні впливи на неї з боку людини, поки зберігає стійкість. Водночас спостерігається і тривожна тенденція – глобальне потепління, пов'язане з досить повільним, але неухильним зростанням температури на нашій планеті завдяки інтенсифікації впливів людини на біосферу. А оскільки основною рушійною силою у виробництві ентропії є саме різниця температур (у цьому разі усередненої протягом певної кількості років), можемо говорити про зростання виробництва ентропії всередині біосфери. Підвищуючи небезпеку глобальних катаклізмів, людина ніби виштовхує наш світ із рівноваги – стаціонарного стану, який виник і підтримується завдяки стабільному енергетичному потоку сонячного випромінювання.

Продовжимо розгляд особливостей стаціонарного стану. Умовою наближення до стаціонарного стану є збільшення швидкості надходження негентропії (\bar{S}) у систему. Нехай $\bar{\sigma} = \frac{d\bar{S}}{dt}$ – швидкість утворення негентропії, а $\alpha = \frac{d\bar{\sigma}}{dt} = \frac{d^2\bar{S}}{dt^2}$ – збільшення швидкості утворення («прискорення») негентропії. Величину $\bar{\sigma}$, зворотну за своєю суттю функції дисипації, назвемо функцією упорядкування. Отже, висловлену вище умову можна записати у вигляді $\alpha > 0$, що і характеризує збільшення швидкості приросту негентропії в системі (сумарна кількість надходження негентропії в систему і продукування її в системі). Тобто для досягнення системою, що перебуває в будь-якому (нестаціонарному) стані стаціонарності, потрібен постійний приріст негентропії, унаслідок чого відбувається упорядкування (самоорганізація системи). Розглянемо цю тезу докладніше.

Як уже згадувалося, загалом будь-яка система, перебуває в нестаціонарному стані. Водночас ці системи матимуть різну «спрямованість» до стаціонарного стану. Отже, репрезентований нестаціонарний стан буде характеризуватися такими параметрами:

$$d_i S > 0; d_i S = dS_i - d_i \bar{S}, \quad (2.1)$$

де $d_i S$ – сумарна кількість ентропії всередині системи;

dS_i – вироблена системою ентропія;

$d_i \bar{S}$ – вироблена в системі негентропія (ефект самоорганізації);

$$d_e S > 0; d_e S = dS_e - d_e \bar{S}, \quad (2.2)$$

де $d_e S$ – сумарна кількість ентропії, що надходить у систему ззовні;

dS_e – ентропія, що отримується системою;

$d_e \bar{S}$ – негентропія, що отримується системою.

Відповідно

$$dS = d_i S + d_e S > 0. \quad (2.3)$$

Отриманий вираз – характеристика будь-якого нестационарного стану, у кожному з яких сумарна ентропія системи позитивна. Водночас сама система, переходячи зі стану з меншою кількістю ентропії в стані з більшою її кількістю, рухається в підсумку до рівноважного стану – смерті. Ілюструє цю тезу процес старіння, властивий всім живим організмам, фізичного і морального зносу, характерний для технічних систем.

Рух же до стаціонарного стану являє собою спосіб наростання негентропії. Цей стан, як ми вже відзначали раніше, відповідає пропорційному паритету ентропії і негентропії (детермінованості). До того ж $dS = 0$, а $S = \text{const}$, що є очевидним із правил інтегрування.

На підставі цього стаціонарного стану буде характеризуватися такими виразами:

$$\frac{d\sigma}{dt} < 0; \frac{d\bar{\sigma}}{dt} > 0. \quad (2.4)$$

Тут відображено отриманий вище висновок про те, що для досягнення стаціонарного стану системи потрібно споживання все більшої кількості негентропії. У цьому власне і полягає глибока сутність процесу розвитку, виражена із застосуванням поняття ентропії. Відзначимо також, що стаціонарний стан можна співвіднести з точкою гармонії.

До цього стану, що характеризується максимальною, всеосяжною самоорганізацією (звісно припустити, що існують точки часткової – локальної самоорганізації – локальні стаціонарні стани), можна застосувати S-теорему Клімонтовича⁵⁹. Вона стверджує, що якщо в системі, що перебуває в нерівноважному стані, виникає самоорганізація, то її ступінь можна визначити, порівнюючи ентропію цього стану S з ентропією S_0 якогось стану, взятого за початковий.

З цієї теореми випливає висновок, який у тій чи іншій формі вже звучав вище, – самоорганізація відображає розвиток. Системи, які розвиваються, завжди будуть перебувати в процесі упорядкування та самоорганізації. Теорема Клімонтовича виражається нерівністю $S_0 - S \geq 0$, яка показує, що за нерівноважної самоорганізації ентропія системи зменшується.

⁵⁹ Клімонтович Ю. Л. Турбулентное движение и структура хаоса. Новый подход к статической теории открытых систем / Ю. Л. Клімонтович. – Москва : Наука, 1990. – 320 с.

Водночас величина $S - S_0$ є кількісним показником, характеризуючи ступінь самоорганізації системи. Користуючись попередніми математичними записами, отримаємо, що $S - S_0 \leq 0$ і $S - S_0 \equiv \bar{S}$, тобто міра самоорганізації тотожна негентропії, що підтверджує зроблені вище висновки і показує їхню несуперечливість теоремі Клімонтовича.

Для здійснення «вливання» негентропії в систему необхідний своєрідний «негентропійний насос». Зокрема особливо відзначимо, що принципово такий насос може діяти як ззовні, так і зсередини системи, причому природно, найкращим був би варіант наявності обох «насосів». У наступному пункті буде розглянуто положення, що як «зовнішній негентропійний насос» може бути наука як діяльність щодо отримання нових знань.

Аналіз умов і особливостей роботи негентропійного насоса, виконаний на термодинамічній основі⁶⁰, показує, що для його функціонування, як і для роботи будь-якої реальної технічної системи, необхідна енергія, що узгоджується з висновками, зробленими вище. Загалом можна сказати, що як для досягнення, так і для підтримки стаціонарного стану, як локального, так і глобального (точки гармонії), у систему безперервно необхідно вводити енергію. Процес розвитку, як ми вже бачили, вимагає прискореного отримання негентропії, а отже, і прискореного ($\frac{dv_E}{dt} > 0$) введення енергії в систему.

У точках самоорганізації система отримує ніби сфокусований заряд негентропії, що допомагає здолати наступну ділянку. Така інтерпретація подібна руху енергоносія магістральним нафто- або газопроводом, на якому через певні відстані розміщені насосні або компресорні станції, що підвищують тиск у системі (передають енергію продукту, який перекачується для забезпечення його подальшого руху), для подолання наступного відрізка трубопроводу. У такому порівнянні вбачаємо внутрішню зв'язаність багатьох процесів, що відбуваються в нашому світі, що і підтверджується універсальністю категорії ентропії. Для технічної системи можна зазначити, що перехід від одного стаціонарного стану до іншого є шляхом від менш досконалої до більш досконалої конструкції з погляду виконання своєї головної корисної функції згідно із законами розвитку технічних систем, які будуть розглянуті в наступному розділі.

Фактично кожна точка локального стаціонарного стану системи є точкою біфуркації, у якій, ймовірно, проявляється вибір способу її подальшого розвитку. Водночас, судячи з усього, деякі точки мають набагато більш важливе значення – це, наприклад, точки зміни технологічних укладів, революцій планетарного циклу тощо. Можна зауважити, що в них зміни матимуть набагато вищу амплітуду. Певною мірою це можна порівняти з явищем інтерференції. Отже, ще раз зазначимо, що майбутня точка біфуркації буде характеризуватися істотною амплітудою майбутніх змін у масштабах всієї техносфери та людського суспільства.

Перехід до наступного стаціонарного стану будь-якої системи виникає внаслідок зростання флуктуацій – малих відхилень від найбільш ймовірного стану – до макроскопічного рівня, тобто стають відчутними і набувають значущості вже на макрорівні всієї системи⁶¹. Таке явище спостерігається саме в таких системах, які перебувають у нерівноважному стані й активно споживають негентропію. Вони отримали назву дисипативних. Спосіб переходу від одного локального стаціонарного стану в інший передбачає здійснення стійкого за своєю сутністю руху між ними. Його можна порівняти з життєвим циклом

⁶⁰ Энтропия и информация. – С 123.

⁶¹ БСЭ. – Т. 27. – С. 504.

певного конструктивного виконання технічної системи, коли вона освоєна для серійного виробництва. У певний момент цього руху деякий параметр, як уже вказувалося, може загрожувати їхньому функціонуванню, і відбувається певний перехід, якому саме і передують зростання флуктуацій до макрорівня. Це можуть бути удосконалення в конструкції різних вузлів, елементів, матеріалів, що застосовуються під час виробництва цього типу ТС, зміни в технології тощо. Виникнення чогось схожого здатне сприяти створенню більш прогресивної технічної системи нового покоління. Все це відображено в законах розвитку технічних систем.

Отже, можна зазначити, що саме флуктуації в певних описаних вище умовах обумовлюють не тільки переходи на стаціонарні стани, але і розвиток унаслідок цього всієї системи. Бачимо, що флуктуації відображають ту частину ентропії, яка завжди необхідна для буття систем і наявна в коефіцієнті стохастичності. Відзначимо ще раз, що саме флуктуації вносять істотний елемент невизначеності, задають вибір одного певного напрямку розвитку з безлічі можливих і визначають загалом інженерну і взагалі будь-яку творчість.

Загалом система, яка перебуває в менш організованому (морально застарілому) стані втрачає стійкість в околі деякої критичної точки (точки біфуркації) і за наявності відповідних прогресивних напрацювань стрибкоподібно переходить у більш впорядкований стаціонарний стан (локальну точку гармонії), з якого її життєвий цикл (рух) за s-подібною кривою до наступної точки стаціонарного стану починається знову. Цей перехід, як уже згадувалося вище, вимагає від системи сконцентрованого «споживання» негентропії. А для підтримки цього нового стану необхідне постійне надходження енергії від зовнішнього джерела. Причому під час переходу механізм такого «енергопостачання» також може змінитися. У точках цих переходів відбувається стрибкоподібне зменшення ентропії системи зі зменшенням її виробництва⁶². Такий спосіб розвитку насосного обладнання проілюстрований у першому розділі – від дещо модернізованих колодязних систем до складних потужних сучасних машин, які задовольняють різноманітні потреби та побажання споживачів.

Це підтверджують висловлені вище припущення про локальні точки самоорганізації, а також розкривають необхідність наявності в суспільства значної кількості специфічного енергоресурсу, про який буде сказано нижче, для здійснення прийдешнього переходу до нового технологічного укладу вже у близькому майбутньому. У цьому контексті стає актуальним питання пошуку найбільш ефективної, «працездатної» енергії з попереднім визначенням відповідного критерію.

Отже, резюмуючи, можна сказати, що людству доведеться здійснити небажаний до цього нерівноважний перехід, який, судячи з усього, буде характеризуватися досягненням критичних значень відразу багатьох параметрів. Далі кожне суспільство залежно від породжуваних ним флуктуацій, опиниться на тому чи іншому шляху свого подальшого руху, причому далеко не бездоказово, що висхідного. Відповідно завдання, що стоїть перед нами зараз, – забезпечити такий «флуктуаційний фон», щоб унаслідок відповідного переходу наше суспільство стало на спосіб прискореного розвитку. Намагання зрозуміти і сформулювати об'єктивні перспективи розвитку технічних систем, що передають енергію рідині в умовах переходу до VI технологічного укладу, звісно, і спрямовані на це. Мабуть, такі роздуми і є однією з таких необхідних нам для подальшого прогресу флуктуацій. Крім того, наявність концепції розвитку не тільки для певного класу технічних систем, а й для багатьох інших

⁶² <http://www.ngpedia.ru/id253057p1.html>.

сфер, зокрема і для всього нашого суспільства загалом буде означати фактично зайняття вигідних початкових умов в майбутньому часі великих змін.

2.3 Ентропія й інформація

Один із творців теоретичної механіки П. С. Лаплас, розмірковуючи про те, що все у світі детерміновано і визначено, стикнувся із знаменитою фундаментальною суперечністю, яка отримала назву «демон Лапласа». Сутність цієї суперечності полягає в тому, що принципово ми не можемо розуміти детермінованість світу, повністю ми його не знаємо і знати не зможемо⁶³. Тобто на підставі рисунка 2.1 у цьому світі ми так чи інакше завжди будемо перебувати лівіше від точки D, постійно стикаючись з ентропією. Отже, можна зазначити, що ентропія є мірою нашого незнання і браку інформації про ту чи іншу систему. Інакше кажучи, певною мірою ентропія – це міра принципової неможливості отримання інформації, яка визначається особливостями тих чи інших систем. На підставі цього виникає закономірне і важливе питання щодо того, що ж таке інформація.

Спочатку під інформацією було заведено мати на увазі будь-які відомості та знання, якими обмінювалися люди будь-яким способом^{64, 65}. Із середини ХХ століття завдяки істотним успіхам кібернетики і супутніх галузей значення інформації в суспільстві значно зросла. Вона стала розглядатися як один із найважливіших ресурсів людства. Все це сприяло стрімкому розвитку інформаційної сфери та засобів доступу до інформації. У зв'язку з такою ситуацією вже більше ніж 30 років перед людством стоїть проблема інформаційної кризи, що характеризується, з одного боку, прискореним зростанням виробництва різної інформації – «інформаційним вибухом», а з іншого – складністю пошуку споживачем дійсно корисної, цінної для нього сьогодні інформації – «інформаційним голодом».

З огляду на це інформація сьогодні набуває специфічної властивості – спрямованості, оскільки її цінність може бути визначена як приріст ймовірності досягнення будь-якої мети. Звісно, чим більш глобальна мета, тим більшу цінність має інформація, що сприяє її досягненню. Отже, інформація сама стає цінністю.

Трактуючи цінну інформацію як негативну ентропію, ми маємо право зазначити, що метою розвитку будь-якої системи є перехід до станів з усе меншою кількістю ентропії, поступово зводячи її до прийняттого рівня стану гармонії. Тобто передання інформації деякій системі можна розглядати як удосконалення самої цієї системи, що призводить до зменшення її ентропії. Як неважко помітити, цей висновок добре узгоджується з ідеями, висловленими в попередньому пункті. До того ж тут ми їх розкриваємо ширше. Підтвердженням цьому може служити той факт, що відомий фізик Л. Бріллюен показав, що кількість накопиченої інформації, що зберігається у структурі системи, в точності дорівнює зменшенню її ентропії⁶⁶. А кількість споживаної системою інформації визначає широту і складність спектра потенційних можливостей її дій.

⁶³ Лаплас П. С. Изложение системы мира / под ред. В. М. Васильева и А. А. Михайлова. – Москва : Наука, 1982. – 376 с.

⁶⁴ БСЭ. – Т. 10. – С. 354.

⁶⁵ Философский словарь. – С. 216.

⁶⁶ Бриллюэн Л. Наука и теория информации / под ред. В. Д. Козлова. – Ленинград : Гос. изд-во физ-мат. литературы, 1960. – 391 с.

Можна помітити, що саме цінна інформація, тобто інформація справжньої негентропійної природи відповідальна за загальний прогрес техносфери й окремих класів технічних систем, становлення людини як всебічно розвиненої особистості в процесі освіти, розвиток всього суспільства.

У цьому контексті абсолютно закономірним здається розподіл всієї повноти категорії інформації на дві принципові частини:

1) достовірно цінна інформація негентропійної властивості, що сприяє зниженню ентропії тих чи інших систем. По суті, це і є той самий негентропійний ресурс, яким повинні «харчуватися» всі системи, що розміщені далеко від точки рівноваги і які прагнуть до переходу на певні стаціонарні стани. Така інформація на підставі цього і є згадуваною вище енергією для розвитку;

2) шкідлива інформація, яку ми назвемо на підставі відповідних аналогій «ентропійним фоновим шумом». Він відволікає від отримання справді цінної інформації.

Відзначимо, що однозначна і чітка інтерпретація даних двох множин і їхніх елементів, судячи з усього, вкрай складна. Однак її, безумовно, необхідно виконати принаймні для сукупності справді цінної інформації. Звісно, для цього необхідні певні критерії. На наш погляд, як такий найважливіший критерій може служити постулювання того, що до категорії справді цінної інформації буде належати все те, що потенційно має негентропійну природу, те, що, повторімося, сприятиме розвитку.

Отже, ентропійний інформаційний шум матиме принципову відмінність, яка полягає в тому, що він не має енергетичних властивостей. Він навіть потенційно не здатний забезпечити розвиток. Водночас важливо також зазначити, що якщо будь-яку впорядковану, а отже, таку, що зберігає певну кількість цінної інформації, систему позбавити цієї інформації, то вона фактично перестане існувати як система, втратить цілісність і перетвориться на хаотичну суміш елементів серед інформаційного шуму.

Припущення про те, що інформації притаманні енергетичні властивості, не унікальне. Так А. А. Борисенко вказує, що енергія – це інформація в русі, призначення якої – здійснювати роботу⁶⁷. Умовою появи енергії в будь-якій системі є наявність потенційної можливості здійснення передання в ній інформації⁶⁸. Тобто енергія має на увазі як потенційна можливість системи передавати інформацію. У підсумку система повинна мати інформаційну, а отже, і енергетичну провідність. А це, зі свого боку, чітко відповідає другому закону розвитку технічних систем (п. 3.2.3). Водночас інформація являє собою категорію, що сприяє зростанню порядку й організованості різних систем. Така дія інформації виражається з різниці максимального і реального значення ентропії⁶⁹. На основі вищевикладених висновків, легко переконатися, що в цьому разі мова йде саме про негентропію, яка загалом має енергетичні властивості і являє собою інформацію.

Крім того, на думку А. Борисенка, особливістю інформації є те, що вона проявляється в процесі обмеження хаотичного руху. Це сприяє зростанню впорядкованості систем за допомогою виникнення в ній нових зв'язків⁷⁰. Тут, як ми бачимо, знову ясно відбивається негентропійна сутність інформації.

⁶⁷ Борисенко А. А. Природа информации : монография / А. А. Борисенко. – Сумы : СумГУ, 2006. – 212 с.

⁶⁸ Борисенко, А. А. Теория систем. Информационный подход : монография / А. А. Борисенко. – Сумы : СумГУ 2010. – 210 с.

⁶⁹ Природа информации. – С. 77.

⁷⁰ Теория систем и информационный подход. – С. 163.

На підставі таких міркувань інтерпретуємо далі категорію справді цінної інформації. Отже, загалом будь-яка цінна інформація повинна правильно відображати дійсність. А перевірений практикою результат пізнання дійсності, її правильне відображення у свідомості людини називається знанням. Отже, з категорією знання тісно пов'язана пізнавальна творча діяльність або просто пізнання. Під пізнанням мають на увазі суспільно-історичний процес творчої діяльності людей, який формує їхні знання, – внутрішньодиференційованої сукупності уявлень про дійсність, на основі яких виникають цілі і мотиви людських дій⁷¹. Водночас важливо зазначити, що для нас має цінність адекватне відображення дійсності, відтворення її такою, якою вона є поза і незалежно від свідомості суб'єкта, що пізнає, тобто для нас цінна істина або істинне знання⁷².

Чим же в цьому разі є істина? Маючи безумовну ціннісну природу, істинне знання обумовлює всі аспекти діяльності людей і їхній розвиток, тобто призводить до вироблення загалом системи адекватних, дійсно необхідних людині потреб і благ. Отже, зауважимо, що істина обумовлює будь-який прогрес загалом.

Знання протиставляється незнанню, тобто відсутності достовірної інформації про що-небудь. З огляду на сказане вище можна точно характеризувати незнання як абсолютно ентропійну категорію, а знання – як негентропійну. Крім того, зазначимо, що «ентропійний інформаційний шум» також, по суті, є незнанням, тому що позбавляє людину можливості доступу до справді цінної інформації, замінюючи її собою. Через особливості уваги кожен із нас здатний у певний момент часу усвідомлено сконцентруватися тільки на чомусь одному, на якійсь одній справі: у цьому контексті – отриманні знань або «прослуховуванні» інформаційного шуму. Водночас, звичайно, не варто забувати про те, що споживання тієї чи іншої інформації повинно бути гармонійним (див. рис. 2.1). Інформаційний шум обов'язково повинен бути наявним у житті людини, однак його обсяги повинні бути лімітовані. «Справі час – забаві годину», – говорить мудрість предків і відображає правильний підхід до розподілу часу щодо споживання тієї чи іншої інформації. Відштовхуючись від ідей, викладених у пункті 2.1, для забезпечення гармонійного розвитку особистості необхідно витратити 75 % відповідного часу на отримання нового знання, його усвідомлення, роботу з ним і застосування у процесі своєї діяльності, а 25 % – на якийсь «інформаційний відпочинок». Як тут не згадати дивно точно в цьому контексті «Вчитися, вчитися і ще раз вчитися»? Людина у процесі своєї життєдіяльності зобов'язана споживати негентропію – енергетичний ресурс власного розвитку. Нехтування цими фактично давно відомими висновками, безперервний «серфінг по хвилях» інформаційного шуму призводить тільки до все більш прискореної деградації людської особистості, про що свідчить безліч прикладів серед різних соціальних і вікових груп. Причому можна зазначити, що на сьогодні ця проблема істотно «омолодилася» у зв'язку з успіхами розвитку персональних мобільних пристроїв.

Продовжимо характеризувати категорію знання. Ми інтерпретуємо знання з пізнавально значущою (цінною) інформацією. Водночас вона являє собою певну форму, що містить специфічне ціннісне ставлення суб'єкта до істини⁷³. Знання визначає визнання істини ціннісним актом. Загалом цінність – це фіксована у свідомості людини характеристика його ставлення до будь-якого об'єкта, особливий вид сенсу, який вбачає в ньому

⁷¹ Философский словарь. – С. 191–192.

⁷² Философский словарь. – С. 222.

⁷³ Философский словарь. – С. 192.

людина. Потрібно підкреслити, що за такого розуміння цінністю є не об'єкт як такий, а здатність через нього задовольняти різні потреби⁷⁴, найважливішу з яких можна окреслити як потребу в розвитку. Отже, цінності можна порівняти з описаними вище «згустками» негентропії, необхідними для досягнення локальних точок гармонії. Незважаючи на те, що об'єктивно сфера знань дуже багатогранна, ми можемо розрізняти в ній загальну основу її складових – гносеологічний етос, який являє собою сукупність правил, стандартів, канонів – усього того, що задає і регулює процес осягнення істини і загалом пізнавальної діяльності. У такому ключі вже накопичене знання є тим, що відповідально за зміну детермінізму (згідно з рис. 2.1). І це також інтерпретує його як негентропійну категорію.

Процеси розвитку й отримання знань можна порівняти в такий спосіб: мислення людини завжди рухається від незнання до знання, від поверхневого до все більш глибокого і всебічного знання. У цьому розділі далі відзначимо лише коротко системний процес отримання знання. Так, сфера людської діяльності, функцією якої є вироблення і теоретична систематизація об'єктивних знань про дійсність, називається наукою, а відповідні (справжні) знання – науковими⁷⁵. Сутність наукових знань така, що вони дозволяють нам розуміти дійсність в її минулому, сьогоденні і майбутньому. Звісно, ґрунтуючись саме на таких знаннях, і необхідно шукати підходи до розвитку різних систем.

Наука має на меті виявлення законів, відповідно до яких об'єкти можуть перетворюватися в людській діяльності. У межах науки реалізується ціннісна значення знань. Сутність наукової діяльності – установки на пошук істини і на постійне нарощування істинного знання. Розглядаючи поняття «знання», а також діяльності, спрямованої на придбання знань, необхідно розглянути питання, що стосується того, у чому ж у підсумку виражається знання. Як серед всієї повноти потреб виділяємо матеріальні і духовні, так і серед безлічі знань як первинного блага загалом можемо виділити знання, виражене в матеріальних об'єктах (знання, що «матеріалізувалось» у певних речах) і в духовних об'єктах («одухотворене» знання). У першому варіанті це можуть бути знаряддя праці, інструменти, пристрої для перетворення навколишнього середовища, машини тощо. Водночас вся повнота такого вираженого знання називається технікою. У другому варіанті – це системи навичок, рівень майстерності для реалізації того чи іншого виду діяльності. У процесі наукової діяльності відбувається «добування» і накопичення істинного знання, яке реалізується в різних формах і спрямоване на розвиток окремої людини, різних класів технічних систем, галузей промисловості і суспільства загалом.

Отже, можна сказати, що пошук і отримання нового знання, залучення нових ідей і міждисциплінарних підходів, будучи, по суті, стохастичними процесами, є необхідними нам сьогодні флуктуаціями, які в підсумку і стануть визначати напрямок розвитку і загалом буття технічних, соціальних, природних та інших систем в епоху нового технологічного укладу. Вибір прогресивного способу розвитку після проходження майбутньої точки біфуркації буде визначатися саме тим знанням, яке буде накопичено безпосередньо зараз, оскільки саме знання є справді цінною інформацією і негентропійним ресурсом, необхідним для розвитку.

Проблеми вибору напрямків розвитку, які гостро постали сьогодні загалом перед нами, констатують один невтішний факт – все суспільство і кожен із нас перебувають досить далеко від точки гармонії. На підставі цього нам конче необхідні пропозиції та ідеї,

⁷⁴ Культурология : учебник / под ред. Ю. Н. Солонина, М. С. Карга. – Москва : Юрайт-Издат, 2005. – 566 с.

⁷⁵ БСЭ. – Т. 17. – С. 323.

спрямовані на швидке й істотне зниження ентропійності. Щодо технічних систем можна висловити такі міркування. Підвищену ентропійність мають ті системи, в основі роботи яких закладені принципи та підходи попередніх технологічних укладів і які експлуатуються сьогодні без принципової можливості концептуальної модернізації відповідно до принципів VI технологічного укладу.

Ще раз акцентуємо увагу на тому, що рано чи пізно людство змушене буде синхронізувати свої енергетичні потреби з природними можливостями і відповідно повністю перебудувати всі сфери буття суспільства, а насамперед промисловість під повсюдне використання відновлюваних джерел енергії. Ті технічні системи та їхні класи, для яких не будуть знайдені відповідні нові принципи роботи (насамперед менш енергоємні і більш екологічні), просто не зможуть виконувати свої функції внаслідок відсутності для них вільних енергоресурсів.

Оскільки ВДЕ характеризуються помітно нижчою щільністю енергії, ніж НДЕ, для насособудування і суміжних галузей ця проблема більш ніж актуальна, оскільки саме ці машини споживають значну частину виробленої енергії, про що вже згадувалося у вступі. Теоретично VI теоретичний уклад енергетично має бути заснований не тільки на використанні ВДЕ, але й енергії термоядерного синтезу. Однак, якщо промислові установки, що перетворюють і використовують енергію відновлюваних джерел, уже давно існують і активно розвиваються, задовольняючи в певних країнах значні обсяги енергетичних потреб, то жодного промислового термоядерного реактора ще не існує. Над побудовою таких реакторів працюють багатолюдні міжнародні колективи. Конструкції самих реакторів за складністю на порядки перевищують усі відомі енергетичні установки. На сьогодні вони існують лише як лабораторні стенди. З іншого боку, впровадження нових потужностей АЕС і загалом подальший розвиток цієї галузі після аварій у Чорнобилі та Фукусімі не мають суттєвої підтримки в багатьох країнах. До того ж значна кількість компонентів самої АЕС являють собою системи попередніх технологічних укладів. Отже, зважаючи на такі умови, на нашу думку, об'єктивно необхідно орієнтуватися на те, що енергетичну основу VI ТУ становитимуть саме відновлювані джерела енергії.

Розглянемо далі категорію ідеї. Загалом ідея – категорія, що позначає значення, сутність чого-небудь. Це поняття вживається в найрізноманітніших сенсах, проте в межах цієї роботи під ідеєю також будемо мати на увазі форму досягнення в думці явищ об'єктивної реальності, що містять у собі свідомість мети і проєкції подальшого пізнання і практичного перетворення світу⁷⁶.

В ідеї відбивається найбільш повний збіг змісту думки з об'єктивною реальністю, це – об'єктивне і конкретне, всебічне знання дійсності, готове для свого практичного втілення. Тобто відображення об'єктивної реальності і постановка практичної мети перед людиною, що перебувають в органічній єдності, визначають специфіку ідеї та її місце в русі людської свідомості. Отже, ідея є активною, допоміжною ланкою в розвитку дійсності, у процесі практичної діяльності людини, що створює нові, раніше не наявні форми реальності. Ідеї не лише підсумовують досвід попереднього розвитку знання в тій чи іншій галузі, але служать основою, що синтезує знання в якусь нову цілісну систему⁷⁷.

⁷⁶ Философский словарь. – С. 201.

⁷⁷ БСЭ. – Т. 10. – С. 323.

У цьому контексті ідеї фактично тотожні флуктуаціям, про що в певному сенсі згадувалося вище, тобто ідеї, а насамперед ідеї розвитку, породжувані ентропією, спрямовані на зниження рівня її самої до гармонійної кількості. На підставі вищезазначеного ця робота в певному плані видається спробою зрозуміти особливості розвитку систем загалом у сучасних умовах і сформулювати певні ідеї щодо розвитку класу технічних систем, які передають енергію рідині і передусім воді. Важливість питання, яке розглядається саме в такому вигляді, полягає в тому, що забезпечення водою життєво необхідно для людства, і відповідні машини завжди будуть мати важливе значення в суспільстві.

Далі розглянемо деякі інтегральні характеристики співвідношення категорії ентропії та інформації. У цьому контексті особливої важливості набуває питання, пов'язане зі сприйняттям інформації. По-перше, для адекватного і повного сприйняття тієї чи іншої інформації відповідна система повинна мати певну ємність і загалом здатність до сприйняття інформації. В іншому разі, поняття цінності інформації просто втрачає сенс. З огляду на негентропійну природу цінної інформації (знання) та розглянутих у попередньому пункті особливостей переходу до локальних стаціонарних станів і загалом до точки гармонії можна зауважити, що сприйняття інформації має реалізуватися за наявності певної мети – про це вже згадувалося. Однак досягнення мети є загалом процесом переходу з менш стійкого в більш стійкий стан. Відзначимо, що тут природно мається на увазі розгляд саме процесу розвитку.

Отже, можна зробити висновок про те, що сприйняття інформації являє собою нерівноважний процес переходу дисипативної системи з менш стійкого в більш стійкий стан. Це виявляється можливим тільки завдяки припливу негентропії із системи, яка сприймає інформацію (знання, тобто власне негентропію) на кшталт закону збереження енергії. Водночас процес розвитку – рух у бік точки гармонії вимагає все більш прискореного процесу «споживання» знань. Відповідно це буде вимагати і прискорення процесу його отримання. Розвиток самої системи отримання справді цінного знання – науки – також підпорядковується описаним у пункті 2.1 особливостям, тобто упорядкування в полі «продукування» знання відбувається стрибкоподібно. Звичайно, що цінність такої інформації буде поступово зростати у процесі розвитку, оскільки вона все більше сприятиме (прискорюватиме) руху тієї чи іншої системи до точки гармонії. Рух від однієї локальної точки до іншої буде супроводжуватися накопиченням інформації і під час наближення до неї буде прискорюватися. Тобто сама мета буде начебто притягувати до себе системи, які прагнуть її досягти у процесі свого розвитку. Тут можна уявити певну аналогію із законом всесвітнього тяжіння.

Відзначимо особливості розвитку технічних систем, що є основою V технологічного укладу – мікроелектронної техніки. Немає секрету в тому, що темпи розвитку цих систем, створення все більш досконалих моделей комп'ютерної та обчислювальної техніки, мобільних пристроїв зв'язку є сьогодні найшвидшими у світі. З іншого боку, життєвий цикл того чи іншого покоління систем відраховується в кращому разі кількома роками. На зміну їм приходять більш досконалі моделі. Саме ці системи і відповідні підсистеми, які їх формують, і надсистеми, у які вони входять, є на сьогодні найактивнішими «споживачами» цінної інформації, причому саме в прискореному темпі. А таке споживання сприяє прискоренню темпів отримання нового знання у процесі проведення фундаментальних і прикладних досліджень у відповідних галузях, що ми і бачимо сьогодні. Водночас усе більш значними темпами сьогодні розвиваються галузі, пов'язані з дослідженнями і створенням

різноманітних наноструктур. А це вже наочний прояв діяльності щодо широкого переходу до нового технологічного укладу.

Розмірковуючи, зі свого боку, про перспективи таких систем, як насоси, і з огляду на невідворотну кардинальну зміну структури економіки і промисловості у зв'язку з подальшим, нехай і в далекому майбутньому, але також неминучому переході людства на повсюдне використання ВДЕ необхідно з урахуванням особливостей VI технологічного укладу вже зараз активно проводити пошук і дослідження принципово нових способів передання енергії рідині. Раніше це було названо нами «далекою» перспективою насособудування, яка передбачає пошук таких способів на мікрорівні, а також з урахуванням розвитку нанотехнологій і наносистем – основи нового VI ТУ.

Повернувшись до розгляду категорії інформації, відзначимо ще кілька важливих, на наш погляд, моментів. Чим більше та чи інша система зберігає справді цінної інформації, тим більше впорядкованості загалом в її русі, тобто стрункості руху її елементів, компланарності напрямків їхнього розвитку. Ця теза визначає необхідність єдиної спрямованості розвитку всіх елементів системи. В іншому разі, підкреслимо ще раз, істинного прискореного розвитку, руху найкоротшою траєкторією до точки гармонії практично не буде.

Оскільки описані вище процеси є прерогативою винятково людської діяльності, можна дещо образно, але досить точно, на наш погляд, висловитися, що людина творить негативну ентропію, створюючи нову цінну інформацію. До того ж, як не парадоксально на перший погляд, але внаслідок випадкових флуктуаційних процесів ця інформація іноді буває унікально цінною. Це особливо актуально, коли вся система людського соціуму перебуває поблизу точки біфуркації. Саме такі властивості унікально цінної інформації, по суті, повинна мати концепція розвитку будь-яких систем. Її можна порівняти з найкоротшим способом до точки гармонії.

Подолання цього способу і є фактично корисною роботою цінної інформації – знання. Водночас, тут знову постає питання оцінювання справжньої цінності різної інформації. Заглиблення в це питання не стоїть на меті цієї роботи. Зазначимо лише, що для такого оцінювання необхідно мати певний універсальний критерій. Звернувшись знову до термодинаміки, знаходимо такий критерій. Це ексергія – параметр, що дозволяє кількісно оцінювати якість будь-якого виду енергії⁷⁸. У цьому разі якість – це можливість здійснення корисної роботи. Тобто ексергія фактично характеризує «працездатність» різних видів енергії для будь-якого процесу. Загалом можемо постоловати, що істинне знання має значну (максимальну) ексергію як енергетичний (і причому негентропійний) ресурс для виконання корисної роботи – розвитку тих чи інших систем. Дослідження різної інформації щодо корисності як енергетичного ресурсу для процесу розвитку певних систем – тема окремих широких досліджень.

2.4 Резюме розділу II

Розвиток – складний процес, який у різноманітних системах відбувається по-різному. Технічні системи розвиваються фактично дискретно. Вони за допомогою людини «вказують» власні вузькі місця у процесі своєї роботи. Еволюційний розвиток припускає планомірну модернізацію системи з метою покращання й удосконалення її можливостей

⁷⁸ Бродянский В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.

виконувати свою головну функцію – корисну для людини роботу за своїм призначенням. Революційний – передбачає якісний стрибок до нових за своєю структурою матеріалів, принципів дії тощо системи, яка виконує ту ж саму функцію, що і попередня. Щодо технічних систем, зокрема і насосів, можемо зауважити, що їхній розвиток – це спосіб ланцюжків відповідних універсальних законів. Їх ми і розглянемо в наступному розділі.

Розвиток – це процес удосконалення будь-якої системи з метою все більш ефективної боротьби зі шкідливими проявами ентропії. Нехтування цим процесом врешті-решт призведе до того, що система перестане виконувати свої функції і в підсумку просто зникне. Головний енергетичний і загалом рушійний ресурс розвитку – об'єктивна та істинна інформація і знання про певні об'єкти, які нас цікавлять, що розвиваються.

РОЗДІЛ III

ЗАКОНОМІРНОСТІ РОЗВИТКУ НАСОСНИХ СИСТЕМ

3.1 Теорія розвитку технічних систем

3.1.1 Загальні міркування

Ґрунтуючись на історичному процесі розвитку насособудування та законах розвитку технічних систем, виявимо та проаналізуємо об'єктивні тенденції еволюції систем, що передають енергію рідині.

Відповідно до теорії розвитку технічних систем (ТРСТ) розвиток кожної технічної системи за принципом дії загалом відбувається за допомогою руху на мікрорівень – перехід до використання все більш тонких структур матерії і полів. Такий процес характерний і для гідромашин – систем, що працюють із рідинами та гідросумішами, а також близьких до них пневмомашин. Відповідно до цього закону першими були створені насоси об'ємного принципу дії, що змінюють тільки потенційну частину енергії перекачуваного середовища⁷⁹. Їм на зміну прийшли лопатеві гідромашини, які поряд із потенційною енергією частково корисно змінюють і кінетичну енергію рідини. Кінетична енергія рідини загалом складається з дев'яти складових – по три щодо кожної координатної осі у тривимірному просторі (лінійної, обертової і деформаційної). На підставі цього наявні гідродинамічні машини діляться на дві групи – лопатеві і вихрові. Лопатевими називаються гідромашини, у яких цілеспрямовано змінюються лінійні швидкості руху рідини вздовж двох координатних осей. Тобто маються на увазі такі зміни складових кінетичної енергії рідини, за яких їх можна корисно використовувати, – перетворити на потенційну енергію і (або) зберегти кінетичну енергію, необхідну для руху рідини в заданому напрямку після проходження гідромашини (насос), або перетворити на механічну енергію обертання вала (турбіна). Якщо ж внаслідок здійснення робочого процесу гідромашини вдається хоча б частково корисно використати енергію вихрового руху рідини, то таку гідромашину відносять до групи вихрових гідромашин.

Розглянемо далі закони розвитку технічних систем відповідно до лопатевих насосів і насамперед відцентрових, які є домінуючими в широкому спектрі галузей промисловості, що мають потребу в насосному обладнанні. Зазначимо, що основний постулат ТРТС – технічні системи – розвиваються за об'єктивно наявними законами, ці закони можна пізнати, їх можна виявити і використовувати для розв'язання інженерних завдань, що дозволяє ставити завдання визначення загальних законів і закономірностей (ліній розвитку) техносфери і конкретних технічних систем (ТС) зокрема. Зазначимо, що методологія достовірного прогнозу розвитку технічної системи буде тим більш досконалою, чим більшою мірою вона ґрунтується на об'єктивно чинних закономірностях розвитку техносфери⁸⁰.

З огляду на переваги ТРТС і складність завдання, що стоїть щодо визначення перспективних напрямків розвитку насособудування, ми вважаємо за можливе використовувати її як основний метод цього дослідження.

⁷⁹ Башта Т. М. Гидроприводы и гидропневмоавтоматика / Т. М. Башта. – Москва : Машиностроение, 1972. – 320 с.

⁸⁰ Злотин Б. Л. Законы развития и прогнозирование технических систем : методические рекомендации / Б. Л. Злотин, А. В. Зусман. – Кишинева : Картия Молдовеняскэ ; Прогресс, 1989. – 114 с.

Розглянемо далі структуру і напрямок розвитку технічних систем на прикладі насосного агрегата з урахуванням його негентропійного руху і тенденції отримання нового знання щодо способів передавання енергії рідині, які узгоджуються з особливостями VI технологічного укладу.

Загалом під технічною системою мають на увазі сукупність впорядковано взаємодійних елементів, призначених для виконання певних корисних функцій. Для кожної ТС притаманні чотири однакових ознаки:

- 1) система складається з частин або елементів, тобто має структуру;
- 2) кожна ТС створюється для певної мети;
- 3) елементи системи пов'язані між собою певним способом і організовані в просторі та часі;
- 4) кожен елемент ТС має індивідуальні властивості, а їхня сума дає нову властивість, що відповідає її меті^{81, 82}.

Зміст системного підходу під час дослідження процесів розвитку техніки полягає в тому, що будь-який технічний об'єкт розглядається як система взаємозв'язаних елементів, яка утворює одне ціле. Щодо траєкторії розвитку тієї чи іншої ТС можна зауважити, що вона являє собою сукупність декількох «вузлових точок». Вони являють собою такі конструктивні виконання однієї і тієї ж самої системи, що докорінно відрізняються одна від одної. Відповідно до визначень попереднього розділу їх можна назвати локальними точками гармонії. Між вузловими точками розміщується «поле» багатьох проміжних технічних рішень – систем із невеликими змінами порівняно з попереднім кроком розвитку. ТС у цей період повільно еволюціонує, акумулюючи дрібні зміни, які можна порівняти зі згаданими вище флуктуаціями. Вони ж, зі свого боку, і є причиною великих якісних перетворень. Це так само можна порівняти з пошуками способів розвитку на «ближню» і «дальню» перспективи.

Виділимо чотири основні (функціональних) ознаки технічної системи:

- функціональність;
- структурність (цілісність);
- організацію;
- системну якість.

Розглянемо більш детально кожен з них.

3.1.2 Функціональність

Загалом категорія функції має на увазі у цьому разі як реалізація потреб людини через технічну систему. Потреба або постановка завдання, так само, це те, що потрібно мати або зробити. Отже, можемо відзначити, що створення, розвиток і загалом еволюція технічних систем є цілеспрямованим процесом, оскільки саме поява мети – це результат усвідомлення людиною власних потреб. Тобто людина, обираючи мету своїх дій, значно підвищує вірогідність потрібних їй подій. Загалом цілеспрямованість – це притаманна нам навичка боротьби з деструктивними ентропійними процесами.

⁸¹ Чус А. В. Основы технического творчества : учеб. пос. / А. В. Чус, В. Н. Данченко. – Киев : Вища школа, 1983.

⁸² Альтшуллер Г. С. Творчество как точная наука / Г. С. Альтшуллер. – 2-е изд., доп. – Петрозаводск : Скандинавия, 2004.

Оскільки будь-яка потреба може бути задоволена декількома функціями, так і технічні системи в принципі мають багато способів розвитку. Людина ж завжди, свідомо чи ні, намагається реалізувати лише один спосіб задоволення потреб – синтез технічних систем із максимальною ексергією.

Носієм функціональності ТС є її робочий орган – єдина фактично і безумовно корисна для людини частина системи. Всі інші частини – допоміжні. Власне кажучи, всі технічні системи народжувалися саме лише як робочий орган.

Отже, резюмуючи, можна зауважити, що функціонування – це зміна властивостей, характеристик і якостей системи в просторі і часі. Функція – це можливість ТС проявити свою властивість (якість, корисність) за певних умов і надавати певному об'єкту потрібної форми чи певної величини.

Застосовуючи це загальне визначення і зазначені вище міркування щодо насосів, можемо зауважити, що основною (головною) корисною функцією цих машин є передання енергії від робочого органа до потоку перекачуваної рідини, який так само, отримавши цю енергію, здатен виконати для людини корисну роботу. Сконцентрувавши свою увагу на розгляді динамічних відцентрових насосів (і відповідних насосних агрегатів), на випуску яких найбільше спеціалізуються підприємства Сумщини, зазначимо, що робочим органом у них є лопатеве відцентрове колесо.

3.1.3 Структурність

Структурність (цілісність) елементів і якостей є невід'ємною ознакою системи. З'єднання елементів у єдине ціле необхідне для отримання системою певної корисної функції, тобто для досягнення поставленої людиною перед технічною системою мети. Зазначимо, що необхідна функція і обраний фізичний принцип її реалізації однозначно задають структуру системи.

Отже, структура технічної системи – це сукупність елементів і зв'язків між ними, які визначаються фізичним принципом здійснення головної корисної функції. Зазначимо також, що структура залишається незмінною у процесі функціонування, тобто в разі зміни стану, поведінки, здійснення операцій і будь-яких інших дій.

У структурі системи виділяють елементи – відносно цілі частини системи, що мають деякі якості, які зникають під час відокремлення елемента від неї. Водночас у процесі своєї еволюції система розростається завдяки ускладненню своїх елементів і додаванню допоміжних підсистем. Отже, система стає високоспеціалізованою. Але завжди настає такий момент розвитку, коли система починає брати на себе функції сусідніх систем, не збільшуючи кількість власних елементів. Система стає все більш універсальною за незмінної, а потім і такої кількості елементів, що зменшується. Тобто у процесі своєї еволюції система проходить 2 значних етапи, що отримали назву «розгортання» і «згортання». На першому з них – етапі розгортання – відбувається поява і збільшення кількості елементів (моноречовина → диференціація → спеціалізація). На другому – етапі згортання – відбуваються процеси скорочення і зменшення кількості елементів до одного (універсалізація → ідеалізація → моноречовина). Детальніше ці етапи будуть розглянуті нижче.

Головна вимога, яка ставиться до структури, – забезпечення мінімальних втрат енергії і однозначності дій (унеможливлення помилки, гарна енергопровідність і надійність причинно-наслідкового ланцюжка).

Насос (насосний агрегат) як технічна система має ієрархічний тип структури, тобто він складається з різномірних елементів, кожен із яких є складовою системи більш високого рангу і має зв'язки за «горизонталлю» з елементами одного рівня і за «вертикаллю» – з елементами різних рівнів. Загалом, поява і розвиток ієрархічних структур не випадкова, оскільки це єдиний спосіб підвищення ефективності, надійності і стійкості в системах середньої та високої складності, до яких, без сумніву, належать насоси.

Розглянемо далі короткі основні властивості ієрархічних систем.

1. Подвійність якостей елементів у системі – елемент одночасно має індивідуальні та системні якості. Входячи до системи, елемент, тією чи іншою мірою, втрачає свою початкову якість. Втрата індивідуальності – це та «ціна», що сплачується елементами за придбану ними здатність відображати окремі боки системних зв'язків у ієрархії.

2. Безумовне підпорядкування нижніх рівнів верхнім – основний Порядок ієрархії. Найнижчий рівень ієрархії системи – робочий орган (РО). Тому всі керівні впливи і сигнали, а також енергія обов'язково доходять до РО, змушуючи його функціонувати строго певним способом. У цьому сенсі, як бачимо, робочий орган – найбільш підлеглий елемент системи. Але його значення під час синтезу ТС протилежна – саме він диктує структуру системи для виконання нею своєї головної корисної функції. Дійсно, відцентрове робоче колесо задає всю специфічну композицію конструкції такого насоса, що суттєво відрізняє її від конструкцій інших видів насосів.

3. Нечутливість верхніх рівнів ієрархії до змін нижніх і навпаки. Тобто для надсистеми основним є виконання підсистемами своїх функцій, а на яких матеріалах і фізичних принципах це буде відбуватися їй загалом байдуже.

4. Виділення корисних функцій на рівнях ієрархії. Правильно організована ієрархічна структура дозволяє виділити на кожному її рівні корисні якості, які додаються (взаємопідсилюються) на наступному рівні. Водночас негативні прояви на кожному рівні пригнічуються, або принаймні, до них не додаються нові.

Зазначимо, що основний внесок у головну корисну функцію (для насоса – це передавання енергії потоку перекачуваної рідини – забезпечення певного напору) утворюється на нижніх рівнях, починаючи, відповідно, з робочого органа (робочого колеса). На наступних рівнях відбувається більш-менш істотне доповнення (підсилення) корисної функції (забезпечується прийнятний ККД, кавітаційний запас, рівень шуму і вібрацій, масогабаритні параметри тощо).

Водночас зі збільшенням кількості рівнів якості виконання системою своєї головної корисної функції знижується, тому системи з великою кількістю ієрархічних рівнів мало-ефективні. Їхня ексергія (ексергетичний ККД) знижується, хоча інші параметри, наприклад ККД, може залишатися високим. Найвищий рівень ієрархії виконує, звичайно, тільки узгоджувальні функції, тому такий рівень у системі повинен бути тільки один.

Також необхідно мати на увазі, що чим вищий рівень ієрархії, тим «м'якша» структура, зв'язки між елементами менш жорсткі, а самі елементи легше переставляти або проводити заміну. Нижні рівні характеризуються більш жорсткою ієрархією і зв'язками, тому що така структура строго визначена вимогою забезпечити виконання головної корисної функції системи.

3.1.4 Організація

Загалом організація – це алгоритм спільного функціонування елементів системи у просторі та часі. Організація виникає, коли між елементами з'являються об'єктивно законні, узгоджені та стійкі (усталені) у часі зв'язки (відношення). Водночас одні властивості (якості) елемента висувуються на перший план (вони працюють, реалізуються, підсилюються), а інші – обмежуються, гасяться або маскуються. Корисні якості трансформуються у процесі роботи у функції, дії, поведінку.

Виділимо ще декілька тез, що характеризують організацію. Так, з виникненням організації знижується ентропія в системі, що з'явилася щодо зовнішнього середовища (що часто подається як сукупність інших ТС із непотрібною (шкідливою) для реалізації цієї корисної функції організацією).

Рівень організованості відображає ступінь передбачуваності поведінки системи під час здійснення нею своєї головної функції. Водночас складність організації зростає в разі розгортання ТС і зменшується в разі її згортання, тобто організація начебто «заганяється» (переходить) всередину речовини. Протягом етапу розгортання на корисно-функціональних системах відпрацьовуються принципи організації (умови взаємодії, зв'язки і функції), а потім організація переходить на мікрорівень (функції певних підсистем виконуються речовиною).

Побудова організації технічної системи неможлива без зв'язків між її елементами. Загалом зв'язок – це реальний фізичний (речовинний або польовий) канал для передання енергії, речовини або інформації, причому остання нематеріальною не буває. Інформація завжди передається за допомогою енергетичного чи речовинного носія.

Головна умова працездатності зв'язку – наявність певної різниці потенціалів, тобто градієнта поля або речовини. За наявності такого градієнта виникає рушійна сила, що обумовлює виникнення спрямованого потоку енергії або речовини.

Збільшення рівня організації системи прямо залежить від кількості зв'язків між її елементами. Розвинутість зв'язків означає розкриття реполів (збільшення ступеня репольності). Про це буде детальніше сказано під час розгляду відповідного закону розвитку технічних систем. Тут же зазначимо, що збільшити кількість зв'язків у реполі можна двома способами:

- 1) задіянням елементів системи у зв'язок із надсистемою;
- 2) залученням більш низьких рівнів організації підсистеми або речовини.

Зазначимо також, що в разі збільшення кількості зв'язків на один елемент відповідно збільшується кількість властивостей системи, що корисно працюють. Також однією з важливих властивостей організації є можливість здійснення керування (за допомогою спеціальних зв'язків), тобто зміна або підтримка стану елементів у процесі функціонування системи.

3.1.5 Системний ефект (якість)

Усі природничі науки пізнають в тому чи іншому обсязі системні закони з'єднання частин у ціле, закони буття та розвитку цього цілого – системи. Накопичений досвід у багатьох галузях свідчить, що коли сукупність елементів стає системою, то в ній проявляються над'якості або системні ефекти, що не притаманні простій сумі властивостей і якостей елементів системи.

Загалом розрізняють:

- системний ефект – непропорційне велике підсилення (послаблення) властивостей, які мають окремі елементи;
- системну якість – появу нової властивості, якої не було в жодного з елементів до їхнього задіяння в систему.

Для ТС «насос» і перспектив її розвитку на «дальню» перспективу у XXI сторіччі можна сформулювати таке питання. Як на основі яких принципів, речовин, законів тощо синтезувати нову технічну систему, що буде відповідати основним принципам VI ТУ – гармонічному буттю людини і природи, глобальній перебудові економіки і промисловості на засадах широкомасштабного покриття енергетичних проблем людства завдяки відновлюваним джерелам енергії і водночас мати знайому, але принципово життєво необхідну для кожного з нас якість – передавати енергію рідині і насамперед воді? На наш погляд, почати міркування з приводу пошуку відповідей на це складне, багатогранне, комплексне, але вкрай актуальне питання потрібно почати з розгляду законів розвитку технічних систем стосовно систем «насос» і «насосний агрегат».

3.2 Закони розвитку технічних систем

3.2.1 Загальні положення

Процес розвитку техніки – це відображення людської діяльності. Людина ж вимушена діяти відповідно до об'єктивних законів світу, тому й розвиток техносфери є об'єктивним і закономірним. Отже, ці закони можна і потрібно пізнавати та цілеспрямовано використовувати. Ця ідея лежить в основі теорії розвитку технічних систем і являє собою її основний принцип.

Відповідно до цього сформульовано поняття закону розвитку технічних систем. Закон розвитку ТС – це істотне, стійке, таке, що повторюється, відношення між елементами в системі та із зовнішнім середовищем у процесі прогресивного розвитку (еволюції), тобто переходу системи від одного стану до іншого з метою підвищення її ексергії щодо виконання нею своєї головної корисної функції (збільшення корисної функції).

Закони розвитку технічних систем були сформульовані Г. С. Альтшулером і являють собою таку систему:

1. Закон повноти частин системи.
2. Закон енергетичної провідності системи.
3. Закон узгодження ритму частин системи.
4. Закон динамізації ТС.
5. Закон збільшення ступеня репольності системи.
6. Закон нерівномірності розвитку частин системи.
7. Закон переходу з макро- на мікрорівень.
8. Закон переходу в надсистему.
9. Закон збільшення ступеня ідеальності.

Ці закони були згруповані трійками у відповідні три групи, що були умовно названі «статика» (закони 1–3), «кінематика» (закони 4–6) і «динаміка» (закони 7–9). Можна помітити деякий зв'язок цих груп із моделлю «народження – розвиток – смерть (переродження)»

технічних систем, що ілюструється s-подібною кривою еволюційних процесів у техніці⁸³. Отже, закони групи «статики» характерні для періоду виникнення й формування ТС, «кінематики» – для періоду розгортання й активного розвитку, «динаміки» – для періоду згортання і виходу на кінцевий етап буття системи.

З наведеної когорти законів звернемо одразу ж особливу увагу на останній – закон збільшення ступеня ідеальності. Цей закон посідає особливе місце серед усіх, оскільки саме він фактично зумовлює всі інші закони. Це пов'язано з тим, що єдиним всеосяжним якісним критерієм прогресивності змін у розвитку будь-якої технічної системи є ідеальність (або максимізація ексергії). У цьому разі маємо на увазі те, що розвиток усіх систем відбувається в напрямку збільшення ступеня ідеальності. А ідеальною є така система: масогабаритні, енергоємнісні та інші такі параметри мінімізуються, а її здатність виконувати певну корисну роботу принаймні не зменшиться. У граничному варіанті ідеальною системою буде та, якої немає, але її функція зберігається і виконується (сусідніми системами або ідеальною речовиною). Власне кажучи, це і є, на наш погляд, яскравою ілюстрацією випадку максимальної ексергії системи і фінального етапу її розвитку. Водночас сам закон задає єдиний дійсний і об'єктивний вектор розвитку системи – «прохід» ланцюжком станів, який характеризується неухильним зростанням ексергії.

Більш детально цей закон буде досліджено у відповідному розділі. Зараз же зазначимо, що саме підвищення ступеня ідеальності – головний орієнтир пошуку в щораз більшому інформаційному просторі щодо техносфери.

Розглядаючи систему законів розвитку технічних систем, які висвітлюють етапи життєвого циклу того чи іншого типу ТС, зауважимо, що перед нами постає ще одне природне питання, яке можна сформулювати так. Де ж на загальній схемі розвитку ТС розміщуються насоси загальновідомих типових конструкцій, наприклад, відцентрові насоси для подачі води типу К або ЦНС і які перспективи розвитку таких систем? У процесі пізнання законів розвитку технічних систем спробуємо знайти відповідь на поставлене питання, а також оцінити об'єктивні тенденції подальшого розвитку системи «насос» (насосний агрегат), що впливають із цих законів на «ближню» перспективу.

Особливістю будь-якої технічної системи є її безперервний розвиток, за якого удосконалюється кожен елемент системи так, щоб її призначення (мета) виконувалося найбільш повно, з найбільшим ККД і найменшими витратами на обслуговування⁸⁴.

Припускаючи як основну ідею розвитку людського суспільства на сьогодні прагнення до переходу до VI технологічного укладу як негентропійних тенденцій, перейдемо до розгляду безпосередньо однією з галузей промисловості – насособудування. Ще раз зазначимо, що епоха, у яку ми вступаємо, є фактично часом перетворення всього нашого виробництва на основі гармонійного єднання суспільства і природи. Це, безумовно, передбачає зміну принципів створення і функціонування технічних систем, зокрема і насосів. На підставі того, що основною функцією насосного обладнання є передання енергії потоку рідини, у межах репрезентованих тенденцій і законів розвитку ТС спробуємо розкрити загалом наявні та окреслити можливі перспективні способи і можливості передання енергії рідині. А це буде висвітлення особливостей і можливостей розвитку насосів на «дальню» перспективу.

⁸³ Сапожніков С. В. Створення та вдосконалення технічних систем : конспект лекцій для студ. спец. 131 «Прикладна механіка» усіх форм навчання / С. В. Сапожніков. – Суми : СумДУ, 2019. – 148 с.

⁸⁴ Ратушний А. В. Энергоэнтропийные принципы развития технической системы «гидрораспределитель» / А. В. Ратушний, Н. В. Семёнова, С. П. Кулинич // Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2016. – № 10. – С. 158–162.

3.2.2 Закон повноти частин системи

Закон формулюється так. Необхідною умовою принципової життєздатності ТС є наявність і мінімальна працездатність основних частин системи.

У кожній технічній системі загалом наявні 4 основні елементи: двигун (Д), передавальний пристрій або трансмісія (Т), робочий орган (РО), пристрій керування (ПК). На наш погляд, щонайменше розглядаючи систему «насосний агрегат», із позицій цієї роботи необхідно внести до переліку його основних частин п'ятий елемент – джерело енергії (ДЕ) (рис. 3.1).

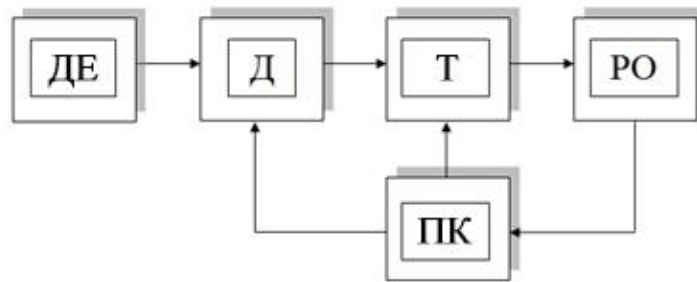


Рисунок 3.1 – Складові технічної системи

Зазначимо далі декілька загальних моментів. Однією з основних особливостей розвитку техніки є витіснення людини із сфери виробництва. Людина витісняється із ТС в орган керування, надалі орган керування сам перетворюється на систему, а людина, відповідно, також витісняється за її межі.

Тобто ТС з'являється щойно технічний об'єкт набуває здатності виконувати свою головну корисну функцію без людини. Деякі аспекти цього процесу були проілюстровані в першому розділі, розглядаючи історичний спосіб розвитку насособудування.

Закон повноти частин системи має один наслідок – ТС буде керованою тоді, коли хоча б одна її частина була керованою. Як же здійснюється керування на рівні насосного агрегата? З огляду на особливості функціонування сучасного загальноживаного насосного обладнання (для перекачування води, наприклад) системою керування загалом досі є сама людина. Як відомо, кожен конкретний насос проектується на певні параметри, забезпечуючи які, він буде працювати найбільш ефективно. Тому зміст керування в цьому разі полягає в забезпеченні сталої подачі розрахункового режиму за допомогою використання від'ємного зворотного зв'язку. Отже, можна констатувати, що на рівні насосного агрегата загалом підсистема керування, яка б входила до його складу, як така відсутня. Отже, хоча перший закон є елементарним і очевидним, під час створення і вдосконалення технічних систем він часто порушується, і насособудування, на жаль, не є винятком.

Наостанок зупинимось ще на одному нюансі. Доволі часто відбувається так, що один з елементів ТС виконує подвійну функцію (наприклад, двигуна і трансмісії). Ця здатність трапляється на першому етапі розгортання ТС (перетворення її на складну систему) і, що більш цікаво, на етапі згортання за допомогою заміни підсистем і системи загалом «розумною речовиною», детально про особливості якої буде сказано нижче.

Зазначимо, що деякі аспекти першого закону щодо насосів, на наш погляд, буде органічно розглянути через призму аналізу другого закону, чому й присвячений наступний пункт.

3.2.3 Закон енергетичної провідності системи

Необхідною умовою принципової життєздатності технічної системи є наявність наскрізного проходу енергії всіма частинами системи. Цей закон також є доволі очевидним. Будь-яка ТС являє собою провідник і передавач енергії. Енергія ж, що надходить ззовні або виробляється у двигуні, задіюється на забезпечення роботи самої системи (усіх її частин), на компенсацію втрат та на зміну чи контрзначення параметрів робочої частини системи. Отже, потрібно завжди прагнути, щоб ТС була не тільки гарним провідником енергії, але й забезпечувала її мінімальні втрати.

Систему передавання енергії потоку рідини за допомогою будь-якого насосного обладнання можна проілюструвати універсальною схемою, поданою на рисунку 3.2. Фундаментальний інтерес у процесі передавання енергії рідині викликає перетворення потоку енергії, що підводиться до насосної установки в потік енергії рідини, що проходить через проточну частину насоса. Відповідно пристроєм, що забезпечує це перетворення, є насос. Вид потоку енергії рідини до насоса і після нього залишається незмінним – це механічна енергія. А вид потоку енергії, що підводиться до насосної установки, може бути загалом різним, але здебільшого на сьогодні – це електрична енергія.

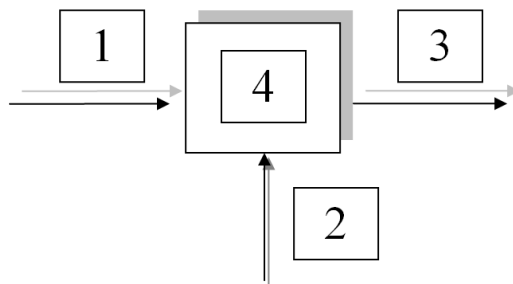


Рисунок 3.2 – Ідеальна схема передавання енергії рідини насосом:

- 1 – підведення рідини низької енергії; 2 – підведення енергії до насосної установки;
3 – відведення рідини високої енергії; 4 – насосна установка

Найбільша ефективність перетворення виду енергії, що підводиться до насосної установки, на механічну енергію потоку рідини закономірно буде забезпечуватися за наявності можливості прямого перетворення цих видів енергії. Цю можливість має забезпечувати насосний агрегат. Звернемо увагу, на те, що сам насос забезпечити передавання енергії рідини не може. Він функціонує у складі насосного агрегата, який є складною системою, структура якого подана на рисунку 3.3. Варто зазначити, що така структура властива взагалі всім машинам – пристроям, які замінюють людину в її різних діях. Власне насосу в цьому разі відповідає позиція «4».

Насосний агрегат загалом, як і будь-яка техніка, є відкритою системою, яка взаємодіє з довкіллям. Отже, порівнюючи рис. 3.1–3.3, маємо можливість подати розгорнуту схему передавання енергії рідині (рис. 3.4).

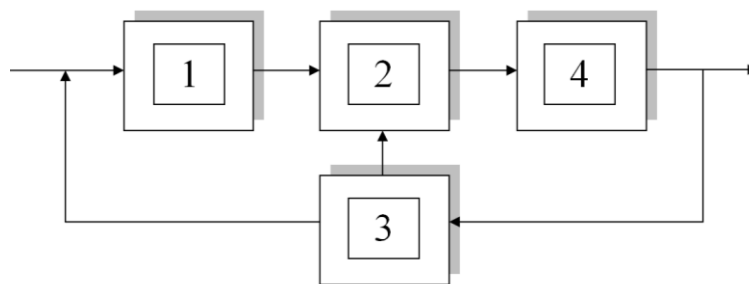


Рисунок 3.3 – Структура насосного агрегата:
1 – двигун; 2 – трансмісія; 3 – керівний пристрій; 4 – робочий орган

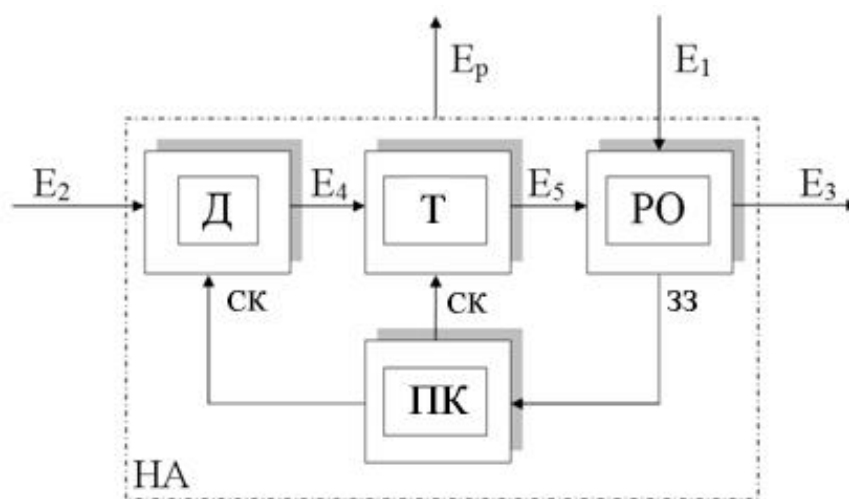


Рисунок 3.4 – Схема передавання енергії в насосному агрегаті

На рисунку позначеннями подані:

Д – двигун;

Т – трансмісія;

РО – робочий орган (насос);

ПК – пристрій керування;

ЗЗ – зворотний зв'язок;

СК – сигнал керування;

НА – насосний агрегат;

E_1 – потік низької енергії рідини перед насосом;

E_2 – потік енергії, підведений до насосного агрегата;

E_3 – потік високої енергії рідини за насосом;

E_4 – потік енергії, підведений до насосного агрегата і перетворений на інший вид двигуном;

E_5 – потік енергії, переданий через трансмісію до робочого органа (насоса);

E_p – сумарний потік розсіяної енергії втрат у насосному агрегаті.

Зазвичай вид енергій E_4 і E_5 однаковий.

Як приклад розглянемо насосний агрегат для перекачування води із звичайним одноступінчастим консольним насосом (рис. 3.5).



Рисунок 3.5 – Насосний агрегат з одноступінчастим консольним насосом

У цьому разі:

Д – асинхронний електродвигун;

Т – з'єднувальна муфта;

РО – консольний одноступінчастий насос;

ПК – як система відсутня (її функції виконує людина);

E_1 і E_3 – механічна енергія потоку рідини перед і після насоса відповідно;

E_2 – потік електроенергії, підведений до електродвигуна насосного агрегата;

E_4 і E_5 – механічна енергія обертального руху валів, що передається від двигуна до насоса.

Ще одним важливим питанням є дослідження циклів перетворення енергії від первинного джерела (як невідновлюваного (НДЕ), так і відновлюваного (ВДЕ)). Скільки перетворень і, відповідно, втрат зазнає потік енергії, поки в електричному вигляді не потрапить до привода насоса? Зменшення кількості цих перетворень, а в ідеалі пряме перетворення енергії джерела на енергію двигуна (наприклад, вітропривод) є найважливішим, актуальним завданням, успішне розв'язання якого здатне кардинально вплинути на підвищення енергоефективності техніки загалом і насосного обладнання зокрема. На підставі цього схему, подану на рисунку 3.4, можна доповнити (рис. 3.6). Зазначимо, що схема на цьому рисунку є універсальною і прийнятною для опису будь-якої технічної системи, будь-якої робочої машини.

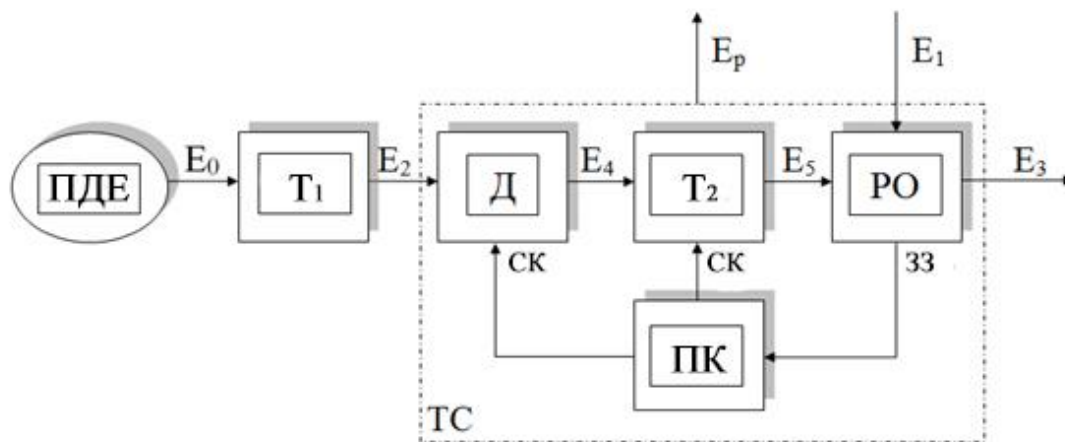


Рисунок 3.6 – Схема передавання енергії від первинного джерела до технічної системи (насосного агрегата)

У цьому разі:

ПДЕ – первинне джерело енергії;

T_1 – перетворювач (або їхня система) потоку E_0 первинного джерела на потік енергії E_2 , що сприймається двигуном.

Розглядаючи наведену на рисунку 3.6 схему, варто звернути увагу на велику кількість структурних компонентів у ланцюжку передання і перетворення енергії від первинного джерела до потоку рідини. «Слабкою» ланкою цього ланцюжка є система T_1 . Зважаючи на комплектування насосних агрегатів здебільшого електроприводами, T_1 являє собою комплекс від видобутку НДЕ (вугілля, нафти, урану тощо) до генератора на ТЕС чи АЕС, ЛЕП і доведення до кінцевого споживача. Легко припустити, що значення загального ККД цього комплексу буде дуже низьким.

На підставі цього, а також на основі уявлень про майбутній новий технологічний уклад може виникнути закономірне бажання його спростити (причому радикально) і зробити більш універсальним, наприклад, прибравши двигун і один із перетворювальних пристроїв (T_2). Це і буде відповідати етапу «згортання» ТС, якщо вона перебуває на відповідній стадії свого розвитку. У цьому разі ми б забезпечили майже пряме передавання енергії від первинного джерела до технічної системи (машини) з мінімальними перетвореннями і втратами. Без сумніву, саме в цьому напрямку потрібно вести подальші наукові пошуки, про що вже згадувалося вище, однак на сучасному етапі розвитку науки і техніки такий підхід дуже складно здійснити через низку причин:

1) відсутність повсюдно доступного первинного джерела енергії достатньої потужності, що забезпечує високу щільність потоку енергії;

2) видалення зі схеми технічної системи двигуна звичної конструкції і, можливо, передавального пристрою принципово змінить ухвалену сьогодні структуру машини загалом.

Відзначаючи про джерела енергії, знову маємо на увазі переважно традиційні НДЕ. Поновлювані джерела, без сумніву, у цьому питанні мають особливе значення, оскільки мають набагато ширший ступінь доступності, ніж невідновлювані. Однак, як уже згадувалося, рівень енергетики на ВДЕ незрівнянно нижче, ніж на НДЕ. Повторимо, що зміна цієї пропорції – невідворотна справа майбутнього, фундамент якого необхідно закладати вже сьогодні. На підставі вищесказаного ми знову дійшли до обґрунтування нової тенденції, пов'язаної з принциповою зміною структури, принципів роботи, способами управління й енергозабезпечення, зовнішнім виглядом машин і техніки загалом, що і відповідає законам розвитку ТС.

Отже, ми виділимо два принципово важливих, на наш погляд, завдання фундаментальної лінії розвитку насособудування на «дальню» перспективу в процесі переходу до VI технологічного укладу. Вони полягають у зміні звичної структури машини, тобто ліквідації її в нинішньому розумінні, а також широке використання ВДЕ і масштабного створення в підсумку безмашинного виробництва або ж машинного, заснованого на нових гармонійних засадах розвитку людського суспільства і природи. Цей факт можна відобразити фактичним внесенням до складу машини, що працює на нових принципах, первинного джерела енергії (рис. 3.7).

Зазвичай ця схема репрезентована на основі аналогій із попередніми, побудованими на підставі сучасного досвіду. Можливо, навіть, її можна ще спростити. Ми не можемо зараз достовірно описати особливості роботи і структуру машин майбутнього, які будуть пра-

цювати, до того ж на інших принципах, але загальне уявлення і напрямок розвитку, на наш погляд, задані правильно і будуть детально розглянуті далі. Пропоновані в цій роботі концептуальні способи удосконалення насосного обладнання, обґрунтування перспектив цих технічних систем у майбутньому, на наш погляд, являють собою нові «точки зростання» знань – необхідні для розвитку згустки негентронії – особливо необхідні зараз, у момент вступу людства до нового технологічного укладу.

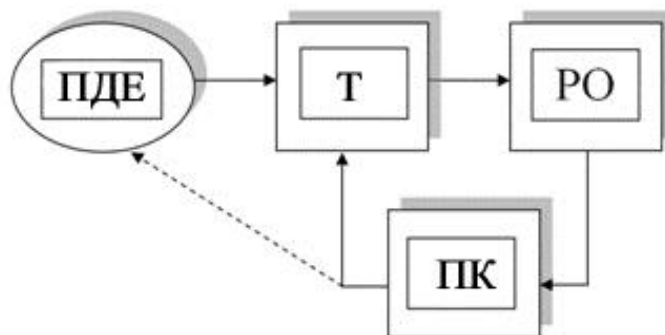


Рисунок 3.7 – Передбачувана схема машини епохи VI і майбутніх ТУ

Викладені вище ідеї, на наш погляд, гармонійно пов’язані з другим законом розвитку ТС і впливають у підсумку з нього. Вони будуть ширше розглянуті і доповнені під час висвітлення відповідних законів групи «динаміка».

Розглянемо ще декілька питань щодо застосування другого закону. Передання енергії від однієї частини ТС до іншої може бути речовинною (через вал, шестерню, робоче колесо тощо), польовою (магнітне поле, електричний струм) і речовинно-польовою (потік заряджених частинок). Завдання розроблення і вдосконалення ТС саме і зводяться до підбору поля і виду передання, найефективніших у цих умовах (тобто з максимальною ексергією).

Водночас необхідно дотримуватися таких рекомендацій:

1) під час розроблення і вдосконалення технічних систем потрібно прагнути до використання єдиного поля (єдиного виду енергії) на всі процеси роботи і керування в системі. У стадії розвитку (розгортання) ТС будь-які нові підсистеми повинні працювати на тому виді енергії, що проходять через систему, або на «безкоштовній» (ВДЕ, енергоємні відходи інших систем тощо);

2) якщо ТС складається із речовин, які неможливо змінювати, то використовується поле, що добре проводиться речовинами системи (вони повинні бути «прозорими» для обраного поля);

3) якщо речовини частин системи можна змінювати, то поле, яке погано керується, змінюють на добре кероване за ланцюжком: гравітаційне → механічне → теплове → магнітне → електричне → електромагнітне. Зазначимо, що пошук найбільш ефективних сполучень полів і речовин, перехід до легкокерованих полів і відбір чутливих до них речовин повинен відбуватися за допомогою впровадження найбільш прогресивних технічних рішень (які підвищують ексергетичний ККД та, відповідно, ідеальність системи). І ці рішення будуть завжди розміщуватися в кінці наведеного вище ланцюжка.

Далі, на наш погляд, найорганічнішим вбачається розглянути можливості прямих перетворень видів енергії, зосередивши увагу на перспективах їхнього застосування для передання енергії рідині.

3.2.3.1 Можливості прямих перетворень видів енергії

Як відомо, матеріальний світ, що нас оточує – рухома матерія – існує у двох основних формах: речовини, що має корпускулярні властивості, і фізичного поля, якому притаманні хвильові властивості⁸⁵.

У межах цих категорій сучасна наука розрізняє:

- чотири основні частки речовини: молекула, атом, нуклон і електрон;
- чотири основних поля: ядерне (мезонне), електромагнітне (фотонне), нейтринне і гравітаційне;
- два види руху: неупорядкований (для мікрочастинок він називається тепловим) і впорядкований (розрізняють кілька залежно від носія і джерела руху).

Водночас існують скалярна і векторна міри руху матерії. Під ними маємо на увазі енергію й імпульс відповідно. Щодо технічної системи енергія – міра здатності системи здійснювати роботу, і навпаки – кількість роботи є мірою енергії системи.

Крім того, виділяють дві групи видів енергії: потенційні (енергії положення, тобто «напруженого стану») і кінетичні (енергії руху).

На основі сукупності цих понять складена така класифікація видів енергії.⁸⁶ Вважаємо за необхідне навести її в повному обсязі, оскільки це дозволить уникнути неясності в подальшому аналізі та розумінні суті пропонуваніх рішень:

1. Анігіляційна енергія – повна енергія системи «речовина – антиречовина», що звільняється в процесі анігіляції у вигляді електромагнітної, мезонної, теплової та інших видів енергії.

2. Ядерна енергія – енергія зв'язку нуклонів у ядрі, що звільняється в різних видах під час розподілу важких і синтезі легких ядер. В останньому разі її заведено називати «термо-ядерною». Носіями ядерної енергії розподілу є важкі елементи, які піддаються поділу в одноступінчастому режимі – U_{235} , Pu_{239} , у двоступінчастому – U_{238} , Th_{232} . Останні діляться швидкими нейтронами з отриманням нових ядерних палив – U_{233} , Pu_{239} . Термоядерному синтезу піддаються найлегші елементи – ізотопи водню.

3. Хімічна (атомна) енергія – енергія системи з двох і більше реагентів, що звільняється внаслідок перебудови електронних оболонок атомів і молекул за їхньої взаємодії в процесі хімічних реакцій. Носії хімічної енергії – різні комбінації палив (органічних, неорганічних, природних, штучних) і окиснювачів (речовин, що містять Cl_2 , O_2 , F_2).

4. Гравістатична енергія – потенційна енергія ультраслабкої взаємодії (тяжіння) усіх тіл, пропорційна їхнім масам. Практичне значення в земних умовах має енергія тіла, яку вона накопичує, долаючи силу земного тяжіння. Ця енергія вивільняється в разі усунення сили, що врівноважує силу земного тяжіння. Носіями гравістатичної енергії можуть бути тіла, здатні занурюватися у воду (будь-яку рідину) під дією сили тяжіння і підніматися вгору під дією підйомної сили Архімеда, а також тіла легші, ніж повітря (суміші атмосферних газів).

5. Пружна енергія – це потенційна енергія механічно пружно зміненого тіла – твердого, рідкого, газоподібного (пружина, стиснений газ тощо), що звільняється за умови зняття навантаження. Носії пружної енергії – відповідно стиснені гази і пружини (рідини

⁸⁵ Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике. Ч.1 ; Ч. 2: Современная наука о природе. Законы механики. Пространство. Время. Движение / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс ; под ред. Я. А. Смородинского. – 3-е изд. – Москва : Мир, 1976. – 439 с.

⁸⁶ Алексеев Г. Н. Энергоэнтропика / Г. Н. Алексеев. – Москва : Знание, 1983. – 196 с.

практично нестисливі, крім силіконових, що мають високу пружність і здатні запасати значну кількість енергії)⁸⁷.

6. Електростатична енергія – потенційна енергія взаємодії (тяжіння різнойменних і відштовхування однойменних) електричних зарядів. Тобто це запас енергії електрично зарядженого тіла, що накопичується у процесі подолання сил електростатичного поля. Носіями електростатичної енергії переважно є конденсатори з невеликою енергоємністю. Їхнє застосування обмежене випадками, коли необхідно отримати високі розрядні напруги (50–60 і більше кВ).

7. Магнітостатична енергія – потенційна енергія взаємодії «магнітних зарядів» (реально не наявних). Це запас енергії, що накопичується тілом, здатним долати сили магнітного поля в процесі руху проти цих сил (гальмування). Водночас джерело магнітного поля не має значення. Це може бути постійний магніт або електричний струм. Носії магнітостатичної енергії – електро- та постійні магніти. Збільшення їхньої енергоємності відбувається за допомогою освоєння надпровідних магнітних систем і особливо магнітомістких матеріалів.

8. Нейтриностатична енергія – потенційна енергія слабкої взаємодії «нейтринних зарядів», або запас енергії, що накопичується у процесі подолання сил «нейтринного поля». Варто зазначити, що внаслідок величезної проникної здатності нейтрино накопичити енергію таким способом на сучасному рівні розвитку техніки практично не можливо.

9. Теплова енергія – частина енергії невпорядкованого (хаотичного) теплового руху і взаємодії частинок тіл, яка звільняється за наявності різниці температур між цим тілом і тілами навколишнього середовища. Серед носіїв теплової енергії виділяють два види систем – природні (геотермальні шари – водовмісні і сухі різної температури (зокрема вулкани), а також атмосфера і світовий океан різної температури) і штучні (розплави металів, перегріті рідини, пара і гарячі технологічні гази).

10. Механічна енергія – кінетична енергія рухомих макросистем (твердих, рідких, газоподібних тощо) і вільно рухомих мікросистем (одна частинка). Носії механічної енергії також як і теплової поділяються на природні системи (потoki повітря в атмосфері, потоки води в річках і морях) і штучні (обертотви за інерцією тіла, наприклад, маховики).

11. Електродинамічна (електрична) енергія – це енергія руху електричних зарядів, енергія електричного струму в усіх його формах. Особливо підкреслимо, що електрична енергія служить здебільшого переносником енергії електропровідними каналами на далекі відстані.

12. Електромагнітна (фотонна, променева) енергія – енергія руху фотонів електромагнітного поля. Джерелами електромагнітної енергії для людства є насамперед Сонце, а також певною мірою лазери (оптичні квантові генератори).

13. Гравідинамічна (гравітонна) енергія – енергія руху гіпотетичних квантів гравітаційного поля – гравітонів⁸⁸.

14. Мезонна (мезодинамічна) енергія – енергія руху мезонів – квантів ядерного (мезонного) поля, за допомогою обміну якими взаємодіють нуклони.

15. Нейтринодинамічна енергія – енергія руху потоку нейтрино.

⁸⁷ Яхно О. М. Гідравліка ньютонівських рідин : навч. посіб. / О. М. Яхно, В. І. Желяк. – Київ : Вища шк., 1995. – 199 с. + Гриф МОН.

⁸⁸ Гравитационные волны обнаружены! // Вселенная, пространство, время. – 2016. – № 2 (139).

На підставі наведеної класифікації ясно видно, що з усіх видів енергії на сьогодні поки не мають практичного значення анігіляційна (немає джерел на Землі), мезонна, гравідинамічна, нейтриностатична, нейтринодинамічна енергії. Вони непридатні для технічного використання, тобто з урахуванням сучасного розвитку техніки нинішнього V технологічного укладу мають фактично нульову працездатність – ексергію⁸⁹. Це прерогатива майбутніх технологічних укладів. Зараз системи-носії цих енергій можуть бути тільки накопичувачами.

Загалом цінність класифікованих видів енергії для практичного використання визначається:

- наявністю і величиною їхнього ресурсу на Землі;
- здатністю до відновлення цих ресурсів;
- можливістю безпосереднього використання;
- можливістю накопичуватися і зберігатися;
- можливістю економно передаватися на далекі відстані;
- здатністю економно перетворюватися у використовувані види;
- швидкістю перетворення на інші види;
- концентрацією;
- впорядкованістю.

Можна стверджувати, що ці критерії прийнятні для характеристики видів енергії за будь-якого технологічного укладу.

З решти 10 видів енергії тільки 5 (ядерна, хімічна, тепла, механічна, електромагнітна) є первинними (ПДЕ) – що містяться в природі у вигляді різних енергетичних ресурсів. Вторинними джерелами енергії (ВтДЕ), тобто такими, на які можуть бути безпосередньо перетворені ПДЕ, репрезентують вже більш широку групу видів енергії. До ВтДЕ належать гравістатична, електростатична, магнітостатична, пружна, хімічна, тепла, механічна і електромагнітна енергії.

На сьогодні безпосередньо, тобто для виконання корисної роботи використовують лише 3 види енергій: теплову (~69 %), механічну (~28 %), електромагнітну (~3 %) ⁹⁰. Розкриємо механізм процесів отримання безпосередньо використовуваних видів енергії.

Теплова енергія виникає як результат:

- «короткого замикання електронних струмів» під час хімічних реакцій;
- зіткнення частинок, що утворюються під час ядерних реакцій із частинками інших тіл – (теплоносіїв);
- створеної тим чи іншим способом різниці температур між тілом і довкіллям;
- у всіх процесах тертя.

Механічна енергія виникає:

- у вигляді упорядкованого руху потоків частинок (потоки рідин і газів);
- як результат зміни об'єму робочого тіла (газу, пари);
- у разі зміни положення тіла в просторі (пружини та інші пружно-деформовані елементи, тіло, що падає).

⁸⁹ Янговский Е. И. Поток энергии и эксергии / Е. И. Янговский. – Москва : Наука, 1988. – 144 с.

⁹⁰ Клочков В. В. Управление развитием «зеленых» технологий: экономические аспекты : монография / В. В. Клочков, С. В. Ратнер // Ин-т проблем упр. им. В. А. Трапезникова Рос. акад. наук. – Москва : ИПУ РАН, 2013. – 292 с.

Всі ці рухи легко перетворюються на потрібний рух робочого органа.

Отже, щодо наявного і перспективного насосного обладнання, яка здійснює передання енергії рідині, застосовуємо саме механічну енергію потоку її частинок.

Електрична енергія (електрорушійна сила) виникає внаслідок здійснення процесів:

- поділу та збору на різних полюсах електричних зарядів різного знаку (під впливом механічних, теплових та інших впливів);
- електромагнітної індукції (за умови перетину провідників магнітного поля).

Найважливішим питанням для розвитку техніки і прогресу людства є здатність здійснювати безпосередні (прямі) перетворення одних видів енергії на інші.

Варто зазначити, що для здійснення прямих перетворень енергії потрібна наявність певних властивостей у системи, за допомогою якої відбувається процес перетворення, а також наявність належного рівня концентрації енергії (щільності потоку енергії) у перетворюваного виду. Природно всі види перетворень можна розділити на 2 групи (що відповідає різним рівням розгляду процесів у системах, про що йшлося вище):

- мікроскопічні, здатні відбуватися в разі взаємодії окремих частинок (перетворення, насамперед, ядерної та хімічної енергії);
- макроскопічні – відбуваються тільки в макросистемах.

На підставі аналізу наявних на цей момент технічних можливостей прямого перетворення енергії в Інституті наукової і технічної інформації складена матриця можливих, що мають практичне значення, перетворень енергії (рис. 3.8)⁹¹.

Потрібно звернути увагу, що ця матриця відображає стан справ за V технологічного укладу, який ще значною мірою панує сьогодні. Однак одночасно в ній наочно відображені перспективні можливості безпосередніх перетворень видів енергії, які є основою технологій майбутнього. До того ж, на нашу думку, потрібно також звернути увагу на ті можливі перетворення енергії, які не мають на сьогодні практичного інтересу, проте потенційно можуть стати потрібними в майбутньому. Тому, на нашу думку, розглядаючи енергетичні перспективи VI та наступних технологічних укладів, потрібно звертати увагу і на потенціал тих перетворень, які сьогодні не становлять практичного інтересу. Реалізація відповідних перетворень може відкрити для людства в умовах вичерпання традиційних невідновлюваних джерел енергії нові енергетичні можливості.

Розуміючи механічну енергію як енергію, що виникає у вигляді упорядкованого руху потоків частинок (потоки рідин і газів), а також на підставі аналізу наведеної матриці, виділимо такі резерви прямого перетворення енергії, які мають потенціал реалізації для принципово нового насосного обладнання в межах переходу до VI технологічного укладу:

- ядерної на механічну;
- хімічної на механічну;
- магнітостатичної на механічну.

⁹¹ Алексеев Г. Н. Прогнозное ориентирование развития энергоустановок / Г. Н. Алексеев. – Москва : Наука, 1978. – 200 с.

№	Вид енергії	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Ядерна	+	-			-	-		-		-
2	Хімічна		-						+		-
3	Електромагнітна		+						+	+	
4	Гравістатична				-	-					
5	Пружна				-		-		-		+
6	Електростатична								-		
7	Магнітостатична										-
8	Електрична		-								
9	Теплова								+		
10	Механічна									+	
	Перетворення неможливо										
	Перетворення можливо, але практичного інтересу не становить										
-	Перетворення можливо, становить практичний інтерес, але поки що практично не використовується										
+	Перетворення можливо, становить практичний інтерес, використовується частково										
	Перетворення можливо, становить практичний інтерес, використовується широко										

Рисунок 3.8 – Матриця можливих перетворень енергії, що мають практичне значення

Відзначимо, що в цьому аналізі не залишені без уваги і деякі інші можливі перетворення енергій. Крім того, необхідно відразу підкреслити, що пряме перетворення ядерної енергії на механічну енергію рідини є специфічним через неминуче радіаційне забруднення перетворювача і потоку самої рідини. Це значно звузило сферу можливого застосування такого перетворення навіть без урахування особливостей його технічної реалізації. На підставі цього можливості реалізації такого перетворення не розглядаються в цій роботі.

Бачимо, що всі виділені способи перетворень енергії можуть здійснюватися тільки на мікрорівні – рівні взаємодії окремих частинок. Цей висновок повністю узгоджується з характеристикою VI ТУ як епохи широкого розвитку і впровадження нанотехнологій, про що було сказано вище, а також корелює із наступними законами розвитку технічних систем (особливо групи «динаміка»). У відповідних наступних пунктах будуть розглянуті питання реалізації окреслених перетворень.

Потрібно зазначити, що такі ідеї поділяються кафедрою прикладної гідроаеромеханіки (ПГМ) Сумського державного університету. Зокрема про необхідність оптимізації та скорочення ланцюжка перетворень видів енергій від первинних джерел до насосних агрегатів, а також про необхідність досліджень передання енергії рідині на рівні окремих частинок відзначає професор І. О. Ковальов, а також згадує професор А. О. Євтушенко під час розгляду питання прогностичного визначення основних напрямків розвитку науково-дослідних робіт у насособудуванні^{92, 93, 94}.

⁹² Ковалев І. А. О возможности изменения энергии жидкости на микроуровне / И. А. Ковалев // Тезисы докладов научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов. – Сумы : СумГУ, 1996. – С. 5.

⁹³ Ковалев І. А. Постановка задачи изменения энергии жидкости путем энергопередачи на микроуровне / И. А. Ковалев // Гидромеханика в инженерной практике : научно-техническая конференция. – Киев, 1996.

⁹⁴ Развитие теории рабочего процесса. – С. 342.

Щодо закону енергетичної провідності системи настанок зазначимо таке. На підставі викладеного вище, можна запропонувати певну послідовність питань щодо застосування цього закону під час розгляду перспектив еволюції та розвитку насосів (зокрема і синтезу принципово нових систем):

- чи є в системі наскрізний прохід енергії;
- чи є гарна провідність між частинами ТС і органами керування;
- яке з полів найкраще проводить речовини в системі;
- яке поле краще використати для нової ТС – наявне, інше чи «дарове» (альтернативні та відновлювані джерела енергії)?

До речі, наведемо наслідок із закону енергетичної провідності системи: щоб частина системи була керованою, необхідно забезпечити енергетичну провідність між цією частиною й органами керування. З цього наслідку перед нами ще раз постає питання керування на рівні насосного агрегата: чи можна зробити таку систему яка б могла змінювати параметри напору і подачі, працюючи водночас із незмінно високою ефективністю? Поміркуємо детально над цим питанням, розглядаючи закон динамізації технічних систем (п. 3.2.5).

Зазначимо ще також, що питання енергопередачі потрібно детально розглянути не тільки (а може, і не стільки) на рівні «джерело енергії» → «технічна система», а на рівні (для насоса) «робочий орган» → «перекачуване середовище». Це обумовлює необхідність ретельного дослідження самого перекачуваного середовища як системи, його структури, принципів функціонування і руху.

3.2.4 Закон узгодження ритму частин системи

Необхідною умовою принципової життєздатності ТС є узгодження (або свідомо неузгодженість) частоти коливань (періодичності роботи) всіх частин системи. У законі йдеться про те, що гарно працюють і загалом життєздатні тільки ті системи, у яких вид коливань підібраний так, щоб частини системи не заважали одна одній і якнайкраще виконували корисну функцію. Розглядаючи цей закон щодо динамічних насосів типових конструкцій, можна констатувати, що загалом він виконується – частини системи узгоджені, і резонансу (а саме цей ефект є основою закону) не виникає.

Завдяки певним умовам під час роботи насоса виникають інші (назвемо їх «локальними») негативні явища, насамперед шум і вібрація. Вони загалом вивчені, їхні причини, наслідки та способи боротьби широко репрезентовані у відповідних джерелах, тому зупинятися на цьому не варто. Зазначимо також, що безпосередньо вібраційні та резонансні ефекти корисно не використовуються.

Закінчуючи розглядати закони групи «статика» щодо насосів, підсумуємо. Як уже зазначалося вище, насос (насосний агрегат) як система має необхідну структуру (основні складові), у ньому відбувається наскрізна енергетична провідність, а також узгоджений ритм частин системи. Відповідно можна зазначити, що стадію становлення динамічні насоси, безумовно, пройшли. Це також добре видно з досвіду їхнього проектування та експлуатації (див. розділ I). Цей висновок безпосередньо допоможе нам визначити місце насосів на загальній схемі розвитку технічних систем, відповідне питання про що ставилося раніше.

Наостанок зазначимо, що потенційні можливості щодо відкриття нових перспектив передавання енергії рідині цей третій закон може дати, на наш погляд, у разі застосування його для розгляду самої рідини (насамперед води) як системи. Ця ідея також вже була запро-

понована вище. Можливо, певний потенціал тут матиме використання резонансних коливань і вібрацій для «накачування» певного об'єму води енергією. Дещо схожий ефект використовується в лазерах. Додамо, що також вигідно узгодження (або навпаки) не тільки власних частот коливань, але й просто певних характеристик, що впливають на цю частоту – швидкості, маси, розмірів, форми, пружності тощо.

Далі перейдемо до розгляду блоку законів «кінематики».

3.2.5 Закон динамізації технічної системи

Жорсткі системи для підвищення своєї ефективності повинні ставати динамічними, тобто переходити до більш гнучкої структури (структури, що може швидко змінюватися, – трансформуватися) і до режиму роботи, що підлаштовується до змін зовнішнього середовища.

Від створення і на перших етапах розвитку технічні системи мають, звичайно, жорсткі внутрішні зв'язки, у них відсутні підсистеми для зміни режиму роботи залежно від коливань зовнішніх умов. Такі системи мають проблеми з надійністю і довговічністю, а також невідповідністю реальних режимів роботи розрахунковому з максимальною ефективністю. Це зокрема стосується і динамічних насосів. Дійсно, ці машини являють собою відносно жорстко структуровані системи, що фактично не мають потенціалу до самоорганізації, а їхній режим роботи взагалі вбачається дещо дискретним.

Але відомо, що чим жорсткіші вимоги до системи, тим швидше вона динамізується. Отже, чи можемо ми казати, що стоїмо на порозі бурхливої динамізації насосного обладнання? Зі значною часткою обережності все ж припустимо, що так, особливо зважаючи на окреслені вище глобальні трансформаційні тенденції ХХІ сторіччя.

Зазначимо, що використання закону динамізації здатне значно поліпшити не тільки процес пошуку рішень тих чи інших проблем цієї ТС, але і точно формулювати завдання пошуку перспектив подальшого розвитку.

Оскільки будь-яка технічна система проходить стадію динамізації, необхідно визначити, на якому етапі вона перебуває в цей момент і визначити наступні кроки її еволюції. Для цього необхідно визначити «слабкі місця» системи і керуватися таким правилом: динамізується насамперед та частина системи, яка відчуває найбільший шкідливий вплив зовнішнього середовища (природні, від перекачуваного середовища, антропогенні, від інших ТС тощо).

Логічно припустити, що в насосі найбільш інтенсивний шкідливий вплив отримує проточна частина і робочий орган (робоче колесо) як її роторний елемент. Отже, у насосі передусім має динамізуватися саме робочий орган, проходячи відповідний ланцюжок динамізації (який буде розглянутий нижче). Навколо принципово нових робочих органів буде формуватися і відповідна нова ТС, корелюючи в ідеалі з положеннями VI технологічного укладу.

До того ж робоче колесо відцентрового насоса цілеспрямовано змінює тільки лінійні швидкості руху вздовж двох координатних осей. Водночас кінетична енергія рідини загалом складається з дев'яти складових, про що згадувалося вище. Чи можна корисно використовувати хоча б ще деякі з них разом із тими, що вже використовуються?

Загалом динамізація технічних систем відбувається за допомогою переходу від нерухомих частин до рухомих; до жорстких частин чи конструкцій вводяться шарніри або вони замінюються на гнучкі, а надалі – на гідро- та пневмоконструкції; корисно використо-

вуються вібрації, періодична зміна форми тощо. Для наступних етапів впровадження динамізації характерне використання вже фізичних і хімічних ефектів та явищ, введення зворотного зв'язку, початок самоорганізації, заміна підсистем і системи загалом «ідеальними» речовинами, загальна інтелектуалізація техніки.

Головний зміст динамізації загалом полягає в тому, що система перестає оминати негативний вплив певного зовнішнього фактора. Вона насамперед підвищує свою життєздатність і пристосовується до наявних у цей момент часу умов, до щораз більших потреб людини і суспільства.

Щодо систем, які передають енергію рідині, постає таке концептуальне питання. Чи можливо в ідеалі створити таку насосну систему (або їхню нечисленну групу), яка маючи максимально гнучку структуру (що, безумовно, забезпечуватиме виконання головної корисної функції), так би самоорганізовувалася у процесі роботи, щоб з однаково високою або близькою ефективністю вона змогла б покрити всі потрібні сьогодні (і актуальні в майбутньому) поля характеристик?

Потрібно прагнути до реалізації тією чи іншою мірою саме такої системи, оскільки це, на наш погляд, і є кінцевою точкою способу еволюції насосних систем – згадувана точка гармонії. Водночас, звісно ж, припускаємо, що для реалізації способу розвитку саме до такої системи буде потрібно багато часу, який може охопити епохи декількох наступних технологічних укладів.

Для того, щоб розробити план конкретних дій в окресленому вище напрямку, розглянемо два способи розвитку технічних систем, які ґрунтуються на законі динамізації:

1. Динамізація речовини системи. Вона відбувається за ланцюжком: один шарнір → багато шарнірів → гнучка речовина → рідина → газ. Іноді динамізація завершується заміною речовинного зв'язку польовим. Все це ще раз наштовхує на думку про необхідність особливої уваги до розгляду перекачуваної рідини (переважно води) як системи, що здатна до самоорганізації і виконання корисних функцій під дією певних зовнішніх факторів.

2. Динамізація поля. У цьому разі відбувається перехід від постійної дії до імпульсної, далі – до змінних і нелінійних полів та анізотропії середовищ, у яких відбуваються коливання.

Зазначимо, що обидва ланцюжки динамізації відображають лише найбільш характерні етапи змін у системах. Загалом системи під час своєї еволюції не обов'язково будуть проходити всі етапи, а також не всі системи здатні дійти у своєму розвитку до кінця ланцюжків.

На нашу думку, огляд закону динамізації показав, що сучасні потужні насосні системи вже являють собою доволі складні конструкції. Але водночас вже перший закон із групи «кінематика» на рівні виконання головної корисної функції в них майже не відображений. Розвиток відбувається на рівні допоміжних систем – ущільнень, опор ротора, пристроїв передання крутного моменту від двигуна до насоса тощо. Тому ми вже зараз можемо констатувати, що сучасні насоси на загальній схемі розвитку технічних систем ще перебувають на етапі розгортання й ускладнення конструкції своїх підсистем.

З огляду на це мусимо констатувати, що такі машини концептуально не вписуються до VI технологічного укладу. І це абсолютно логічно, оскільки сучасні насоси працюють і розвиваються на підставі ідей, сформованих у самих перших технологічних укладах. Це, як уже зазначалося вище, зумовило певну «динамізацію» ідей щодо подальшого розвитку технічних систем, що передають енергію рідині у XXI сторіччі. Було сформовано два

інтегральних способи розвитку – на «ближню» і «дальню» перспективи. Перший із них передбачає модернізацію наявних систем і конструкцій відповідно до законів насамперед групи «кінематика». Другий спосіб передбачає паралельний пошук можливостей передання енергії рідині на мікрорівні. Вважаємо, що аналіз законів розвитку технічних систем обґрунтовує правильність саме такого підходу в сучасних умовах.

Також, на наш погляд, реалізація «ближньої» перспективи розвитку насособудування ґрунтується на імплементації певною мірою саме закону динамізації ТС і пов'язана з модернізацією робочого органа і проточної частини відцентрових насосів, на яких ми і зосередили увагу, з метою збільшення їхньої головної корисної функції. Ці підходи будуть розглянуті в наступних пунктах і розділах.

3.2.6 Закон підвищення ступеня репольності системи

Розвиток технічних систем відбувається в напрямку збільшення ступеня репольності: нерепольні системи прагнуть стати репольними, а в репольних розвиток відбувається через збільшення числа зв'язків між елементами, підвищення чутливості елементів і збільшення їхньої кількості.

Цей закон справедливий для періоду розгортання ТС. Згадуючи історію розвитку насособудування, бачимо, що, з'явившись, потреба підіймати або транспортувати воду забезпечувалася спершу простим реполем: рідина – робочий орган – сила людини. Під час функціонування першого реполя (як насосних систем, так і всіх загалом) поступово виявляються його недоліки і виникають нові потреби у:

- збільшенні корисної функції;
- приєднанні до ТС нових корисних функцій;
- усуненні шкідливих (побічних) функцій тощо.

Всі ці потреби по черзі втілюються в додаткові підсистеми ТС, у яких, зі свого боку, проявляються власні недоліки. Так виникли усі сучасні складні системи, до яких, безумовно, належать і насоси (про що вже згадувалося вище). Зрозуміло, що складність не може підвищуватися нескінченно, і на певному етапі свого розвитку технічна система стикається з різними обмеженнями, які принципово неможливо усунути. Саме тоді і настає період згортання ТС аж до ідеальної речовини.

Щодо насосних систем, «ідеальною речовиною» можна назвати такий стан перекачуваного середовища, який може забезпечити свій рух у необхідному напрямку. Категорією ідеальної речовини оперують декілька законів розвитку технічних систем, а особливо останній – закон збільшення ступеня ідеальності.

На наш погляд, реалізувати ідею ідеальної речовини хоча б частково можливо за допомогою «модернізації» структури перекачуваної рідини (насамперед води) для безпосереднього прямого передання енергії її частинкам, які, зі свого боку, і почнуть свій спрямований рух. Більш детально про це – у наступних пунктах.

Загальний зміст закону, що розглядається, полягає в тому, що розгортається (ускладнюється) та частина (елемент) реполя, яка зазнає найбільших труднощів під час виконання головної корисної функції системи.

Вочевидь, насосні системи розвиваються за допомогою прибудови допоміжних підсистем (опори ротора, ущільнення, підвід, відвід, вузол розвантаження осьової сили тощо) для забезпечення найефективнішої й оптимальної роботи робочого органа.

Отже, зазначимо, що розгортання реполів – це обов’язковий етап розвитку будь-яких систем. Причому розгортання відбувається так:

– завдяки більш повному використанню тих речовин і полів, що вже наявні (використовуються) у системі (підвищення їхньої ексергії), а також застосуванню «безкоштовних» – альтернативних і відновлюваних джерел енергії. Для насособудування на сучасному етапі розвитку – це насамперед гнучке використання різноманітних приводів, крім електродвигуна, про що вже зазначалося у вступі;

– систему добудовують новими корисно-функціональними підсистемами, які збільшують її головну корисну функцію, але і, відповідно, ускладнюють її, наприклад, використання торцевого ущільнення як переднього ущільнення робочого колеса низької швидкодії⁹⁵.

Зазначимо, що саме так формується певний «передобраз» ідеальних речовин, яким ми дамо характеристику в наступних пунктах. Водночас ускладнення систем може відбуватися за допомогою створення ланцюгового або подвійного реполю. Перший випадок застосовується, якщо необхідно підвищити ефективність репольної системи. Це здійснюється за допомогою перетворення однієї з частин реполя на незалежно керований реполь. Унаслідок отримується ланцюговий реполь за допомогою розгортання:

- речовини в реполь;
- зв’язків у реполі;
- поля в реполі.

Якщо ж маємо погано керований реполь, який потребує підвищення ефективності, причому заміна його елементів недопустима, завдання розв’язується побудовою подвійного реполя за допомогою введення іншого поля, яке гарно піддається керуванню.

Розмірковуючи на тим, наскільки ці тези знайшли своє відображення на еволюційному векторі відцентрових насосів на сучасному етапі, можна констатувати, що ці машини являють собою достатньо розгорнуті системи зі збільшеним ступенем репольності, особливо на рівні підсистем ущільнення, розвантаження осьової сили, опор ротора, з’єднувальних муфт, навіть привода тощо, де можуть використовуватися різноманітні речовини специфічного складу і якостей, а також поля, відмінні від поля дій відцентрових сил. Питання щодо вдосконалення згідно із цим законом робочого колеса і проточної частини загалом, на нашу думку, поки що вбачається риторичним.

3.2.7 Закон нерівномірності розвитку системи

Закон формулюється так. Розвиток частин систем відбувається нерівномірно: чим складніша система, тим нерівномірніше розвиток її частин.

Сутність закону полягає в тому, що нерівномірність розвитку частин системи є причиною виникнення технічних і фізичних суперечностей. Це, зі свого боку, призводить до пошуку подальших потенційних способів для еволюції ТС.

Для системи відцентрового одноступінчастого насоса, наприклад, на рівні головної корисної функції можна сформулювати таку суперечність. Подальше зростання напору насоса обмежено його габаритними параметрами і використаним принципом передавання

⁹⁵ Ковалёв И. А. Исследование путей повышения экономичности ступени центробежного насоса низкой удельной быстроходности : диссертация на соискание научной степени канд. технических наук / Ковалёв И. А. ; науч. рук. Д. Я. Алексапольский. – Харьков : ХПИ, 1970. – 195 с.

енергії перекачуваному середовищу робочим органом – відцентровим лопатевим робочим колесом.

Ми бачимо, що сучасний відцентровий, а особливо багатоступінчастий насос являє собою комплекс підсистем, які перебувають на різних етапах свого розвитку. Досягнуті значні успіхи в розвитку систем, що запобігають витокам рідини, сприймають або компенсують силові прояви, зменшують рівень шуму і вібрацій тощо. Удосконалюються навіть підвідні та відвідні пристрої⁹⁶. І лише робочий орган – головна частина будь-якої технічної системи – у відцентровому насосі концептуально залишається незмінним за своєю конструкцією.

Методи створення робочих коліс⁹⁷ залишаються фактично не змінними впродовж багатьох десятиліть. На підставі наявності «ближньої» перспективи розвитку насосів постулюємо необхідність певної еволюції робочого органа відцентрового насоса як самостійно, так і в сукупності із сусідніми елементами проточної частини відповідно до законів розвитку технічних систем, і насамперед закону динамізації, як уже зазначалося в попередньому пункті, з метою підвищення головної корисної функції системи, тобто зростання напірності насоса.

Повертаючись до закону нерівномірності розвитку системи, зазначимо, що певним наслідком із цього закону є те, що зміна в одній частині ТС призводить до ланцюгової реакції розвитку в інших підсистемах. У підсумку відбувається зміна всієї системи. А задавати цю зміну природно має розвиток і вдосконалення саме робочого органа насоса.

Механізм виникнення нерівномірностей розвитку частин системи має такі особливості:

1) виникає потреба у збільшенні («інтенсифікації») головної корисної функції. Прикладом цьому є, як уже зазначалося, питання збільшення напору конкретного насоса. На підставі зазначеного вище, таке завдання потрібно розв'язувати еволюційним або революційним способом, причому останній фактично передбачає створення технічної системи навколо принципово нового робочого органа. Цей аспект також висвітлювався раніше;

2) для збільшення головної корисної функції системи з'являється потреба підсилити (виділити) деяку властивість певного елемента системи. Водночас у процесі підсилення властивостей елемента порушується взаємодія (узгодженість) з іншими елементами. Отже, і виникають вже згадувані суперечності;

3) ці суперечності вирішуються використанням у системі нових полів, речовин, підсистем тощо. Унаслідок цього досягають певного рівня узгодженості між елементами системи (кожний із яких відбувається власним способом розвитку), який можна порівняти з охарактеризованою в попередньому розділі точкою локальної гармонії. Зрозуміло, що на шляху до ідеальної ТС таких точок може бути доволі багато і в кожній із них інтенсифікується виконання певних корисних функцій у системі.

З такої характеристики механізму виникнення нерівномірностей можемо зробити висновок, що загалом цей закон є справедливим протягом всієї лінії еволюції технічної системи. Так, у період розгортання ТС через нерівномірності розвитку суперечності, що виникають, вирішують за допомогою створення нових корисно-функціональних підсистем, що в підсумку і призводить до збільшення головної корисної функції. У період згортання ТС

⁹⁶ Ольштынський П. Л. Учет особенностей рабочего процесса направляющего аппарата для повышения технического уровня центробежного насоса : диссертация на соискание научной степени канд. техн. наук / П. Л. Ольштынський ; науч. рук. И. Б. Твердохлеб. – Сумы : СумГУ, 2016. – 166 с.

⁹⁷ Расчет и конструирование центробежных насосов. – С. 53.

суперечності, що виникають, вирішують через зникнення підсистем або в підсумку (в ідеалі) самої системи взагалі. Їхні функції передаються надсистемам або їх замінює «ідеальна» речовина, яку «розумно» запрограмувають на виконання цих функцій.

На підставі аналізу попереднього закону щодо систем, які передають енергію рідині, можна зробити висновок, що насоси (на прикладі відцентрових) являють собою доволі розгорнуті системи, еволюція яких активно відбувалася фактично з найдавніших часів і особливо у XX сторіччі (див. розділ I). Тому в перспективі перед насособудівниками в нашому сторіччі під час переходу до VI технологічного укладу постає проблема розроблення таких способів розвитку насосних систем, які б характеризувалися процесами їхнього не розгортання, а саме згортання («дальня» перспектива).

Підкреслимо і нагадаємо, що якнайшвидше ухвалення цього об'єктивного етапу розвитку всіх без винятку ТС і відкриє нові перспективи розвитку насосних систем, широко спираючись на використання альтернативних, нетрадиційних і поновлюваних джерел енергії. Переорієнтація промисловості на їхнє широке залучення – також об'єктивний процес, пов'язаний із суттєвою обмеженістю вичерпних джерел енергії, рентабельні запаси яких людство використовує вже до кінця XXI сторіччя⁹⁸.

Закон нерівномірності розвитку систем, застосований до періоду згортання технічних систем, дозволяє нам зрозуміти подальший, знову ж об'єктивний спосіб їхнього розвитку і, звільнившись від осторог та ілюзій, розробити концепцію подальшої (на «дальню» перспективу) еволюції в цьому разі систем, що передають енергію рідині. Ще раз зазначимо, що ці системи, на відміну від інших, принципово і вкрай важливі для людства, тому що забезпечують його найголовнішим життєвим ресурсом – водою. Отже, вбачаємо гармонійний перехід до розгляду законів групи «динаміка», що характеризують саме етап згортання ТС.

3.2.8 Закон переходу з макро- на мікрорівень

Цей закон стверджує, що розвиток робочих органів відбувається спочатку на макро-, а потім на мікрорівні. Інакше кажучи, це означає, що замість робочих коліс і поршнів у майбутньому повинні працювати молекули, атоми, іони, електрони тощо, які легко керуються полями за допомогою відповідних фізико-хімічних ефектів.

Як і попередній, цей закон діє протягом усього періоду розвитку системи. Дотримуючись основної сутності розвитку, – збільшення головної корисної функції – на етапі розгортання ТС відбувається її екстенсивний розвиток, а на етапі згортання – інтенсивний. На першому із зазначених етапів корисна функція системи зростає завдяки збільшенню розмірів, енергоємності, потужності робочих органів і двигунів, тобто на макрорівні. Безумовно, зрозуміло, що такий напрямок розвитку врешті-решт обмежений певними фізичними межами. Тому перехід до інтенсивного способу розвитку технічних систем є незворотним. Його сутність полягає у підвищенні організованості все більш низьких системних рівнів речовини.

На мікрорівні починається:

- задіяння все більш глибоких рівнів речовини;
- вивільнення водночас додаткових енергетичних резервів;
- виявлення і використання нових (невдомих на макрорівні) властивостей матерії;
- застосування більш керованих полів і легкокерованих мікрочастинок речовини.

⁹⁸ Ковальов І. О. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії України : навч. посіб. / І. О. Ковальов, О. В. Ратушний. – Суми : СумДУ, 2016. – 201 с.

Отже, з переходом на мікрорівень вирішуються технічні та фізичні суперечності, що виникають у процесі розвитку систем – протилежні вимоги до властивостей однієї і тієї ж самої речовини.

Загалом перехід на мікрорівень починається, звичайно, з диференціації властивостей, зон і функцій матеріалу робочого органа ТС. Зважаючи на функції робочого органа в насосі, перед нами постає таке завдання. Для подальшого розвитку насосних систем в умовах їхнього згортання необхідно шукати нові способи передання енергії рідині саме на макрорівні. Отже, ідея щодо актуальності такого пошуку, висунута на початку роботи, отримує об'єктивне підтвердження на рівні законів розвитку технічних систем. Причому, на наш погляд, це завдання можна розширити, органічно доповнити і зробити цілісним для подальшого сприйняття і розв'язання. «Зворотним боком» пошуку способів передання енергії рідині на мікрорівні є питання пошуку можливостей «модернізувати» саму перекачувану рідину (у цій роботі робимо акцент на воді), щоб забезпечити її рух на молекулярному рівні; яку можна ввести додаткову допоміжну речовину – «каталізатор» руху; дію яких полів застосувати тощо. Деякі ідеї з приводу цього будуть наведені далі.

Зазначимо, що загальні риси переходу на макрорівень полягають у такому. В окремих зонах робочого органа ТС підсилюються необхідні властивості і відбувається перехід однорідної структури в неоднорідну. Відповідно диференціюються функції – різні зони (частини) органа починають виконувати різні функції. Одночасно для зон, що розділилися, забезпечують найбільш сприятливі умови для виконання їхніх функцій. Диференціація властивостей і функцій призводить до розділення (розшарування, розчленування) речовини. Так, суцільна речовина замінюється в послідовності: шарувате → волокнисте → дисперсне. Водночас окремі частки (шари, волокна, частинки) для сумісного виконання функцій у складі робочого органа об'єднуються так, щоб підсилюючи корисні властивості, знижувати шкідливі.

Наразі також відомі три напрямки переходу з макро- на мікрорівень. Розглянемо кожен із них:

1) збільшення ступеня подрібненості речовини й об'єднання подрібнених частин у нову систему. Цей напрямок розвитку робочих органів ТС відбувається за такою схемою:

- суцільна речовина;
- речовина шарувата, волокниста, матрична;
- дрібні частки;
- кооперації (агрегати) молекул;
- окремі молекули, атоми, іони;
- елементарні частинки;

2) збільшення ступеня подрібненості «суміші» речовини з порожнечою – перехід до капілярно-пористих матеріалів. Цей напрямок реалізується за такими етапами:

- суцільна речовина;
- суцільна речовина з однією порожниною;
- перфорована речовина;
- капілярно-пористий матеріал (КПМ);
- КПМ із певною структурою;
- КПМ у порах іншої речовини;
- цеоліти, гелі.

Зазначимо, що найбільш наочною перевагою переходу до використання капілярно-пористих матеріалів слугує різке зниження маси конструкції за умови збереження міцності, що в умовах дії поля сили земного тяжіння часто стає гарним поштовхом до розвитку систем. Це є доволі актуальним і для насосних систем.

Загалом можна зауважити, що які б фактори не прискорювали розвиток систем у руслі переходу з макро- на мікрорівень, унаслідок цього в технічних системах з'являються рідкодисперсні і капілярно-пористі матеріали. Цей наслідок із закону переходу на мікрорівень, до речі, дозволяє загалом розмірковувати над питанням використання капілярного ефекту в насосному режимі. Це питання буде докладніше розглянуто в наступному пункті;

3) заміна речовинної частини системи на польову. На будь-якому етапі подрібнення речовини (або «сукупності» речовини і порожнечі) може виникнути перешкода для здійснення наступного кроку для розвитку – або не існуватиме потрібна речовина, або зазнає різкого погіршення інша частина (властивість) системи, або існуватиме заборона з боку законів природи. У цьому разі збільшення корисної функції ТС можливо досягти за допомогою заміни частини системи речовиною, яка здатна в разі взаємодії з певним полем виконувати потрібні дії, або самим полем. Причому джерелом поля можуть бути і речовини, що вже наявні в системі або в зовнішньому середовищі.

Зазначимо також, що чим дрібніші частинки в системі, тим легше вони піддаються дії полів, тобто підвищується їхня керованість. Якщо ж у системі немає речовин – джерел поля і немає можливості використати зовнішні поля, то в систему потрібно задіяти речовини, які б могли стати джерелами поля. Часто поля отримують під час введення в систему речовини, що здатна до фазових переходів першого-другого родів. Вони матимуть здатність до самоорганізації, про що вже зазначалося в попередньому розділі.

Далі з урахуванням викладеного вище, зокрема і можливостей прямих перетворень видів енергії, розглянемо деякі конкретні можливості передавання енергії рідині на мікрорівні. Зазначимо, що до цього питання ми будемо повертатися і в наступних розділах.

3.2.8.1 Ефекти турбулентності, вихори та нанороботи

Одним із можливих розв'язань зазначених проблем – перехід до глибокого дослідження турбулентності, що має, по своїй суті, імовірнісний характер⁹⁹ і пов'язане із самоорганізацією в самій рідині. Водночас у турбулентних течіях часто спостерігаються вихрові структури – яскраві приклади процесів, що самоорганізуються. Розглянемо далі докладніше енергетичні можливості самоорганізації структурованої рідини, досліджені спільно кафедрами наноелектроніки і прикладної гідроаеромеханіки СумДУ¹⁰⁰. Потік рідини, що рухається, як відомо, підпорядковується закону Бернуллі, що виражає загальний закон збереження енергії

$$\frac{\rho v^2}{2} + p + \rho gh = const. \quad (3.1)$$

⁹⁹ Климонтівич Ю. Л. Турбулентное движение и структура хаоса: Новый подход к статистической теории открытых систем / Ю. Л. Климонтівич. – 4-е изд. – Москва : URSS, 2014. – 328 с.

¹⁰⁰ Ковалев И. А. Теория кинетической самоорганизации структурированной жидкости / И. А. Ковалев, А. И. Олемской, А. В. Хоменко // Вісник Сумського державного університету. – 1995. – № 3. – С. 3–7.

Водночас величина швидкості, що входить у рівняння, а з нею і кінетична енергія потоку рідини може змінюватися за допомогою зовнішнього впливу. У зв'язку з цим виникає питання, чи можна домогтися зміни швидкості течії, змінюючи внутрішні параметри рідини, а не її макроскопічні характеристики. З теорії лопатевих насосів, а зокрема рівняння Ейлера, бачимо, що зміна параметрів швидкісних компонентів у кінцевому підсумку безпосередньо впливає на напір, що розвивається насосом.

Швидкість течії може спонтанно змінювати свою величину в разі, якщо рідина має яку-небудь дрібномасштабну структуру, що відіграє роль внутрішнього ступеня свободи. З огляду на це можливе встановлення такого режиму, коли енергія внутрішнього ступеня свободи когерентно буде «перекачуватися» на макроскопічний гідродинамічний рівень (що вже, по суті, є аналогією насосного ефекту).

Можливі кілька механізмів його реалізації, наприклад, впровадженням дрібних бульбашок іншої рідини чи газу, що має менше значення в'язкості, ніж вихідна рідина. Якщо молекули рідини мають значну нерівноосність, то можливе застосування ультразвукового впливу на неї для досягнення орієнтації частинок у напрямку течії рідини. Молекули рідини також можуть бути не тільки нерівноосні, але і бути носіями дипольного або магнітного моментів. У такому разі їхнє орієнтування щодо потоку рідини може бути виконано за допомогою впливу електричного або магнітного полів. Відзначимо, що в останньому варіанті буде наявний ефект часткового перетворення магнітостатичної енергії на механічну енергію рідини.

Ефект же збільшення енергії потоку рідини під час реалізації всіх описаних способів впливу на структуру рідини на мікрорівні полягає в мимовільному її переході в якісно новий плинний стан, що характеризується зменшенням ефективної в'язкості рідини (внутрішнього тертя)^{101, 102}. Результати цих досліджень вже являють собою певні кроки до створення ідеальної речовини. Зважаючи на це, ще раз набуває актуальності питання дослідження самої структури і властивостей перекачуваних рідин і насамперед води.

Також потрібно зазначити, що кафедра ПГМ СумДУ є піонером у сфері розроблення теорії і створення вільновихрових насосів (ВВН), у яких процес енергопередачі здійснюється переважно завдяки виникненню поздовжнього тороподібного вихору в робочій камері насоса – «рідкого робочого колеса» (рис. 3.9)¹⁰³. Незважаючи на те, що ВВН являє собою машину, робочий процес якої фактично здійснюється на макрорівні спеціальним робочим колесом, ідеї, закладені в його функціонування, можуть бути певним способом використані під час розроблення принципів передання енергії рідині саме і повністю на мікрорівні.

¹⁰¹ Хоменко А. В. Использование синергетических моделей в теории фазовых переходов конденсированной среды : диссертация на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук / А. В. Хоменко ; науч. рук. А. И. Олемской, В. Ф. Клепников. – Сумы : СумГУ, 1996. – 161 с.

¹⁰² Хоменко А. В. Самоорганизация и формирование низкоразмерных систем при удалении от равновесия : диссертация на соискание ученой степени д-ра физ.-мат. наук / А. В. Хоменко. – Сумы : СумГУ, 2009. – 319 с.

¹⁰³ Герман В. Ф. Свободновихревые насосы : учеб. пособие / В. Ф. Герман, И. А. Ковалев, А. И. Котенко ; под общ. ред. А. Г. Гусака. – 2-е изд., доп. и перераб. – Сумы : СумГУ, 2013. – 159 с.

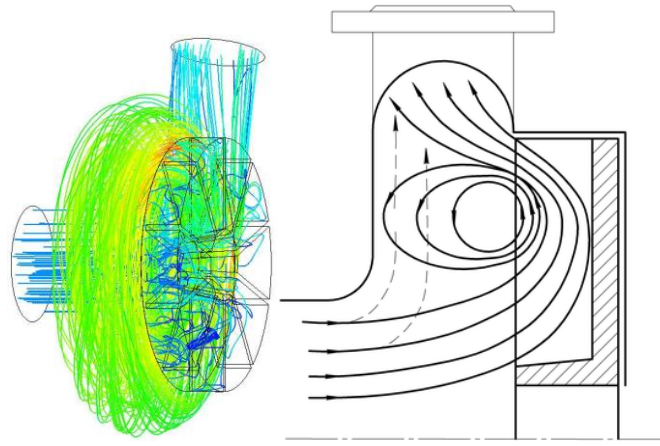


Рисунок 3.9 – Вихрові структури рідини у ВВН

Відповідно на підставі накопиченого значного досвіду можливо припустити рух у напрямку розробки машин нового типу, які здійснювали б енергопередачу за допомогою стабільних вихрових структур. Цей підхід, на нашу думку, можливо реалізовувати в межах як «ближньої», так і «дальньої» перспектив розвитку насособудування. Так, щодо «ближньої» перспективи новим класом лопатевих гідромашин, що певною мірою використовують вихровий робочий процес, реперезентують відцентрові контрроторні насоси, теоретичне і чисельне дослідження яких розпочато на кафедрі ПГМ СумДУ. Контрроторним системам присвячені наступні розділи.

Щодо «дальньої» перспективи в цьому аспекті можна зазначити таке. Певною мірою цікавий також вихровий ефект системи «зубчастих коліс у рідині»¹⁰⁴. Розглядаючи його гіпотетично як насосний, відзначимо його традиційну, механічну сутність передання енергії потоку рідини. Картина взаємодійних між собою вихрових структур, схожих із системою зубчастих коліс, виникає під час проходження потоком заглибини в стінці. Саме в ній і виникають вихори – частина води перетворюється на своєрідні рідкі колеса, стійко зберігає своє місце, масу і напрямок руху (рис. 3.10).

Водночас, як бачимо, не вихори обумовлюють рух потоку, а навпаки. Однак концептуально ідея створення в об'ємі рідини рідкого ж робочого органа, що передає енергію потоку, виглядає досить привабливо, оскільки дозволить «безнасосно» здійснювати перекачування рідини (на підставі традиційного розуміння категорії технічної системи «насос»). Ймовірна реалізація такої ідеї може полягати у впровадженні в основний потік якоїсь речовини з іншими властивостями, яка б і сформувала вихрове рідке робоче колесо за допомогою певного специфічного підведення до неї енергії. Ця ідея також корелює з поняттям ідеальної речовини, що фігурує в теорії розвитку технічних систем.

¹⁰⁴ Покровский Г. И. Гидродинамические механизмы / Г. И. Покровский. – Москва : Знание, 1972. – 48 с.

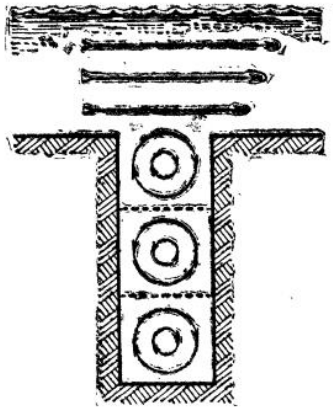


Рисунок 3.10 – Схема виникнення системи взаємно пов’язаних вихорів у потоці, що заповнює заглибину в стінці

Дуже привабливою в цьому разі є можливість використання наномашин – систем, що конструюються на рівні молекул¹⁰⁵, які, об’єднавшись разом, і змогли б створити в потоці рідини макросистему передавання енергії. Варто зазначити, що ці ідеї вже реалізуються сьогодні. Так, дослідники з Каліфорнійського університету в Сан-Дієго надали всьому світу докази того, що створені ними мікроскопічні машини можуть переміщуватися всередині живого організму і доставляти вантаж лікарських препаратів у потрібне місце. Мікродвигун цих машин має хімічну природу, він просуває наноботів завдяки бульбашкам газу, що виділяються у процесі реакції між рідиною всередині організму і матеріалу, запас якого є всередині пересувної капсули.

Роботи, задіяні в експерименті, мали форму трубки, довжиною близько 20 мікрометрів і діаметром 5 мікрометрів. Щойно ці трубки, виготовлені зі спеціального полімеру і покриті досить товстим шаром цинку, вводилися у травний тракт піддослідної тварини і досягали його шлунка, цинк починав реагувати із соляною кислотою, що входить до складу травних соків. Водень, що виділявся одночасно, виривався із внутрішньої порожнини трубок-наноботів, перетворюючи їх на подобу мініатюрних ракет, що рухаються зі швидкістю близько 60 мікрометрів за секунду¹⁰⁶.

В Університеті Райса (США) створили мотор для наносубмарини, що приводиться в дію світлом¹⁰⁷. Складна молекула (рис. 3.11) з 244 атомів під час освітлення ультрафіолетовим світлом із довжиною хвилі 365 нанометрів починає робити обертові рухи «хвостом» приблизно так само, як бактерії, що плавають за допомогою джгутіка.

За кожен оберт пристрій просувається всього на 18 нанометрів, але, оскільки за хвилину її «хвіст» робить більше мільйона оборотів, швидкість наносубмарини дуже велика для мікросвіту – близько двох сантиметрів за секунду. Водночас потрібно зазначити, що поки керувати напрямком руху цього об’єкта неможливо. Однак у контексті питання, що розглядається, можливе практичне застосування цього нанодвигуна в майбутньому вбачається перспективним.

¹⁰⁵ <https://ria.ru/science/20171008/1506408577.html>.

¹⁰⁶ Наноботы спешат на помощь // Открытия и гипотезы. – 2015. – № 2 – С. 20.

¹⁰⁷ Двигатель для наносубмарини // Наука и жизнь. – 2016. – № 5 – С. 11.

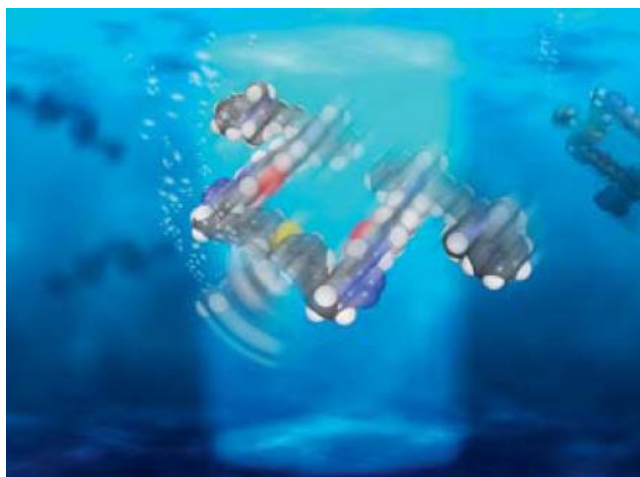


Рисунок 3.11 – Складна молекула – наносубмарина

Такі розробки вже відзначені на найвищому науковому рівні, що доводить їхню перспективність і необхідність людству. Так, Нобелівську премію з хімії за 2016 рік¹⁰⁸ отримали француз Жан-П'єр Саваж, американець Фрейзер Стоддарт і голландець Бернард Ферінга. Вчені навчилися синтезувати молекули, здатні здійснювати запрограмований рух. Результати цієї роботи відкривають спосіб до створення молекулярних машин.

Жан-П'єр Саваж із Страсбурзького університету був одним із перших, хто почав синтезувати катенани, – молекули, що складаються з двох або більше кілець, зчеплених механічно. Він запропонував для їх отримання використовувати іони міді – навколо кожного такого іона з'єднуються два молекулярних напівкілця, які виявляються протягнутими через інше кільце.

Фрейзер Стоддарт (Північно-Західний університет) «навчив» зчеплені молекули рухатися, наприклад, ковзати одна по одній, як це роблять білки в м'язових волокнах, що скорочуються. Крім того, він створив ротоксани – з'єднання, які складаються з циклічної молекули, надітої на молекулу-вісь. Стоддарт вигадав, як змусити кільця в ротоксанах виконувати певні зворотно-поступальні рухи. На основі цих розробок учений створив молекулярні «ліфти», здатні підійматися на висоту 0,7 нанометрів.

Нарешті, третій лауреат, Бернард Ферінга з Університету Гронінгена, створив перший у світі молекулярний мотор, здатний під дією ультрафіолету обертатися у строго визначеному напрямку зі швидкістю до 12 мільйонів обертів за хвилину. Ще у 2011 році Ферінга побудував молекулярну наномашину з чотирма колесами, що працює за тим самим принципом. В іншому експерименті дослідник розкрутив за допомогою молекулярного мотора скляний циліндр довжиною 28 мікрометрів, що у 10 000 разів більше, ніж розміри самого мотора.

Як зазначається в повідомленні Нобелівського комітету, роботи Саважа, Стоддарта і Ферінга можна порівняти з першими кроками з мініатюризації комп'ютерних чипів, котрі викликали комп'ютерну революцію. Але тепер дещо схоже має відбуватися в механіці та машинобудуванні.

¹⁰⁸ Нобелевские премии 2016 // Открытия и гипотезы. – 2016. – № 11 – С. 2–5.

Масове створення таких машин, що являли б собою мініатюрні робочі колеса, введення і розподілення їх у потоці рідини дозволило б дійсно реалізувати передання енергії на мікрорівні, доведення її до кожної частинки рідини. Водночас зазначимо, що в цьому разі реалізується пряме перетворення електромагнітної (фотонної) енергії на механічну, що вже дозволяє певним способом коригувати матрицю можливих перетворень енергії, що мають практичне значення, розширюючи потенціал використання прямих перетворень видів енергії. Про таку можливість уже зазначалося вище. Але це стосується лише самої наномашини. Вона ж передасть рідині механічну енергію лише на мікрорівні.

Тому перетворення фотонної енергії на механічну все ж поки що уявляється екзотичним. На практиці воно знайшло також застосування в експериментальних поки космічних установках, які здійснюють свій рух за допомогою космічного вітрила¹⁰⁹. Однак у земних умовах тиск фотонного потоку буде досить малий через атмосферне розсіювання. Тому використовувати його як приводну енергію досить важко. Це підтверджується ще і тим, що чим більше енергія спадної хвилі, тим більша її частина передається приймачу. В іншому разі енергопередача практично не буде здійснюватися¹¹⁰. Цю проблему можна було б розв'язати істотно підвищивши щільність потоку фотонів енергії, використовуючи, наприклад, ефект лазера. Але як це можна безпосередньо використати для передання енергії рідині залишається під питанням. А ось наномашини як споживачі такої розсіяної енергії пасують дуже вдало.

3.2.8.2 Хімотроніка й осмос

Цікавим вважається розроблення можливостей прямого перетворення хімічної енергії на механічну енергію потоку рідини за допомогою використання так званого «хімотронного насоса», що реалізує електрокінетичний ефект, а також ефект осмосу загалом¹¹¹. Частинки деяких рідин, зокрема, наприклад, дистильованої води, що мають слабку електропровідність, здатні пересуватися під дією електричного поля. Відбувається це тому, що іони у своєму русі від анода до катода здатні захоплювати частинки полярних рідин – диполі. Центри позитивних і негативних зарядів у них значно зміщені щодо один одного.

Розглянемо скляну трубочку, заповнену дистильованою водою (рис. 3.12). Якщо в неї налити рідину з дуже слабкою електропровідністю, то внутрішня поверхня трубочки отримує надлишковий негативний заряд. Водночас сама рідина біля цієї поверхні отримує надлишковий позитивний заряд. Пояснюється це тим, що атоми рідини залишають на склі свої електрони. Отже, на кордоні «тверде тіло – рідина» виникає так званий подвійний електричний шар, у якому спостерігається впорядковане розташування частинок рідини.

¹⁰⁹ Поляхова Е. Н. Введение в теорию солнечного паруса: Космоплавание под солнечным парусом – фантастика или реальность перспектив недалекого будущего? – Изд. 2, испр. и доп. / Е. Н. Поляхова. – Москва : URSS, 2011. – 112 с.

¹¹⁰ Бутиков Е. И. Физика в примерах и задачах / Е. И. Бутиков, А. А. Быков, А. С. Кондратьев. – Москва : Наука, 1989. – 464 с.

¹¹¹ Ломанович В. А. Химотроника / В. А. Ломанович. – Москва : Знание, 1965. – 34 с.



Рисунок 3.12 – Утворення подвійного електричного шару і рух рідини під впливом електричного поля

Внутрішня поверхня скляної трубочки набуває негативного заряду, а дотичні до неї частинки води, атоми яких втрачають електрони, – позитивний заряд. Водночас у щільній частині подвійного електричного шару, який прилягає до поверхні трубочки, сили зчеплення настільки великі, що частинки води залишаються нерухомими. У міру віддалення від поверхні цей зв'язок зменшується – електрокінетичний потенціал зменшується в міру віддалення від поверхні твердого тіла. На деякій відстані зв'язок зменшується настільки, що під впливом зовнішнього електричного поля частина подвійного електричного шару здатна досить вільно пересуватися, захоплюючи за собою молекули води.

Отже, якщо на електроди, розташовані на протилежних кінцях трубки, подати напругу, то іони почнуть рухатися. Вода буде немов би «протискуватися» за невидиму оболонку по трубочці. Швидкість руху рідини буде залежати від декількох параметрів:

- площі перерізу трубки;
- відстані між електродами;
- в'язкості рідини;
- прикладеної до електродів електрорушійної сили;
- діелектричної проникності рідини;
- електрокінетичного потенціалу.

Зазвичай всі перелічені фактори, крім величини електрорушійної сили, що впливає на рідину, постійні для конкретної установки. Отже, швидкість потоку води в трубочці, зображеній на рисунку 3.12, буде прямо пропорційна величині напруги, поданої на електроди, розміщені в її протилежних кінцях.

На рисунку 3.13 зображено пристрій так званого електроосмотичного хімотронного елемента. Камери електроосмотичної клітинки не мають безпосереднього зв'язку між собою, оскільки їх відокремлює одна від одної пориста перегородка. У камерах клітинки встановлені срібні електроди, а як електроліт використовується дистильована вода.

Під впливом постійного струму вода почне поступово просочуватися з однієї камери до іншої. Це легко пояснити з огляду на розглянуте переміщення води в тонкій скляній трубочці (можемо назвати її капіляром) під впливом електричного струму (див. рис. 3.12). Але ж пориста перегородка, що розділяє камери клітинки, по суті, є тисячами капілярів, що з'єднують її анодну і катодну камери. Отже, поведінка води в цих мікроскопічних каналах нічим не відрізняється від попереднього прикладу. Це явище і має назву «електроосмос».

Отже, роботу електроосмотичної клітинки можна порівняти з мікронасосом, що перекачує рідину з однієї камери до іншої. Водночас тиск в одній камері клітинки зростає, а в іншій зменшується. Швидкість «перекачування» води і відповідно величина гідро-

статичного тиску на мембрану залежить від напруги, що подається на електроди клітинки. Відзначимо, що такий мікронасос не зовсім і слабкий: за допомогою напруги 10 В можна створити тиск на мембрану, що дорівнює тиску водяного стовпа висотою 1 м. Водночас кожен секунду з однієї камери в іншу буде перетікати 1 см^3 води.

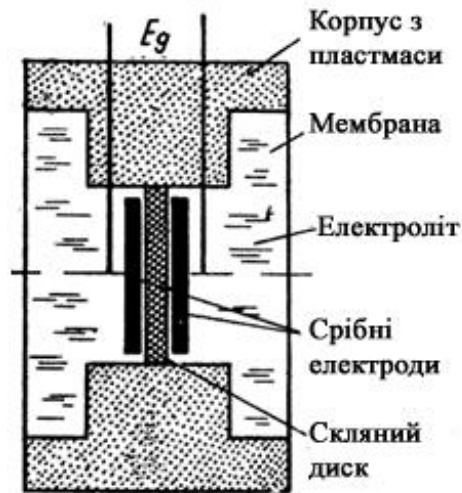


Рисунок 3.13 – Схема електроосмотичного хімотронного елемента

Робочі характеристики електроосмотичної клітинки залежать від:

- параметрів (пористості, товщини і діаметра) напівпроникної перегородки;
- типів робочої рідини.

До того ж у міру необхідності вони можуть змінюватися в досить широких межах.

Отже, можна зауважити, що хімотронні мікронасоси, по суті, є перетворювачами електричної енергії на механічну енергію рідини. Такі пристрої мають низку незаперечних переваг. Вони відрізняються простотою конструкції, відсутністю частин, що труться і зношуються.

Варто зазначити, що в осмотичного ефекту досить широкий потенціал застосування як механізму передання енергії рідині. Загалом осмос – це процес дифузії розчинника (наприклад, води) з менш концентрованої розчину в більш концентрованій¹¹². На відміну від багатьох інших процесів обміну енергією, за наявності відповідних умов процеси осмосу можуть тривати постійно, не зупиняючись ні на мить.

За даними компанії Statkraft, що експлуатує осмотичну електростанцію на узбережжі Норвегії (рис. 3.14), осмотичний тиск може піднімати морську воду на висоту до 120 метрів. Основна проблема, що виникає в разі використання цього ефекту, – створення необхідних осмотичних мембран¹¹³.

Аналізуючи сутність самого осмосу і його можливостей у галузі енергетики, природно бачимо, що використання осмосу в «насосному» режимі, можливо, і має потенціал застосування для перекачування (підняття) насамперед водних розчинів, що містять різні розчинені солі.

¹¹² Общая химия / Н. Л. Глинка ; под ред. В. А. Попкова, А. В. Бабкова. – 18-е изд., перераб. и доп. – Москва : Юрайт, 2013. – 898 с.

¹¹³ Солёный киловатт // Популярная механика. – 2011. – № 1 (99).

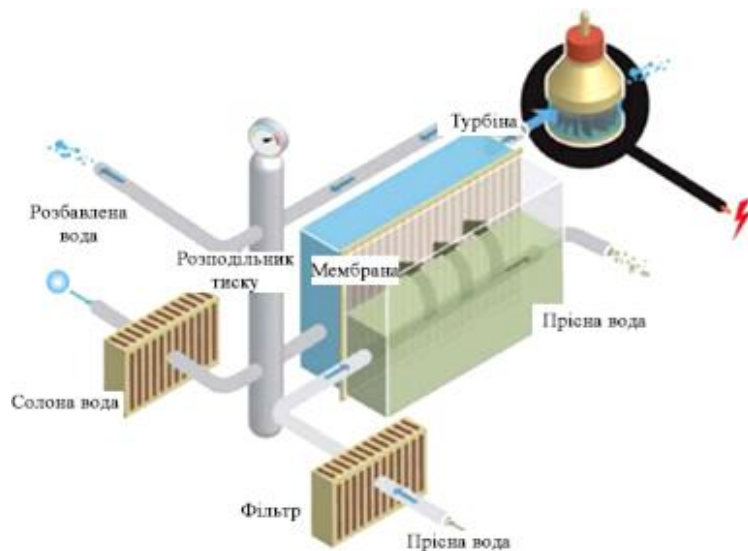


Рисунок 3.14 – Принцип роботи осмотичної електростанції

3.2.8.3 МГД-насос і ефект Юткіна

Ще одним способом передавання енергії рідині, що містить у собі розчинені іони, є використання перетворення магнітостатичної енергії на механічну за допомогою подальшого розвитку теорії і конструкцій з урахуванням розроблення нових матеріалів і сфери застосування магнітних (так званих магнітогідродинамічних) насосів¹¹⁴.

Цей тип насоса являє собою пристрій, що служить для збільшення переважно потенційної енергії перекачуваного середовища способом прямого перетворення енергії електромагнітного поля на механічну енергію потоку, яка містить іони рідини (морської води, розплаву металу тощо). Принципово МГД-насос влаштований так, що його проточна частина розташована між полюсами магнітів і зроблена у вигляді тонкостінної трубки. До її вузьких боків приварені шини-струмопроводи. На них подається постійний струм (рис. 3.15), більша частина якого йде через стінку в перекачуване середовище з дуже низьким опором і лише незначна частина – замкнутим способом через трубку.

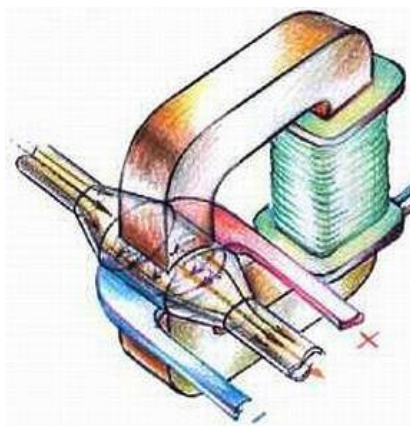


Рисунок 3.15 – Найпростіший МГД-насос

¹¹⁴ Полищук В. П. Магнитодинамические насосы для жидких металлов / В. П. Полищук, М. Р. Цин, Р. К. Горн и др. ; отв. ред. В. А. Ефимов. ; АН УССР. Ин-т проблем литья. – Киев : Наукова думка, 1989. – 256 с.

Цей насос яскраво ілюструє принцип розвитку ТС згідно з розглянутими законами. Тут головну корисну функцію виконує електромагнітне поле замість поля відцентрових сил. Це зумовлює і відповідне згортання робочого органа цього насоса порівняно з відцентровим.

Отже, ще раз зазначимо, що на підставі вищесказаного можна констатувати назрілу необхідність серйозного вивчення внутрішньої структури води та інших перекачуваних рідин у контексті пошуку можливостей передання їм енергії на мікрорівні. Мабуть, лише такий підхід дозволить здійснити якісний ривок у створенні принципово нових систем, що здійснюють передання енергії рідині.

Вельми цікавою, однак, дискусійною, такою, що потребує подальших досліджень з урахуванням сучасних досягнень науки і техніки, є реалізація на прийнятному енергетичному рівні явища електрогидравлічного удару (ефект Юткіна). У цьому разі мова йде фактично про пряме перетворення електростатичної енергії на механічну енергію потоку рідини¹¹⁵. Водночас на сьогодні, на жаль, доводиться констатувати, що цей ефект безпосередньо не має скільки-небудь значущої практичної реалізації, що й знайшло відображення в матриці перетворень енергії (див. рис. 3.8). Однак у цьому разі є і більш широкі можливості застосування ефекту Юткіна в поєднанні з іншими можливостями як способи підвищення енергії потоку рідини. Про це йтиметься в наступному пункті.

3.2.9 Закон переходу в надсистему

Розвиток систем, які досягли своєї межі, може бути продовжений на рівні надсистеми. Одним із способів такого переходу є об'єднання технічних систем із створенням бі- і полісистем.

Загалом об'єднання систем в надсистему вигідно, тому що:

- частина функцій передається в надсистему;
- частина підсистем виводяться із ТС і, об'єднавшись в одну, стають частиною надсистеми;
- в об'єднаних у надсистему систем з'являються нові функції і властивості.

Розвиток самих бі- і полісистем може відбуватися у двох напрямках:

- зі створенням ще більших надсистем;
- зі згортанням декількох систем в одну чи взагалі в ідеальну речовину.

Перший спосіб вбачається як екстенсивний і його можна порівняти із «ближньою» перспективою розвитку насособудування. Другий, відповідно, вважається інтенсивним, спрямованим на «дальню» перспективу і відповідає ідеології VI технологічного укладу. Висловимо тут ще деякі міркування щодо тенденцій розвитку техносфери у XXI сторіччі. Нам здається, що саме VI ТУ стане епохою початку масового «згортання» багатьох відомих нам технічних систем і пошуків нових принципів виконання їхніх головних корисних функцій. На підставі цього два інтегральних способи розвитку насосних систем вбачаються нами як універсальні та актуальні для широкого класу класів техніки.

Повертаючись до закону переходу в надсистему, зазначимо, що сам механізм такого переходу реалізується так. Вихідна одинична система (моносистема) подвоюється із створенням бісистеми. Під час об'єднання декількох систем створюється полісистема. Загалом, об'єднуватися можуть не тільки однакові (однородні) системи, але і системи зі

¹¹⁵ Поздеев В. А. Прикладная гидродинамика электрического разряда в жидкости / В. А. Поздеев. – Киев : Наук. думка, 1980. – 192 с.

зсунутими (які дещо відрізняються) характеристиками, а також різнорідні (із різними функціями) та інверсивні (з протилежними функціями) системи. Проте в усіх випадках об'єднання і злиття систем відбуватиметься за однаковими етапами.

Зазначимо, що перехід систем за ланцюжком «моно – бі – полі» може відбуватися в будь-якому періоді розвитку технічної системи і для будь-якого рівня її ієрархії, тобто цей закон актуальний і для сучасного насосного обладнання. Так, західні насособудівники вже розглядають життєвий цикл насосних систем у складі мережі як єдиного системного комплексу¹¹⁶. Також, на нашу думку, для насосного обладнання особливу увагу привертає рівень робочого органа і його відповідні можливі зміни.

Під час створення бі- і полісистем відбуваються якісні зміни за трьома критеріями: властивості, зв'язки, внутрішнє середовище. Загалом цей процес відображає відомий діалектичний принцип – кількісні зміни мають сенс лише тоді, коли з'являються нові якості (на рівні надсистеми).

Послідовність утворення і розвитку бісистем може бути проілюстрована таким ланцюжком: незалежний (моно-) стан обох систем → схрещення → суміщення → підпорядкування → згортання (функцію однієї системи виконує інша, що підпорядкувала її собі). Зокрема під час створення бісистем, як уже зазначалося, виникає нова властивість (надвластивість або суттєва «добавка» до головної корисної функції). Вона з'являється лише в цей об'єднаній системі. Це є найголовнішим критерієм правильно виконаного переходу «моно – бі – полі».

Зазначимо, що, на нашу думку, існує потенціал щодо переходу до бісистем на рівні робочого органа відцентрових насосів, тобто їхнього розвитку на «ближню» перспективу (сумісно з траєкторією розвитку згідно із законом динамізації).

Далі звернемо увагу на те, що створення різнорідних бісистем більш ефективно, ніж однорідних. В однорідних бісистемах виконується лише одна функція, а в різнорідних – дві. Приклад цьому – вже згадувані вільновихрові насоси, здатні перекачувати доволі великі за розміром включення, маючи фактично два робочі органи.

Як же може з'явитися нова властивість бісистеми? Це досягається тим, що стикування властивостей елементів повинно відбуватися у двох напрямках: частина властивостей додається, взаємопідсилюється (це і буде нова системна властивість), а інша частина властивостей взаємонеутралізується. Отже, у новій системній властивості з'являється можливість домінувати в системі, відігравати в її життєвому циклі головне значення.

Такі «додавання-віднімання» корисних і шкідливих властивостей характерні не тільки для однорідних бі- і полісистем. Здебільшого цей системний ефект проявляється під час створення інверсних систем. Її прикладом може слугувати відцентрово-доцентрова насосна система (див. рис 3.16)¹¹⁷. Вона здатна забезпечити підвищення напору ступеня багатоступінчастого насоса на 30 % завдяки організації в його проточній частині комбінованого відцентрово-доцентрового процесу енергопередачі.

Загалом бісистеми не обов'язково виникають із двох систем. Іноді вигідніше (простіше) перетворити на бісистему одну моносистему, розділивши її, або її певні елементи на дві частини (необов'язково однакові), і з'єднати їх певним способом. Яскравим прикладом

¹¹⁶ Pump Life Cycle Costs: A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems. Executive Summary // Hydraulic Institute and Europump. Published by Elsevier Ltd., 2005.

¹¹⁷ Казнієнко Д. В. Комбінований відцентрово-доцентровий ступінь динамічного насоса лопатевого типу : дисертація... канд. техн. наук / Д. В. Казнієнко ; наук. кер. І. О. Ковальов. – Суми : СумДУ, 2014. – 131 с.

цього, на нашу думку, є відцентрові контрроторні і двоярусні лопатеві системи певних конструкцій.¹¹⁸ Використання перших може дуже істотно підвищити напір насоса, і вони будуть розглянуті в наступних розділах. Останні ж являють собою приклад певного подвоєння робочого органа відцентрового насоса (головного елемента силової взаємодії машини з потоком рідини – лопаті). Використання робочих коліс із схожою лопатевою решіткою (рис 3.17) позитивно впливає на напір і ККД насоса¹¹⁹.

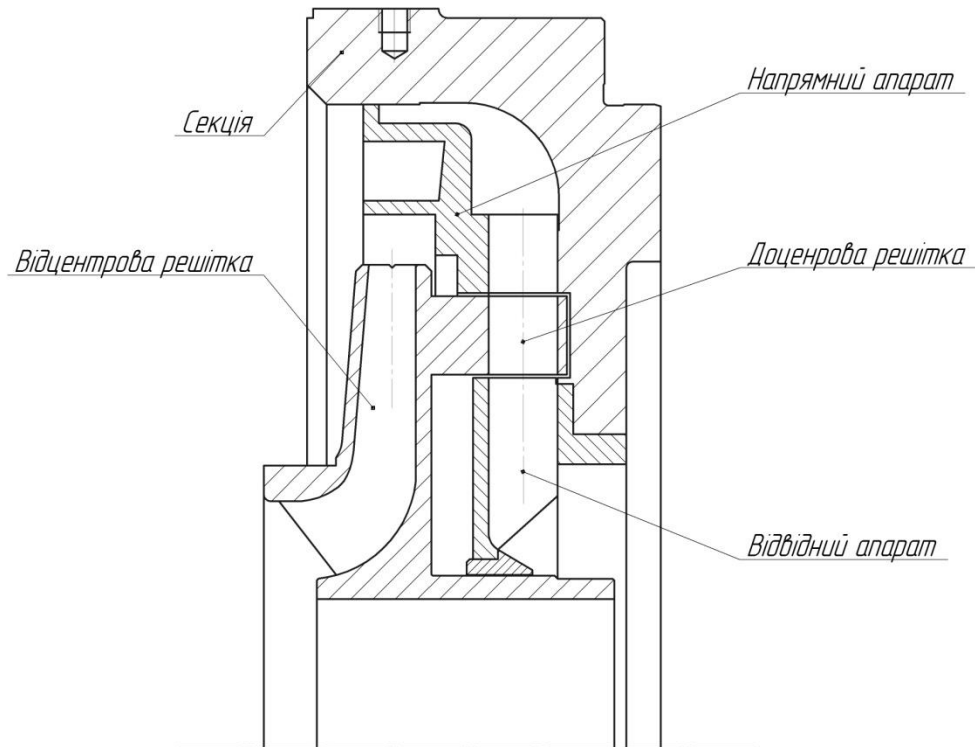


Рисунок 3.16 – Конструкція комбінованого відцентрово-доцентрового ступеня

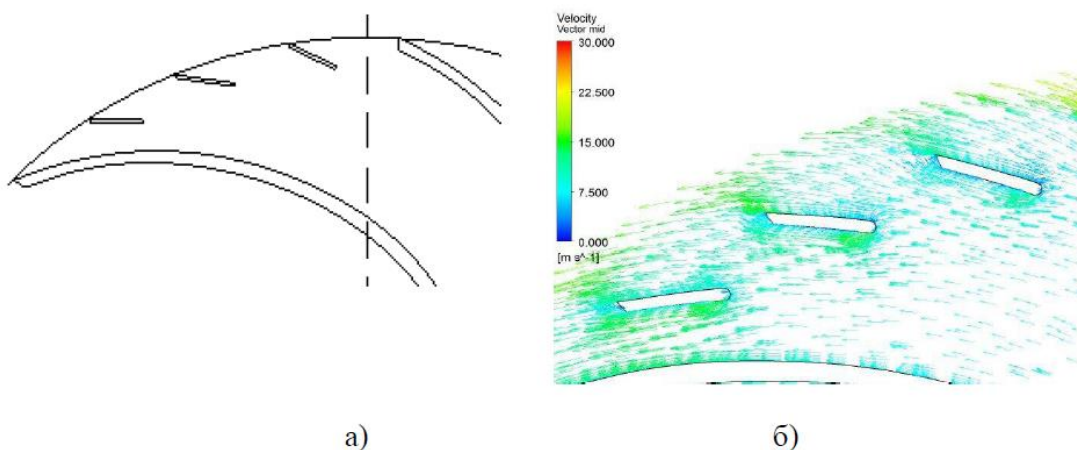


Рисунок 3.17 – Двох’ярусна лопатева решітка: схема (а) і розподіл відносних швидкостей (б)

¹¹⁸ Ратушний А. В. Перспективы совместного применения некоторых нетрадиционных способов повышения напорности (часть II) / А. В. Ратушний // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2013. – № 4. – С. 47–51.

¹¹⁹ Ратушний А. В. Повышение напорности ступени центробежного насоса путем усовершенствования лопастной решетки рабочего колеса : диссертация на соискание научной степени канд. технических наук / А. В. Ратушний ; науч. рук. И. А. Ковалев. – Сумы : СумГУ, 2015. – 154 с.

Водночас варто зазначити, що як ці приклади, так і згадані вище, належать до частково згорнутих бісистем, у яких частина дублювальних підсистем замінюються однією. Всі ці бісистеми з'явилися за допомогою певного «розділення» робочого органа. Зазначимо також, що цей спосіб спрямований на збільшення відмінностей між отриманими елементами.

Щодо полісистем можна зауважити, що їхній розвиток відбувається за схемою, аналогічною до вже розглянутих бісистем, але є і певна відмінність. Під час створення полісистем виникає певне внутрішнє середовище, яке характеризується тим, що має особливі властивості, які можна використовувати для отримання додаткових корисних якостей системи. Загальний принцип тут полягає в тому, що необхідно обрану технічну систему фактично «помножити» на саму себе і виявити внутрішнє середовище, яке виникло. Причому на макрорівні, на жаль, це зробити не завжди вдається. До речі, багатоступеневі відцентрові насоси, саме і являють собою полісистеми, причому частково згорнуті. Якщо в такому насосі розташувати робочі колеса симетрично, то отримаємо нову якість – компенсацію осьового зусилля. Схожі ж якості, але в межах бісистеми мають насоси типу «Д».

Щодо «ближньої» перспективи розвитку насособудування, крім згаданих вище варіантів, може йти мова і про оптимізацію роботи та керування насоса на рівні мережі¹²⁰, а на «дальню» перспективу – про втілення ідеї передання енергії рідині фактично самим трубопроводом, яким здійснюється її перекачування. Реалізація ідей «дальньої» перспективи можлива, на наш погляд, кількома способами.

Перший із них – використання трубопроводу з вбудованою системою капілярів, що дозволило б транспортувати рідину з використанням капілярного ефекту подібно до деревоподібних рослин. Другий спосіб являє собою дослідження можливостей впливу на рідину самим трубопроводом через використання певних коливань імпульсного, пульсівного і загалом нелінійного полів. Як припущення можливо було б використати керований гідроудар¹²¹ або принцип стравоходу – перистальтичного трубопроводу з «розумного» матеріалу, який був би запрограмований на потрібний для перекачування рідини алгоритм дій. Також у цьому контексті вважаємо за доцільне докладно вивчити ідеї використання енергії води В. Шаубергера¹²².

Причому можна сказати, що такі машини будуть являти собою істотний крок у бік ідеалізації технічних систем (про це детально в наступному пункті). Їх структура також певним способом може характеризуватися схемою, поданою на рисунку 3.7. Далі детальніше розглянемо певні ідеї щодо переходу насосних систем у надсистему.

3.2.9.1 Капілярність

Розглянемо докладно ефект підняття рідини в тонких трубках (капілярах), відзначивши також, що капілярність сама, по суті, має насосний ефект. Необхідна умова капілярного підйому полягає в тому, що рідина повинна змочувати матеріал трубки, тобто

¹²⁰ Хованський С. О. Підвищення ефективності експлуатації відцентрових насосів у системі водопостачання житлово-комунального господарства : дисертація... канд. техн. наук / С. О. Хованський ; наук. кер. В. Г. Неня. – Суми : СумДУ, 2010. – 191 с.

¹²¹ Ковальов І. О. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи : навч. посіб. / І. О. Ковальов, О. В. Ратушний. – Суми : СумДУ, 2016. – 250 с.

¹²² Шаубергер В. Энергия воды / В. Шаубергер. – Москва : Яуза, Эксмо, 2007. – 320 с.

крайовий кут повинен бути гострим ($\Theta < 90^\circ$). За цієї умови поверхня рідини в трубці має увігнуту форму, тобто утворюється увігнутий меніск (рис. 3.18).

В увігнутому меніску тиск p_r менше, ніж тиск p_0 під плоскою поверхнею у широкій посудині, на величину капілярного тиску p_c , тобто перепад тиску становить $\Delta p = p_0 - p_r = + p_c$. Позитивна різниця тисків у меніску і під плоскою поверхнею ($\Delta p > 0$) і є причиною капілярного підйому змочуваної рідини.

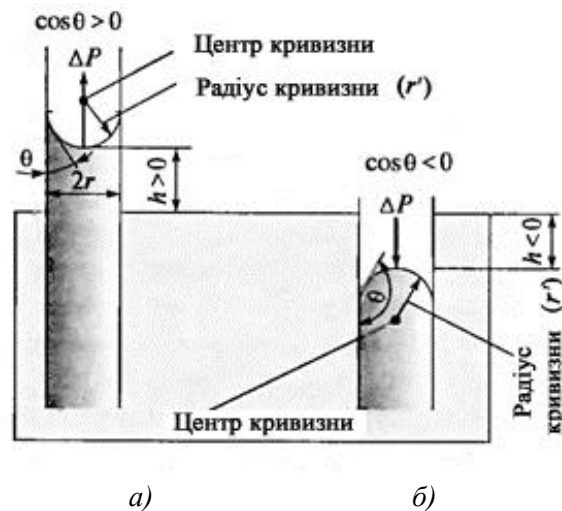


Рисунок 3.18 – Ілюстрація ефекту капілярності для змочуваної (а) і незмочуваної (б) поверхонь трубок

Для розрахунку капілярного тиску потрібно знати форму меніска, яка визначається поверхневим натягом рідини і дією сили тяжіння. У досить тонких капілярах, де $d \ll 2a$ (a – капілярна довжина) вплив сили тяжіння незначний. Тому можна вважати, що меніск має форму сферичного сегмента.

Висота капілярного підйому H обернено пропорційна діаметру трубки d . Тобто чим більш вузькою буде капілярна трубка, тим більше висота підйому рідини. Наприклад, вода у скляному капілярі діаметром $d = 1$ мм піднімається приблизно на 1,5 см; при $d = 1$ мкм висота підйому становить вже $H = 15$ м.

Загалом для одного капіляра

$$H = \frac{4\sigma \cos\theta}{\rho_{ж} g d} \quad (3.2)$$

З рівняння (3.2) випливає, що добуток висоти капілярного підйому на радіус (напівдіаметр) трубки становить для цієї рідини постійну величину: $Hr = a^2 \cos\theta$. Відношення

$$a^2 = \frac{2\sigma}{\rho_{ж} g} \quad (3.3)$$

називають капілярною постійною рідини ($[a^2] = \text{м}^2$), а її значення залежить тільки від фізичних властивостей рідини.

Величину a (м) називають капілярною довжиною. Для води капілярна довжина становить $a = 3,85$ мм. Ця величина визначає межу капілярних явищ, які мають істотне значення в зоні розмірів $d \ll 2a$. Навпаки, для великих об'єктів домінує вплив сили тяжіння, тому капілярні явища відступають на другий план.

Важливе значення особливо під час розгляду можливості використання капілярності як насосного ефекту мають кінетичні закономірності капілярної течії. Розглянемо найпростіший випадок – течія змочувальної рідини в горизонтальному капілярі діаметром d . На підставі закону Пуазейля і, беручи до уваги, що режим течії рідини в тонких капілярах буде ламінарним, швидкість течії в горизонтальному капілярі описується рівнянням

$$v = \frac{d\sigma\cos\theta}{8\mu x} \quad (3.4)$$

де x – відстань від початку трубки.

Отже, у міру віддалення від входу (збільшення відстані) у капілярі швидкість переміщення меніска (витрата) убуває^{123, 124}.

Виразимо d із (3.4) і підставимо отриманий вираз у (3.2)

$$H = \frac{\sigma^2\cos^2\theta}{2\rho_{ж}g\mu xv} \quad (3.5)$$

На підставі того, що подача $Q = v \cdot S$ і для капіляра круглого поперечного перерізу $S = \pi d^2/4$, отримаємо залежність $H = f(Q)$.

$$H = \frac{\pi d^2\sigma^2\cos^2\theta}{8\rho_{ж}g\mu xQ} \quad (3.6)$$

Позначивши $\frac{\pi\sigma^2\cos^2\theta}{8\rho_{ж}g\mu} = A$ – параметр, що повністю залежить від виду рідини за певних умов, а також матеріалу капіляра і, подавши параметр x – відстань від початку капіляра – як його довжину l , підставимо ці позначення в (3.6) і отримаємо остаточний спрощений вираз залежності $H = f(Q)$:

$$H = A \frac{d^2}{lQ} \quad (3.7)$$

Для води за нормальних умов і, вважаючи $\cos\theta = 45^\circ$, $A = 5,7551 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$.

На рисунку 3.19 наведена залежність $H = f(Q)$ – характеристика капілярного насоса при $d = 1$ мм і $l = 5$ м.

Водночас крутизна характеристики буде залежати від параметрів рідини та геометричних параметрів капілярів. Відзначимо, що на підставі (3.7), чим вище подача капілярного насоса, тим нижче висота підйому води в ньому. Зрозуміло, що така картина буде справедливою і для пучка з N капілярів: $H_n = NH$, $Q_n = NQ$. Цей пучок довжиною l

¹²³ Сумм, Б. Д. Основы коллоидной химии : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Б. Д. Сумм. – 2-е изд., стер. – Москва : Академия, 2007. – 240 с.

¹²⁴ Дерягин Б. В. Поверхностные силы / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев, В. М. Муллер. – Москва : Наука, 1985. – 398 с.

можна розглядати як ступінь капілярного насоса. Отже, систему капілярного ступеня необхідно створювати максимально наближеною до ідеальної форми – пучок трубок круглого поперечного перерізу, зроблених з однорідного ізотропного матеріалу. Це передбачає вибір відповідної технології та матеріалів для виготовлення.

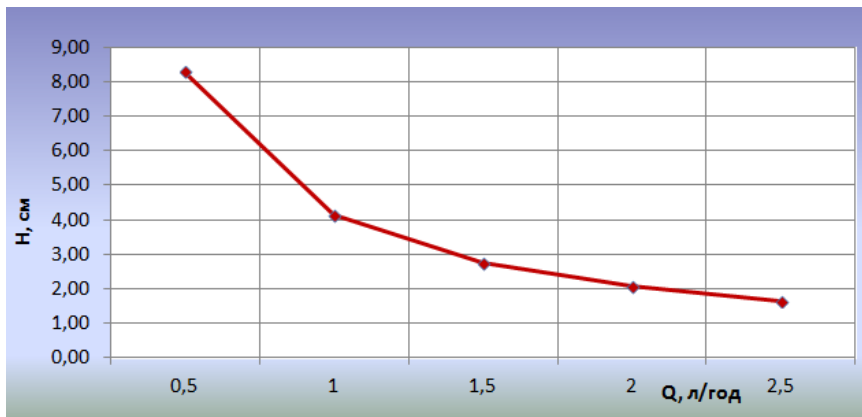


Рисунок 3.19 – Характеристика капілярного насоса

Аналізуючи залежність (3.7) щодо отримання прийнятних параметрів висоти підйому і подачі, доходимо висновку, що оптимальною конструкцією багатоступінчастого капілярного насоса буде труба, у яку подібно системі дросельних шайб вставлені диски, що являють собою короткі пучки капілярів, рознесені один від одного на незначну відстань (рис. 3.20, 3.21).

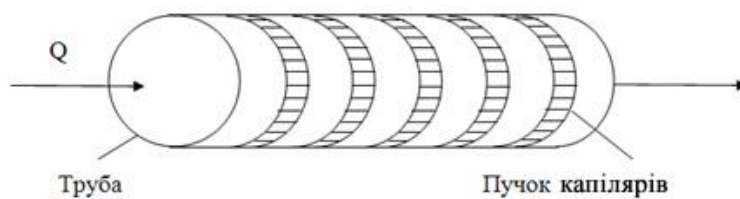


Рисунок 3.20 – Концепція конструкції капілярного насоса



Рисунок 3.21 – Прототипи капілярних насосних систем, виготовлені за допомогою 3D-друку

Таке рішення – певне відображення закону динамізації. Капілярні диски, перебуваючи всередині горизонтальних і вертикальних трубопроводів, можуть забезпечувати підведення потрібної кількості води на необхідну відстань фактично в «безнасосному» (з огляду на, звісно, традиційне розуміння цього терміна) режимі^{125, 126}. У такому контексті можна ставити завдання на більш віддалену перспективу, яка полягає в освоєнні виробництва «моно-блочної» системи «труба – капілярні диски» з композитних матеріалів і пластмас, що змочуються перекачуваною рідиною (водою). Дещо інший підхід полягає у виготовленні тільки системи капілярів і використання їх сумісно з широко розповсюдженими пластиковими або іншими трубами для води. Власне кажучи, це і буде перехід для насосної системи на рівень надсистеми.

Зауважимо, що, розглядаючи на сьогодні вже згадуваний як найбільш перспективний рівень оптимізації енергоспоживання насосним обладнанням, а саме – «насосний агрегат у складі мережі» у межах закону переходу до надсистеми, неможливо не приділити увагу самим трубопроводам, технологіям їхнього виробництва і матеріалам. Ще в середині 80-х років ХХ ст. президент АН УРСР Б. Є. Патон звертав увагу на значну матеріаломісткість і відповідні технологічні проблеми масового виготовлення труб (особливо великого діаметра) з металів. Академік вже тоді вказував на особливу важливість повсюдного переходу до виробництва труб із неметалічних матеріалів, що забезпечило б загалом істотний позитивний економічний ефект¹²⁷. Як бачимо, проблеми власне насособудування, з погляду більш загальних системно-структурних ієрархічних рівнів, зачіпають багато галузей промисловості, що особливо актуально у зв'язку з викликами, зумовленими переходом до нового технологічного укладу.

Загалом можна відзначити наявність значного потенціалу «насосного ефекту» явищ капілярності, осмосу (електроосмосу) і електрокінетики¹²⁸ і особливо за їхнього поєднання. Такий висновок підказує нам сама Природа на прикладі життєдіяльності насамперед деревоподібних рослин, які завдяки поєднанню ефектів осмосу і капілярності піднімають рідину з ґрунту на інколи дуже значну висоту.

Розглянемо докладніше з погляду розуміння насосного ефекту такі особливості життєдіяльності рослин. Так, вода в рослині формує безперервну (нерозривну) водну систему, що йде від ґрунту до поглинальної поверхні кореня і далі через нього і стебло (ксилему) до поверхні, що випаровує, – листя¹²⁹. Ця система може бути подана як ланцюг опорів, розміщених послідовно і паралельно (рис. 3.22).

За аналогією із законом Ома потік води (I_v) у гідравлічному ланцюгу подають як частку від ділення сумарної різниці водних потенціалів на кінцях системи ($\Delta\Psi$) і величини загального гідравлічного опору рослини (R)

$$I_v = \frac{\Delta\Psi}{R}. \quad (3.8)$$

¹²⁵ Ратушний А. В. Концепция капиллярного насоса / А. В. Ратушний, А. А. Дрофа, Д. Р. Васильченко // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ» (за галузями знань «Технічні науки»). – 2018. – № 63. – С. 189–195.

¹²⁶ Ратушний О. В. Методика визначення оптимальних параметрів капілярного насоса / О. В. Ратушний // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ» (за галузями знань «Технічні науки»). – 2018. – № 64. – С. 174–178.

¹²⁷ Патон Б. Е. Наука. Техника. Прогресс / Б. Е. Патон. – Москва : Наука, 1987. – 415 с.

¹²⁸ Духин С. С. Электрофорез / С. С. Духин, Б. В. Дерягин. – Москва : Наука, 1976.

¹²⁹ Физиология растений / под ред. И. П. Ермакова. – Москва : Академия, 2005.

Випаровування (транспірація) води з поверхні листя визначає напрямок її руху в усій системі «грунт – корінь – стебло – лист – атмосфера» і генерує відповідне поглинання води коренями. Отже, транспірація фактично має ознаки насосного ефекту.



Рисунок 3.22 – Модель сталого струму води рослиною

Зниження водного потенціалу листків під час транспірації змушує воду рухатися з ксилеми до випаровувальних клітин листя. Це призводить до зниження тиску у ксилемі до значень, менших, ніж атмосферного. Отже, уздовж транспірувальної рослини встановлюється відповідний градієнт тиску. Це, зі свого боку, призводить до посилення поглинання води коренем із ґрунту. Водночас різниця водних потенціалів атмосфери і ґрунту достатня для підйому води і в найвищих дерев. Зазначимо, що такі умови потрібно створити і для роботи капілярного насоса, описаного вище.

Загалом, водний потенціал визначається виразом

$$\Psi = \frac{\mu_w - \mu_w^0}{\bar{V}_w}, \quad (3.9)$$

де \bar{V}_w – парціальний молярний об'єм води, м³/моль;

μ_w^0 – стандартний хімічний потенціал води, Дж/моль;

μ_w – хімічний потенціал води за змінного тиску, Дж/моль.

Водночас Ψ виражається в одиницях тиску.

Величина $\mu_w - \mu_w^0$ визначає здатність води, що перебуває за деякого тиску, здійснювати роботу порівняно з такою ж здатністю чистої води, яка перебуває за атмосферного тиску.

Відомо, що

$$\frac{\mu_w - \mu_w^0}{\bar{V}_w} = \frac{RT}{\bar{V}_w} \ln a_w, \quad (3.10)$$

де a_w – активність води.

Водночас

$$a_w = \gamma_w x_w, \quad (3.11)$$

де γ_w – безрозмірний коефіцієнт активності, що характеризує відхилення системи від ідеального стану за наявності в ній розчинених речовин;

x_w – концентрація води в системі (у мольних частках).

Розглядаючи транспорт винятково води, вважають, що значення γ_w близько до одиниці.

Взагалі хімічний потенціал води тим вище, чим більше її активність (концентрація). Розчинені у воді речовини знижують активність води, оскільки зменшують її мольну частку в системі і, відповідно, концентраційну складову.

Щодо $\Psi_{атм}$ допускають, що парціальний тиск парів води визначає хімічну активність парів води в повітрі. Тобто

$$a_w = \frac{p_{wv}}{p_{wv}^0} = \frac{ВВП}{100}, \quad (3.12)$$

де p_{wv} – парціальний тиск парів води, що спостерігається в повітрі;

p_{wv}^0 – тиск насичених парів, що перебувають у рівновазі з чистою водою за тією ж самою температурою;

$ВВП$ – відносна вологість повітря.

Унаслідок цього для водного потенціалу атмосфери отримаємо такий вираз:

$$\Psi_{атм} = \frac{RT}{V_w} \ln \frac{ВВП}{100}. \quad (3.13)$$

Відзначимо, що на підставі того, що об'єм води слабо змінюється зі зміною тиску, можемо для неї взяти $\bar{V}_w = 18 \text{ см}^3/\text{моль}$.

Умовою поглинання води рослиною є більш високий водний потенціал ґрунту, ніж водний потенціал кореня. Ґрунт – це багатофазна система, що складається з чотирьох головних компонентів:

- твердих мінеральних часток;
- складних органічних сполук, що утворюють колоїди, які отримали назву гумусу;
- ґрунтового розчину;
- суміші газів, близьких за складом до повітря.

Перші дві складові утворюють ґрунтовий скелет і формують пористу структуру ґрунту, два інших заповнюють порожнечі, або пори всередині нього.

Величина водного потенціалу ґрунту визначається виразом

$$\Psi^{ep} = P - \pi^{ep} - \tau^{ep}, \quad (3.14)$$

де P , π^{ep} , τ^{ep} – гідростатичний, осмотичний і матричний тиск у ґрунті відповідно.

Тиск P справляє помітний вплив на Ψ^{ep} лише за глибокого залягання ґрунтових горизонтів. π^{ep} відображає вплив на Ψ^{ep} осмотичні сили. Цей компонент водного потенціалу визначається здебільшого набуханням колоїдних частинок і меншою мірою – концентрацією осмотично активних частинок у ґрунтовому розчині. τ^{ep} відображає вплив поверхневих явищ у капілярах ґрунту на межах розділу фаз «вода – тверде тіло – газ». Відзначимо, що значення $\Psi^{ep} = 0$ – це максимально можливе значення водного потенціалу ґрунту. Всі зазначені взаємодії води з ґрунтовою структурою призводять до зниження її водного потенціалу, тому навіть у насиченому водою ґрунті його величина має від'ємне значення.

Такі основні передумови транспорту рідини загалом рослиною. Водночас можна відзначити, що основний внесок у $\Delta\Psi$, а отже, і в I_v стебла як об'єктивно основну цікаву для нас частину рослини вносить градієнт тиску ΔP (Лапласів тиск) між рідкою і газовою фазою в капілярі. Осмотична складова водночас не дуже велика. Вона відіграє помітну роль у процесі поглинання води з ґрунту коренем.

Отже, капілярний насос з урахуванням досвіду вивчення основних особливостей транспорту води в рослинах можна подати такою схемою (рис. 3.23). У цьому разі, об'ємний потік води через капіляр буде визначатися виразом $I_v = \frac{\Delta P}{R}$. Порівнюючи цей вираз із наведеними раніше ($I_v = \frac{\Delta\Psi}{R}$), можна зауважити, що Лапласів тиск визначає потенціал стебла. Запропонована багатоступінчаста конструкція капілярного насоса дозволяє зменшити опір R усієї капілярної системи. Водночас різниця потенціалів $\Delta\Psi$ (рис. 3.22) між атмосферою і стеблом буде подана виразом

$$\Delta\Psi = \Delta P - \frac{RT}{V_w} \ln \frac{ВВП}{100} + \Psi_{гр}. \quad (3.15)$$

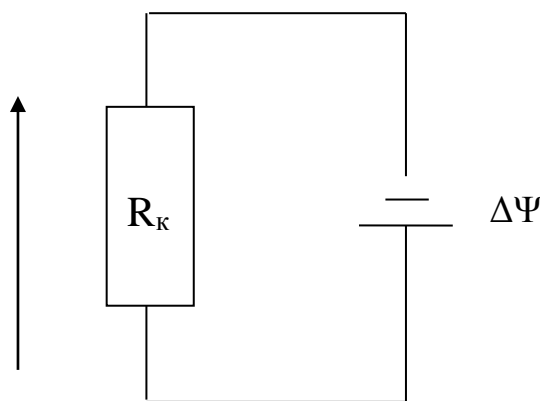


Рисунок 3.23 – Схема капілярної насосної системи

Ця залежність показує, що насосний ефект капіляра деревинного організму визначається особливостями будови його внутрішніх провідних шарів, параметрами атмосфери і ґрунту. Відповідно для правильного і повного розуміння особливостей роботи описаного вище капілярного насоса необхідно враховувати структуру і склад рідини (водного розчину), а також характеристики зовнішнього атмосферного середовища. Можемо констатувати, що це об'єктивні вимоги під час розгляду насосного ефекту на мікрорівні на підставі характеристики VI технологічного укладу.

Також, на нашу думку, доволі цікавим є поєднання ефектів Юткіна і капілярності¹³⁰, що полягає в тому, що електричний розряд виробляють у капілярній трубці за допомогою запаяних у ній електродів. Водночас приєднуючи ці електроди до конденсатора, який має достатній електричний заряд, можна отримати всередині трубки у воді потужну електричну іскру. Під її дією деяка частина води миттєво випарується, і пари, що розширюються, створюють значний тиск на воду. Водночас уздовж осі трубки (капіляра, стінки якого змочуються рідиною) піднімається надзвичайно тонкий і дуже швидко рухомий струмінь

¹³⁰ Гидродинамические механизмы. – С. 24.

води. Таке явище здійснюється досить просто, безвідмовно і виражається дуже яскраво. Практичне застосування цього «електрозарядженого капілярного» ефекту як насоса вважається можливим за допомогою використання пучка капілярів, вставлених у трубу, подібно системі капілярів, описаних вище в комплексі із системою створення електричного розряду. Водночас, звісно, для прояву максимального потенціалу цієї конструкції капілярні трубки повинні вже мати значну довжину ($l \gg d$).

Також відомим є ультразвуковий капілярний ефект, який полягає в суттєвому (на порядок і більше) збільшенні швидкості та висоти підйому рідини в капілярах під час дії ультразвуку¹³¹. Підйом рідини забезпечує стояча ультразвукова хвиля. Такий результат досягається завдяки саме формі капілярів – трубок дуже малого діаметра (рис. 3.24).

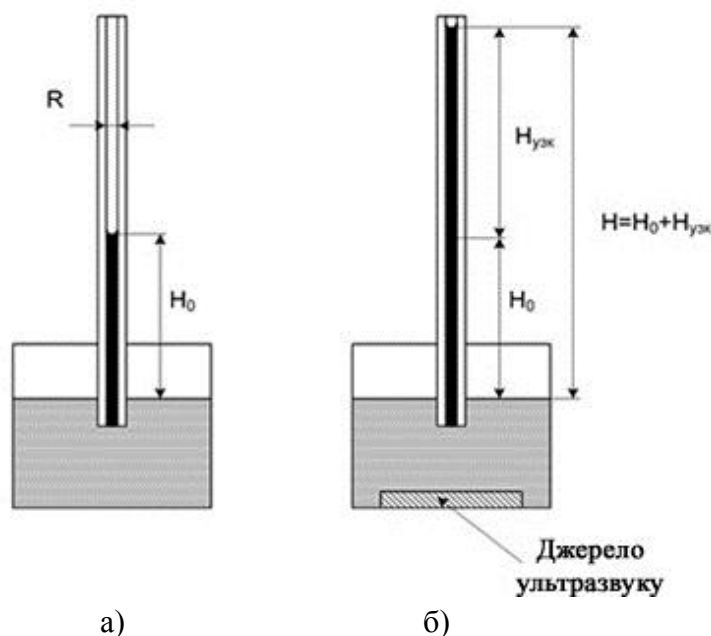


Рисунок 3.24 – Ілюстрація дії капілярного (а) та ультразвукового капілярного (б) ефектів

У науково-дослідному інституті експериментальної фізики нещодавно були відкриті нові ефекти: капілярний і змочування, які індуковані електророзрядною плазмою¹³². Суть дослідження полягає в такому. До капіляра вводився голкоподібний електрод так, щоб між його кінцем і верхньою поверхнею рідини утворювався електророзрядний проміжок. У саму рідину занурювався другий електрод. На електроди подавалася послідовність високовольтних імпульсів, які індукували в електророзрядному проміжку іскрові плазмові розряди. Водночас після кожного імпульсу рідина дещо підіймалася в капілярі доки не досягала голкоподібного електрода. Цікаво зауважити, що після припинення подачі імпульсів, рівень рідини в капілярі не опускався, а залишався на новому рівні. Якщо ж синхронізувати рух електрода в капілярі та рідини в ньому, то можна досягти значного рівня підйому рідини.

¹³¹ Прохоренко П. П. Ультразвуковой капиллярный эффект / П. П. Прохоренко, Н. В. Дежунов, Г. Е. Коновалов ; под ред. В. В. Клубовича. – Минск : Наука и техника, 1981. – 135 с.

¹³² Плазма как сурфактант: новый капиллярный эффект и новый эффект смачивания, индуцированные электроразрядной плазмой / Ю. П. Кожаева, А. Е. Дубинов, В. А. Любимцева, В. Д. Селемир // Материалы 16-й Научно-технической конференции «Молодёжь в науке», 25–27 октября 2017 года. – Саров : РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2018.

Автори стверджують, що саме контакт рідини з низькотемпературною плазмою електричних розрядів забезпечує новий капілярний ефект завдяки тому, що частинки, які надходять із плазми до рідини, модифікують її поверхневий натяг і змочуваність нею твердої поверхні стінок капіляра.

Зазначимо, що наведені приклади є фактично деякою подібністю гідроудару в тонких трубках, де його дія проявляється значно інтенсивніше, ніж безпосередньо капілярний ефект. Водночас дія як самого капілярного ефекту, так і в поєднанні з дією інших ефектів ніколи не досліджувалися з погляду можливості транспортування рідини. Застосування цих явищ у «насосному» режимі, на наш погляд, є перспективним, таким, що відповідає ідеології VI технологічного укладу та потребує подальшого вивчення.

3.2.9.2 Інші ефекти і явища, які реалізують насосний принцип на надсистемному рівні

Далі коротко розглянемо потенціал деяких можливих, але не в повному обсязі використаних прямих перетворень видів енергій на механічну енергію:

- пружної на механічну;
- гравістатичної на механічну;

Щодо здійснення першого з наведених перетворень відзначимо, що в системах видобутку, транспортування, розподілу і переробки природного газу велика кількість потенційної його енергії втрачається на дросельних пристроях. Світовий досвід показує, що цю енергію можливо і необхідно використовувати. Корисне використання енергії тиску газу і буде перетворенням пружної енергії на механічну. Водночас можливе використання насосів звичних конструкцій із газотурбінним приводом. З огляду на розвинену газопровідну мережу в Україні широке впровадження такого енергоперетворення дуже перспективне.

Альтернативою клапанним дросельовальним системам зниження тиску газу є турбодетандерні установки (ТДУ) і агрегати (ТДА). Однак розроблені ТДА на основі класичних лопатевих турбін є вигідними тільки за порівняно великої одиничної потужності вузла (більше ніж 500 кВт). Значна ж кількість газорозподільних станцій являють собою малопотужні об'єкти, тому застосування на цих станціях ТДУ на основі класичних турбін є недоцільним. У СумДУ на кафедрі теоретичної теплофізики сформовано пропозицію застосовувати більш економічно вигідні і технологічно обґрунтовані установки, до яких належать ТДУ на основі струменево-реактивних і вихрових турбін. Вони мають низку переваг, а саме: простота конструкції, гарні динамічні характеристики, недовгий термін окупності, високий рівень уніфікації, надійність і безпека роботи^{133, 134, 135, 136}.

¹³³ Бережной А. С. Анализ возможности утилизации потенциальной энергии давления сжатых газов и паров / А. С. Бережной, С. М. Ванеев // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів інженерного факультету : конференція присвячена Дню науки України та 60-річчю СумДУ. – Суми : СумДУ, 2008. – Ч. I. – С. 49.

¹³⁴ Бережной А. С. Совершенствование рабочих характеристик струйно-реактивного пневмоагрегата на основе уточнения модели рабочего процесса : диссертация на получение научной степени канд. техн. наук / А. С. Бережной ; науч. рук. С. М. Ванеев. – Суми : СумГУ, 2014. – 157 с.

¹³⁵ Гетало В. В. Совершенствование систем редуцирования давления путем применения струйно-реактивных пневмоагрегатов : диссертация на соискание науч. степени канд. техн. наук / В. В. Гетало ; науч. рук. С. М. Ванеев. – Суми : СумГУ, 2014. – 150 с.

¹³⁶ Ванеев С. М. Турбодетандерный агрегат на базе вихровой турбины для утилизации энергии давления топливного газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов / С. М. Ванеев, М. А. Волошин, А. А. Яценко // Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів ф-ту технічних систем та енергоефективних

Ще одним типом пристроїв, що перетворюють гравістатичну і пружну енергії на механічну енергію потоку рідини і здатні виконувати насосні, по суті, функції є так звані гідроударні гідротрансформатори, або гідротарани¹³⁷. Відзначимо, що ці пристрої здатні працювати в місцевості, де немає електропостачання або інших джерел енергії. Проілюструємо роботу гідротарана найпростішим прикладом.

Розглянемо випадок, коли рідина рухається прямолінійно по трубці з посудини, а далі опускається вертикально вниз із висоти, що дорівнює H . Водночас рідина набуває такої ж самої швидкості, як і будь-яке тіло, що падає з цієї висоти H : $v = \sqrt{2gH}$. Якщо створити у трубці умову раптової зупинки потоку – гідроудар, наприклад, за допомогою спеціального клапана, то у трубці виникне тиск $p = \rho c \sqrt{2gH}$, де c – швидкість звуку у воді.

Далі у трубці, де виник такий тиск, можна зробити боковий клапан і відвести від нього додаткову трубу, що йде вгору. Під дією гідравлічного удару можна цією трубою підняти воду на висоту H_1 , на якій тиск піднятої води врівноважує тиск гідравлічного удару $p = \rho g H_1$. Відповідно, грунтуючись на цьому, стає можливим підняття води в додатковому трубопроводі на висоту $H_1 = \frac{\rho g}{p}$. Замінюючи p значенням, визначеним вище, отримаємо $H_1 = c \sqrt{\frac{2H}{g}}$. Отже, вода, опускаючись із висоти H , може підняти частину своєї маси на висоту, помітно більшу, ніж ця висота. Збільшення висоти підняття після нескладних перетворень продається досить простим виразом $\frac{H_1}{H} = 2 \frac{c}{v}$.

Перетворювачами гравістатичної енергії на механічну енергію потоку рідини є так звані хвильові насоси (рис. 3.25). До цієї категорії технічних систем можна також віднести пневмобуй Мосуди й інші схожі перетворювачі енергії хвиль¹³⁸.

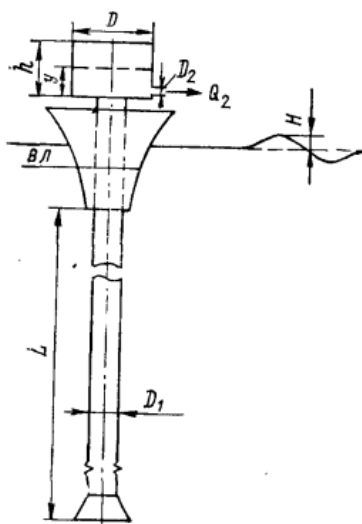


Рисунок 3.25 – Схема хвильового насоса

технологій, м. Суми, 23–26 квітня 2013 р. : у 2 ч. / ред. кол.: О. Г. Гусак, В. Г. Євтухов. – Суми : СумДУ, 2013. – Ч. 2. – С. 46.

¹³⁷ Овсепян В. М. Гидравлический таран и таранные установки: теория, расчет и конструкции / В. М. Овсепян ; ред. М. Н. Журавлева. – Москва : Машиностроение, 1968. – 124 с.

¹³⁸ Коробков В. А. Преобразование энергии океана / В. А. Коробков. – Ленинград : Судостроение, 1986. – 280 с.

Розглянемо докладніше хвильовий насос. Принцип його дії заснований на нерозривності стовпа рідини і трубі, вертикальний рух якої зумовлений коливаннями поверхні. Щоб така труба стала насосом, її нижній кінець опускають у незбурені поверхневим хвилюванням шари рідини, а в саму трубу додають клапан, що перешкоджає витіканню порції води, яка потрапила до неї під час переміщення вниз. Водночас насос може ефективно експлуатуватися тільки на великих глибинах далеко від берега.

Насос можна використовувати як для підйому води в резервуар, що розміщений над водою, так і для закачування її в танк із протитиском, величина якого приблизно пропорційна швидкості переміщення труби. Хвильовий насос здатний забезпечувати енергією автономний віддалений від берега об'єкт, а також подавати на поверхню глибинні води (наприклад, для видобутку сірководню з Чорного моря).

3.2.10 Закон підвищення ступеня ідеальності

Ідеальною є така технічна система, маса, габарити, енергоємність якої наближаються до нуля, а її здатність виконувати корисну роботу водночас не зменшується. У межі: ідеальна система – це та, якої немає, а корисна функція зберігається і виконується. У цьому разі можна зауважити, що ексергія ідеальної системи фактично досягає максимального значення, а сама вона перебуває в точці гармонії.

За зниклу ідеалізовану систему її функції повинні виконувати інші системи (сусідні, над- чи підсистеми). Водночас відбувається або зростання головної корисної функції таких систем, або збільшення самих функцій. Зникнення систем і збільшення корисної функції або кількості самих виконуваних функцій – два боки загального процесу ідеалізації.

Щодо реальних технічних систем спостерігається змішаний вид ідеалізації. Виграш у масі, габаритах, енергоємності, отриманий у процесі ідеалізації, одразу ж спрямовується на додаткове збільшення корисної функції або кількості функцій.

Зазначимо, що перехід системи до ідеального стану – фінальний етап її згортання. Ідея ідеалізації так чи інакше проходить через усі закони розвитку технічних систем. Схема багато в чому ідеалізованої системи наведена на рисунку 3.7. Щодо ідеалізації насосних систем можемо припустити, що їхні функції передання енергії рідині та її транспортування буде виконувати сама трубопровідна система або ідеальний стан самої перекачуваної рідини та/або такий самий стан речовини транспортної системи. Це вже певною мірою висвітлювалося раніше.

Загалом технічні системи у просторі та часі розвиваються хвилеподібно (цикли «розгортання – згортання»). На будь-якому етапі система може бути згорнута в ідеальну речовину – у нову моносистему, яка може стати початком нової хвилі розвитку. Процеси згортання та ідеалізації систем мають всі ознаки об'єднання та інтеграції – переходу до надсистеми. Водночас частина підсистем витискується за межі ТС. Вони об'єднуються у спеціалізовані системи у складі надсистеми. Така надсистема і стає системою колективного користування (вузловою, центральною), до якої постійно або періодично звертаються всі технічні системи.

Також кількість елементів у ТС може зменшуватися до мінімальної межі, коли залишається лише один робочий орган, а функції підсистем виконують сусідні чи споріднені системи. Приклад цьому – капілярний насос, який, по суті, складається лише з декількох робочих органів – капілярних дисків, інтегрованих у сусідню систему трубопроводу.

Під час згортання технічної системи до робочого органа саме ця підсистема далі удосконалюється. Інші підсистеми начебто «стягуються» до робочого органа, зливаються з ним, розмішуються в його граничному шарі.

Інший спосіб ідеалізації і згортання – розвиток усіх підсистем у складі цієї ТС завдяки мініатюризації. Водночас відбувається різке зменшення маси, габаритів та енергоємності, збільшення корисної функції завдяки підвищенню точності функціонування (знижується вірогідність помилок, потрібна потужність, зникає частина шкідливих факторів). У підсумку кількість елементів системи залишається незмінною аж до найостаннішого моменту – злиття підсистем у єдину функціональну моносистему чи навіть ідеальну речовину. Прикладом такого способу є розвиток нанотехнологій – основи VI технологічного укладу і, зокрема, вже згадуваних нанороботів. Напевно, можливим є і створення на цих принципах «нанонасоса». Виготовлені у великій кількості (використання принципу динамізації вже на рівні системи) і розташовані в потоці рідини, вони б змогли забезпечити його транспортування.

Згортання технічної системи в речовину або ідеалізація речовини до рівня ТС, коли системи фактично немає, а її функція виконується речовиною (речовина, ускладнюючись, бере на себе виконання все більшої кількості функцій аж до виконання корисної функції ТС загалом) може відбуватися в декілька етапів:

- заміна однією речовиною функції двох або декількох речовин;
- заміна декількох підсистем однією універсальною речовиною;
- заміна технічної системи ідеальною речовиною.

Водночас ідеальна речовина зобов'язана мати певні унікальні властивості:

- високе значення головної корисної функції, що виконується;
- здатність до самоорганізації;
- самостійність (гнучкість) відгуку на зміну в зовнішньому середовищі (не має потреби в зовнішньому керувальному впливі), тобто самокерованість.

Останні дві властивості певним способом згадувалися в попередньому розділі.

Розвиток технічних систем у напрямку ідеалізації речовини можливий таким способом. З підсистеми послідовно видаляють речовини і передають їхні функції якій-небудь одній речовині. А далі в цю речовину згортається вся підсистема, а далі і система загалом. Зазначимо, що робочий орган як елемент системи, що розвивається найбільш інтенсивно, сильніше за інші притягує до себе найближчі речовини і підсистеми.

3.3 Резюме розділу III

Методологія ТРТС – це унікальна матриця, яка дозволяє усвідомити місце, передумови та значущість тих чи інших вдосконалень певних технічних систем, а також ступінь їхнього розвитку. Розгляд законів розвитку технічних систем щодо насосів дозволив чітко окреслити способи вдосконалення наявних машин, окреслити перспективні напрямки на «ближню» перспективу. Водночас завдяки ТРТС вдалося окреслити певні можливості «дальньої» перспективи, реалізація яких відбуватиметься на мікрорівні будови речовини.

Ми бачимо, що деякі ідеї, які були розглянуті з позиції можливості використання для транспортування рідини, сформовані десятиріччя назад. Але це в жодному разі не суперечить ідеології зміни технологічних укладів і процесу розвитку техніки. Певні прогресивні ідеї майбутнього не тільки можуть, але і повинні зароджуватися ще в епохи панування старих технологій, інколи суттєво випереджаючи свій час. Дуже важливо не втратити і не забути такі ідеї, оскільки в майбутньому саме вони стануть основою проривних технологій наступних технологічних укладів, а суспільства, що їх акумулюють, – лідерами світового прогресу людства.

РОЗДІЛ IV

ВИКОРИСТАННЯ КОНТРРОТОРНИХ ЛОПАТЕВИХ СИСТЕМ У ТЕХНІЦІ

У цьому розділі розглянемо застосування контрроторного ефекту – способу суттєвої інтенсифікації енергопередачі в різних галузях техніки.

4.1 Здвоєний прямоточний гідротурбінний агрегат

Одним з основоположників ідеї використання контрроторних машин у гідроенергетиці є П. Р. Хлопенков, який розробив теоретичну конструкцію контрроторної гідротурбіни (рис. 4.1)¹³⁹. Вона має два послідовно розташованих робочих колеса протилежного обертання. Спершу потік потрапляє на перше осьове колесо (ротор), а потім на друге (контрротор). Отже, напір на гідротурбіні можна розподілити між двома робочими колесами, що дозволяє використовувати гідротурбіну на більш високі напори ($H = 80\text{--}100$ м у цьому разі).

Конструкція контрроторного гідроагрегата передбачає установку ротора гідротурбіни з ротором генератора спільно на одному валу, а контрротора і статора генератора – на іншому. Отже, отримуємо конструкцію, де ротор і статор генератора обертаються у протилежних напрямках, що сприяє унаслідок цього збільшенню вироблення енергії, а також зменшенню його розмірів і ваги. Однак розв'язання проблеми зняття потужності з обертового статора може привести до ускладнення конструкції агрегата загалом і його регулювання. Це і є перешкодою для впровадження на ГЕС контрроторної турбіни цієї конструкції.

Як ще один приклад контрроторного осьового турбінного гідроагрегата розглянемо контрроторну конструкцію вертикальної гідротурбіни,¹⁴⁰ яка являє собою співвісну гідротурбіну з двома робочими колесами і контрроторний генератор. Якірний ротор генератора закріплюється на трубному валу першого робочого колеса турбіни, а його статор (контрротор) розташований на контрроторному валу, який проходить всередині першого вала (рис. 4.2). Водночас ротор і контрротор обертаються в різні боки.

Така компоновка забезпечила підвищену ефективність агрегата загалом, зокрема і завдяки відсутності на всіх режимах вихороутворення в рідині, яка надходила у відповідну трубу, а також завдяки підвищенню у два рази відносної швидкості між ротором і статором (контрротором) електрогенератора. У підсумку маємо:

1) на 30–40 % вищу пропускну здатність, що дозволяє за того ж самого діаметра робочого колеса підвищити потужність на 30–40 % або зменшити діаметр робочого колеса за тієї ж самої потужності й отримати істотну економію габариту ГЕС в плані і металомісткості арматури, що закладається в бетон;

2) більш високий ККД в оптимумі й істотно більш високий середній експлуатаційний ККД (на 5–10 %).

¹³⁹ Хлопенков П. Р. Крутится все // Изобретатель и Рационализатор. – 2003. – № 5 (641).

¹⁴⁰ Семенов В. В. Прямоточные гидротурбоагрегаты высокой и сверхвысокой быстроходности / В. В. Семенов. – Москва – Ленинград : Машгиз, 1959.

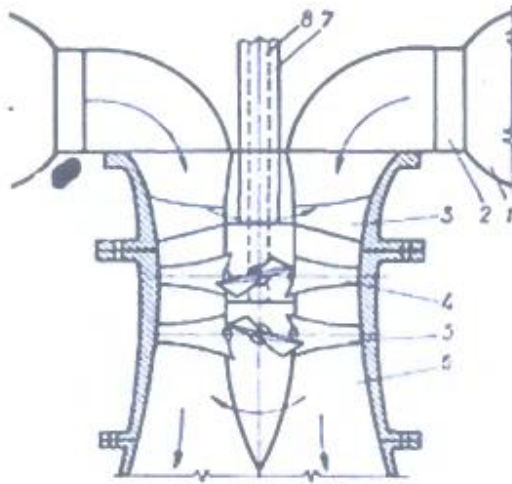


Рисунок 4.1 – Схема контрроторної гідротурбіни конструкції Хлопенкова:
 1 – спіральна камера; 2 – статор; 3 – проміжна опора; 4 – ротор; 5 – контрротор;
 6 – відсмоктувальна труба; 7 – вал ротора; 8 – вал контрротора

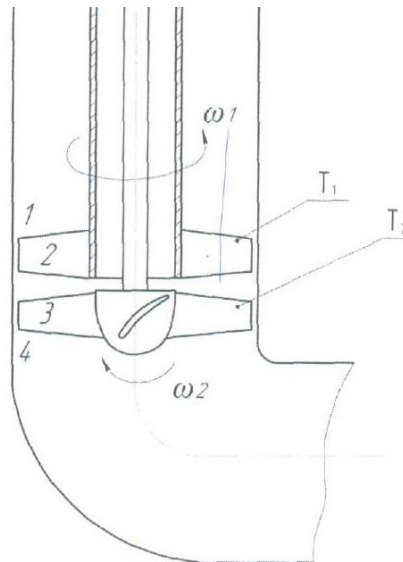


Рисунок 4.2 – Контрроторна вертикальна гідротурбіна

Водночас наголошується, що прямоточні гідроагрегати на напори понад 30–40 м не застосовувалися внаслідок труднощів створення безспіральної камери необхідного моменту імпульсу підведеного до робочого органа потоку для оптимальної роботи гідротурбіни.

Застосування зведеного прямоточного гідроагрегата, що реалізує у своїй конструкції принцип контрроторності, повністю розв'язує цю проблему і дозволяє застосовувати прямоточні гідроагрегати на напори 30–200 м і більше¹⁴¹. Водночас автори зазначають, що поряд із цим позитивним ефектом спостерігатимуться такі характерні лише для цього конструктивного рішення переваги:

¹⁴¹ Патент на винахід UA 76872: Здвоєний прямотечійний гідроагрегат / О. В. Потетенко, С. М. Ковальов. – опубл. 15.09.2006. – Бюл. № 9.

– значно розширюється діапазон надійної експлуатації за напорами в межах $H_{\max} - (0,25-0,3)H_{\max}$ зі збереженням достатньо високого ККД. Одночасно з цим залишається широкий діапазон експлуатації за витратами (потужностями);

– використання прямооточних гідроагрегатів на напори понад 100 м дозволяє поширити переваги цих гідроагрегатів на діапазон напорів, де застосовуються радіально-осьові гідротурбіни. Водночас підвищується на 5–15 % середній експлуатаційний ККД, тобто на ці ж 5–15 % збільшується вироблення електроенергії.

Такий ефект досягається завдяки тому, що у водоводі встановлюється здвоєний прямооточний гідроагрегат із робочими колесами гідротурбіни діагонального або осьового типу, який складається з двох турбін-генераторів, розташованих послідовно один за одним. Вони об'єднані єдиною системою регулювання з потрібною комбінаторною залежністю між відкриттям загального для двох турбін-генераторів напрямного апарата і кутами розвороту лопатей робочих коліс (рис. 4.3, 4.4).

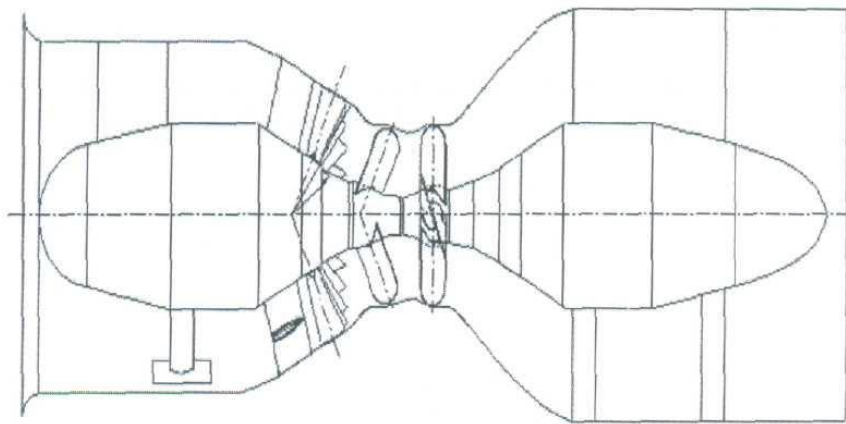


Рисунок 4.3 – Здвоєний гідроагрегат

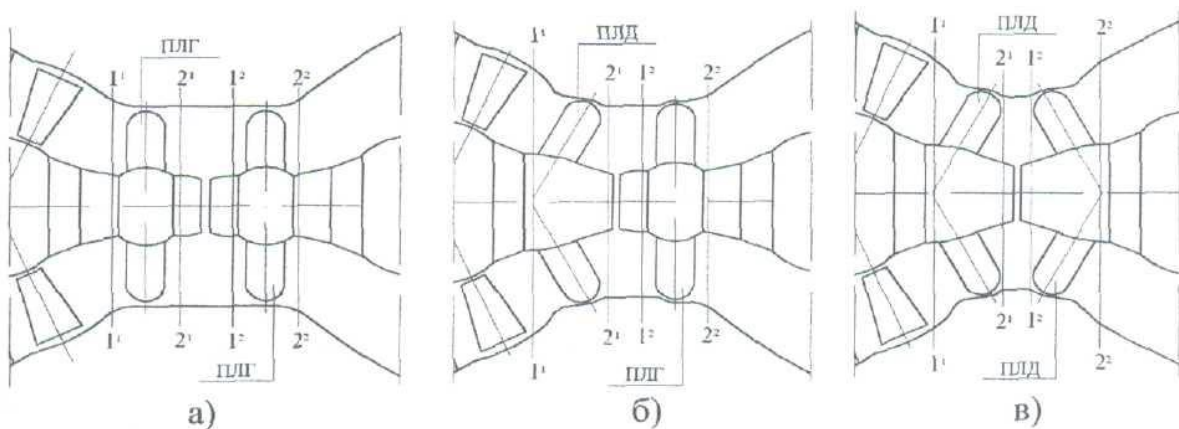


Рисунок 4.4 – Осьова (а) і діагональні (б, в) контрроторні гідротурбіни

Робочий процес у такому гідроагрегаті описується рівнянням Ейлера для гідротурбіни

$$H = \frac{\omega}{g\eta_r} (\overline{rv_u})_1 - (\overline{rv_u})_2, \quad (4.1)$$

а здійснюється за допомогою створення крутного моменту на робочому колесі гідротурбіни (який визначається сумарним моментом сил гідродинамічного тиску на лопаті), що дорівнює

$$M_{кр} = \rho Q [(\overline{rv_u})_1 - (\overline{rv_u})_2] - \Delta M_n, \quad (4.2)$$

де ΔM_n – втрати моменту імпульсу рідини завдяки тертю об нерухомі поверхні і протіканню в ущільненнях, минаючи проточну частину.

Під час роботи гідротурбіни гідравлічний ККД залежить від рівня гідравлічних втрат. У балансі втрат осьових гідротурбін, особливо на нерозрахованих режимах, істотну частину втрати напору становлять циркуляційні втрати, зумовлені наявністю колової складової швидкості за робочим колесом

$$\Delta h_{ц} = \frac{1}{Q} \int_Q \frac{v_{u2}^2}{2gH} dQ. \quad (4.3)$$

На оптимальному режимі експлуатації ці втрати близькі до нуля, оскільки $(\overline{rv_u})_2 \approx 0$.

Позначимо для першого гідроагрегата $H_1(I) = \left[\frac{\omega_1}{g\eta_1} (\overline{rv_u})_1 \right]_I$ і $H_2(I) = \left[\frac{\omega_2}{g\eta_2} (\overline{rv_u})_1 \right]_I$, а для другого гідроагрегата $H_1(II) = \left[\frac{\omega_1}{g\eta_1} (\overline{rv_u})_1 \right]_{II}$ і $H_2(II) = \left[\frac{\omega_2}{g\eta_2} (\overline{rv_u})_1 \right]_{II}$. Напір, який спрацьовується на першому і другому гідроагрегаті, подається у вигляді $H(I) = H_1(I) - H_2(I)$ і $H(II) = H_1(II) - H_2(II)$ відповідно. Водночас ротор другого гідроагрегата обертається в протилежному напрямку щодо напрямку обертання ротора першого гідроагрегата і негативний момент імпульсу, який визначається напором $H_2(I)$, є позитивним для другого гідроагрегата $-|H_2(I)| = H_1(II)$.

Із зростанням напору момент імпульсу потоку перед робочим колесом (приведений до одиниці масової витрати) зростає і для його формування у підвідних органах гідротурбін використовують спіральні підвідні камери і збільшену кількість колон статора (за тиску близько 400 м і більше). Труднощі створення необхідного для оптимальної роботи гідротурбіни моменту імпульсу є однією з основних причин, що перешкоджають просуванню прямоточних гідроагрегатів на підвищені напори¹⁴².

У разі зведеного прямоточного гідроагрегата під час застосування на напори аж до 180 м, момент імпульсу перед першим робочим колесом може бути створений у підвідних органах статорних каналів і напрямного апарата.

Діаметри робочих коліс першого і другого гідроагрегатів, як і їхня частота обертання, загалом різні і визначаються накладенням зон оптимальної роботи кожного гідроагрегата зокрема за наведеними оборотами і наведеними витратами під час роботи зведеного гідроагрегата на оптимальному режимі.

Під час роботи зведеного гідроагрегата на режимах, відмінних від оптимального, спрацьовання напорів як на першому, так і на другому гідроагрегатах перерозподіляється (за комбінаторною залежністю) з метою мінімізації втрат енергії на кожному експлуатаційному режимі. Це призводить також до перерозподілу моментів імпульсу рідини перед і за першим і другим робочими колесами. Комбінаторна залежність розвороту лопатей першого і другого робочих коліс як функція відкриття напрямного апарата (тобто зміна витрати або потужності

¹⁴² Ковалев Н. Н. Гидротурбины: конструкции и вопросы проектирования / Н. Н. Ковалев. – 2-е изд., доп. и перераб. – Ленинград : Машиностроение, 1971. – 584 с.

здвоєного гідроагрегата), Поряд зі зменшенням всіх видів гідравлічних втрат зводить до мінімуму циркуляційні втрати потоку, які залишає другий агрегат, і отже, мінімізує втрати на тертя під час обтікання потоком другої капсули, що сприяє підвищенню ККД здвоєного гідроагрегата порівняно з радіально-осьовими гідротурбінами.

Лопатева система першого робочого колеса працює з підпором у сприятливих для безкавітаційної роботи умовах і може бути виконана зі зменшеною густотою решітки лопатей для формування витрат. Друга лопатева система забезпечує кавітаційні показники здвоєного гідроагрегата загалом.

4.2 Контрроторні конструкції вентиляторів

Значні напрацювання у використанні контрроторності є і у сфері повітрянагнітачів – це так звані осьові вентилятори зустрічного обертання (ВЗО), що використовуються для потреб провітрювання шахт, рудників, метрополітенів тощо.¹⁴³ На рисунку 4.5 наведена схема такого вентилятора без апаратів.

Потік, увійшовши в перше колесо (K_1) в осьовому напрямку, потрапляє у друге колесо (K_2) закрученим проти його обертання, виходячи з вентилятора в осьовому напрямку. Друге колесо створює той самий момент, пов'язаний із закрученням потоку, що і попереднє. Оскільки умови роботи першого і другого коліс різні, то їх лопаткові вінця повинні мати різну геометрію. Вентилятор, поданий на рисунку 4.5, може розвинути такий самий тиск, як і двоступінчасті осьові вентилятори (рис. 4.6), однак вентилятор зустрічного обертання буде мати істотно менші масогабаритні параметри завдяки відсутності апаратів¹⁴⁴. Конструктивно такий ВЗО виконується або з окремими приводними двигунами для кожного колеса, або з двигунами, у яких обертаються і ротор і статор.

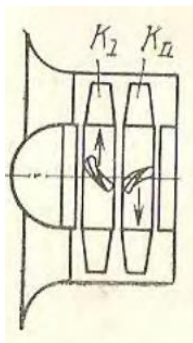


Рисунок 4.5 – Вентилятор зустрічного обертання

Існує двоступінчаста конструкція ВЗО розглянутого типу (рис. 4.5), але з апаратами між колесами, яка у вихідному розрахунковому положенні не змінює напрямок потоку¹⁴⁵. Апарат здійснює лопаткове регулювання за незмінної швидкості обертання коліс. На рисунку 4.7 наведена схема двоступінчастого вентилятора з вхідним напрямним апаратом (ВНА) і

¹⁴³ Брусиловский И. В. Аэродинамические схемы и характеристики осевых вентиляторов ЦАГИ : справочное пособие / И. В. Брусиловский. – Москва : Недра, 1978. – 198 с.

¹⁴⁴ Брусиловский И. В. Аэродинамика осевых вентиляторов / И. В. Брусиловский. – Москва : Машиностроение, 1984. – 240 с.

¹⁴⁵ Соколов Ю. Н. Дутьевой вентилятор встречного вращения для котлов малой мощности / Ю. Н. Соколов, И. Ю. Соколова // Теплоэнергетика. – 1974. – № 6. – С. 40–43.

спрямним апаратом (СА), розташованими перед і після системи контрроторних робочих коліс відповідно.

Розроблений навіть оригінальний тріступінчастий ВЗО (рис. 4.8). У цього вентилятора колеса K_I і K_{III} мають один напрямок обертання, а колесо K_{II} – протилежне. Момент, який створює колесо K_{II} , дорівнює сумі моментів коліс K_I і K_{III} . У такому вентиляторі приводом є спеціальний двигун із ротором і статором, що обертаються^{146, 147, 148}.

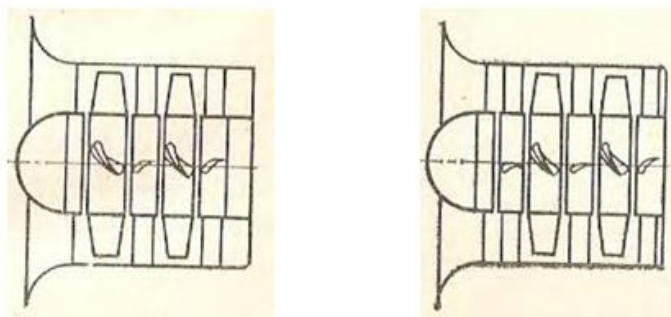


Рисунок 4.6 – Двоступінчасті осьові вентилятори

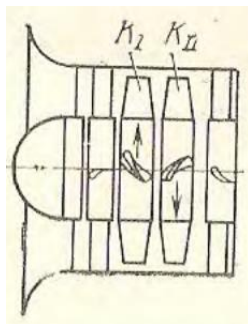


Рисунок 4.7 – Двоступінчастий вентилятор зустрічного обертання

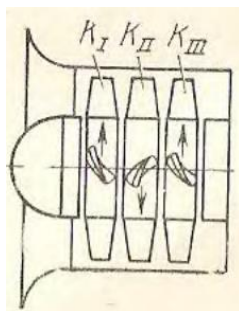


Рисунок 4.8 – Тріступінчастий вентилятор зустрічного обертання

¹⁴⁶ А. с. № 214725. Осевой многоступенчатый вентилятор / Г. М. Водяник, П. С. Карастан, В. С. Крутиков. – БИ, 1968. – № 12.

¹⁴⁷ Водяник Г. М. Разработка и исследование трехступенчатых вентиляторов встречного вращения для проветривания длинных тупиковых выработок / Г. М. Водяник, В. С. Крутиков, Л. С. Нарастай // В сб.: Совершенствование проветривания шахт. – Новочеркасск : Изд. НПИ, 1972. – С. 136–137.

¹⁴⁸ Крутиков В. С. Исследование аэродинамической схемы трехступенчатого вентилятора встречного вращения : диссертация на соискание научной степени канд. технических наук / В. С. Крутиков. – Новочеркасск, 1970. – 135 с.

Варто зазначити, що з усіх схем ВЗО найбільшого поширення отримали вентилятори, що складаються тільки з двох послідовно розташованих робочих коліс. Одними з основних схем, які використовуються, є вентилятори ОВВ-79-80 (рис. 4.9) і ОВВ-76л-91 із дифузором і без нього¹⁴⁹.

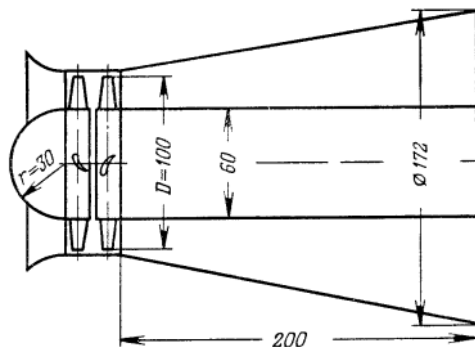


Рисунок 4.9 – Аеродинамічна схема вентилятора ОВВ-79-80

Статичний ККД вентилятора з дифузором перевищує 80 %. Такі вентилятори дуже часто виконуються з двома приводами (окремо для коліс K_I і K_{II}), потрібно враховувати, що споживані кожним із коліс потужності можуть суттєво відрізнятися. Лопатки обох коліс виконуються листовими.

За результатами дослідження¹⁵⁰ створеного і випробуваного в ЦАГІ вентилятора ОВВ-84-84в зустрічного обертання встановлена низка переваг за ККД і потужністю щодо інших конструкцій осьових вентиляторів. На рисунку 4.10 подана аеродинамічна (а) і компоновальна з вхідним коліном і вихідною дифузornoю частиною (б) схеми цього вентилятора.

Зупинимося детальніше на розподілі параметрів потоку у вентиляторах зустрічного обертання^{151, 152, 153}. Розглянемо вентилятор простої і поширеної схеми, що складається з двох послідовно встановлених робочих коліс, що мають протилежний напрямок обертання (див. рис. 4.5). Течію в колесах потрібно розглядати незалежно в тому сенсі, що колова швидкість кожного з них u_I і u_{II} буде вважатися позитивною, а знак швидкості закручування потоку буде визначатися як зазвичай.

Запишемо рівняння енергії для кожного з коліс на радіусі r , помітивши, що у вентиляторобудуванні прийняті позначення $v = c, v_u = c_u, v_m = c_a$.

$$p_{1I} + \frac{\rho c_{1aI}^2}{2} = p_{2I} + \frac{\rho c_{2aI}^2}{2} + \frac{\rho c_{2uI}^2}{2} - \rho u_I c_{2uI}; \quad (4.4)$$

¹⁴⁹ Аэродинамические схемы и характеристики осевых вентиляторов ЦАГИ. – С. 115.

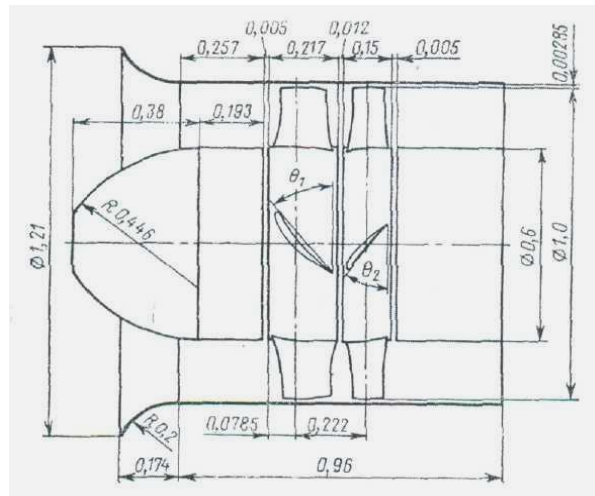
¹⁵⁰ Брусиловский И. В. Осовой вентилятор встречного вращения / И. В. Брусиловский, И. В. Клепапов, Е. М. Левин // В сб.: Промышленная аэродинамика. – Москва : Машиностроение, 1973. – Вып. 29. – С. 112–122.

¹⁵¹ Брусиловский И. В. Некоторые особенности вентиляторов встречного вращения / И. В. Брусиловский, В. И. Егоров : в кн.: Вентиляторы общепромышленного назначения. – Москва : Изд. Московского дома научно-технической пропаганды. – 1965. – С. 146–154.

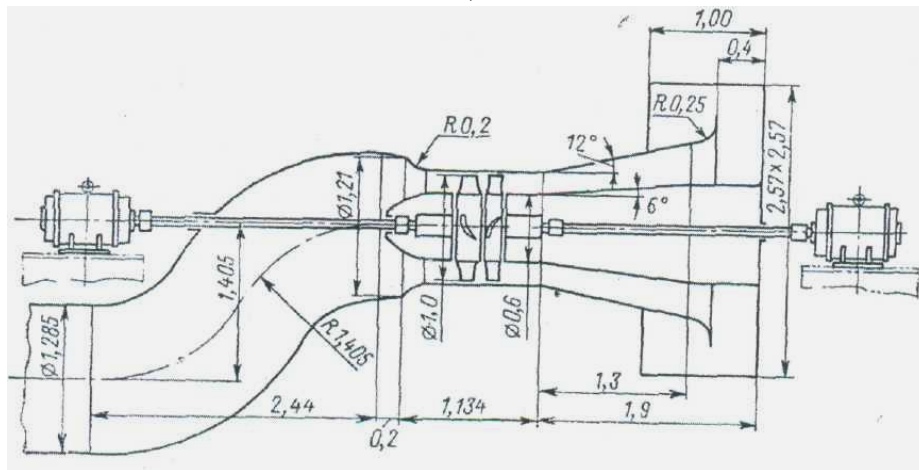
¹⁵² Дзидзигури А. А. Исследование некоторых вопросов аэродинамики осевых двухступенчатых вентиляторов встречного вращения / А. А. Дзидзигури, С. В. Мачарашвили // Труды института горной механики, разработки месторождений полезных ископаемых и физики взрыва. АН Груз. ССР. – Тбилиси, 1964. – Т. IV – С. 483–492.

¹⁵³ Becht W. Aerodynamik und Anwendbarkeit gegenläufiger Axialventilatoren / W. Becht // Heiz. – Luft. – Haustechnik. – 1960. – Bd. II, № 3.

$$p_{1II} + \frac{\rho c_{1aII}^2}{2} + \frac{\rho c_{1uII}^2}{2} = p_{2II} + \frac{\rho c_{2aII}^2}{2} + \frac{\rho c_{2uII}^2}{2} - \rho u_{II} (c_{2uII} - c_{1uII}).$$



а)



б)

Рисунок 4.10 – Аеродинамічна (а) і компоувальна (б) схеми вентилятора ОВВ-84-84в

Вважається, що проточна частина циліндрична, а течія відбувається в шарі постійної товщини $dr_{i-1} = dr_i = dr$, потік за кожним із коліс радіально урівноважений і підпорядковується рівнянню

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\rho c_u^2}{r}. \quad (4.5)$$

Перед першим колесом (K_I) статичний тиск $p_1(r) = \text{const}$, $c_{2uII} = 0$, $c_{1aI} \neq \text{const}$.

За колесом K_{II} в загалом швидкість закручування $c_{2uII} \neq 0$. Очевидно, що $p_{1II} \equiv p_{2I}$, $c_{1aII} \equiv c_{1aI}$, $c_{1uII} \equiv -c_{2uI}$. Енергія, передана струминці течії на радіусі r обома колесами,

$$(p_{T_u})_r = \rho u_I c_{2uI} + \rho u_{II} (c_{2uII} - c_{1uII}) = (p_{2II} + \frac{\rho c_{2aII}^2}{2} + \frac{\rho c_{2uII}^2}{2}) - p_{1I} + \frac{\rho c_{1aI}^2}{2}.$$

Диференціюючи кожне з рівнянь (4.4) за r і скориставшись (4.5), отримаємо відповідно для K_I і K_{II}

$$\begin{aligned} (u_I - c_{2u_I}) \left(\frac{c_{2u_I}}{r} + \frac{dc_{2u_I}}{dr} \right) &= c_{2a_I} \frac{dc_{2a_I}}{dr} - c_{1a_I} \frac{dc_{1a_I}}{dr}; \\ (u_{II} - c_{2u_{II}}) \left(\frac{dc_{2u_{II}}}{dr} + \frac{c_{2u_{II}}}{r} \right) - (u_{II} - c_{1u_I}) \left(\frac{dc_{1u_{II}}}{dr} + \frac{c_{1u_{II}}}{r} \right) &= c_{2a_{II}} \frac{dc_{2a_{II}}}{dr} - c_{1a_I} \frac{dc_{1a_I}}{dr}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

З (4.6) випливає, що умовою сталості теоретичного тиску (напору) за радіусом, постійності циркуляції $rc_{2u_I} = const$, $rc_{2u_{II}} = const$ відповідає як сталість за радіусом осьових швидкостей, так і зміна, але така, за якої дотримується їхня рівність перед вінцем і за ним на цьому радіусі.

Здебільшого вентилятор зустрічного обертання може мати схему ВНА + K_I + K_{II} + СА. Для таких вентиляторів вводиться параметр n^{154} , що характеризує розподіл теоретичного тиску між робочими колесами за однакових колових швидкостей на розрахунковому режимі:

$$n = \psi_{\tau I} / \psi_{\tau}, \quad \psi_{\tau} = \psi_{\tau I} + \psi_{\tau II}, \quad \psi_{\tau I} = n\psi_{\tau}, \quad \psi_{\tau II} = (1 - n)\psi_{\tau}, \quad (4.7)$$

де $\psi_{\tau} = 2p/\rho u^2$ – коефіцієнт тиску.

Трикутники швидкостей для вентилятора такої схеми наведені на рисунку 4.11. Через параметри $n_1 = c_{1u}/(c_{2u} - c_{1u})$ закрутки потоку перед робочим колесом і $n_2 = c_{3u}/c_{2u}$ закручення потоку за спрямним апаратом швидкості закручування у відповідних перетинах визначають так:

$$\begin{aligned} c_{1u_I} &= \frac{nn_1\psi_{\tau}}{2r}, \quad c_{2u_I} = \frac{n(n_1+1)\psi_{\tau}}{2r}, \quad c_{2u_{II}} = -c_{2u_I}; \\ c_{2u_{II}} &= \frac{[1-n(n_1+2)]\psi_{\tau}}{2r}, \quad c_{3u_{II}} = \frac{n_2[1-n(n_1+2)]\psi_{\tau}}{2r}. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Схема K_I + K_{II} відповідає $n_1 = 0$, $n_2 = 1$. Такі вентилятори виконують зазвичай із однаковим розподілом теоретичного тиску між колесами, тобто з $n = 0,5$. При $n_1 = -0,5$, $n = 0,5$ лопатки обох коліс можуть бути однаковими, але різного обертання (правого і лівого відповідно). Якщо в схемі ВНА+ K_I + K_{II} + СА вважати $n_1 = -1$, $n = 0,5$, то колеса K_I і K_{II} у ній порівняно з випадком схеми K_I + K_{II} немов міняються місцями: пара ВНА + K_I буде з осьовим входом потоку, а друге колесо на розрахунковому режимі буде працювати, як у схемі K_{II} + СА.

Розглянемо особливості регулювання вентиляторів зустрічного обертання¹⁵⁵. Під час регулювання установки з ВЗО поворотом лопаток звертає на себе увагу значно менш різко вираженим розривом на характеристиках порівняно зі звичайним двоступінчастим вентилятором, що має приблизно такі ж самі розрахункові параметри. Це можна пояснити «сепараторним»¹⁵⁶ ефектом першого колеса щодо другого: на відривних режимах роботи в колесі з'являється зворотний закручений потік, що порушує основну течію; перше колесо

¹⁵⁴ Ушаков К. А. Аэродинамика осевых вентиляторов и элементы их конструкций / К. А. Ушаков, И. В. Брусиловский, А. Р. Бушель. – Москва : Гостехиздат, 1960. – 422 с.

¹⁵⁵ Брусиловский И. В. Аэродинамический расчет осевых вентиляторов / И. В. Брусиловский. – Москва : Машиностроение, 1986. – 288 с.

¹⁵⁶ Иванов О. П. Аэродинамика и вентиляторы : учебник / О. П. Иванов, В. О. Мамченко. – Ленинград : Машиностроение, 1986. – 280 с.

розкручує цей потік другого колеса, тим самим запобігаючи або істотно зменшуючи порушення основної течії в останньому.

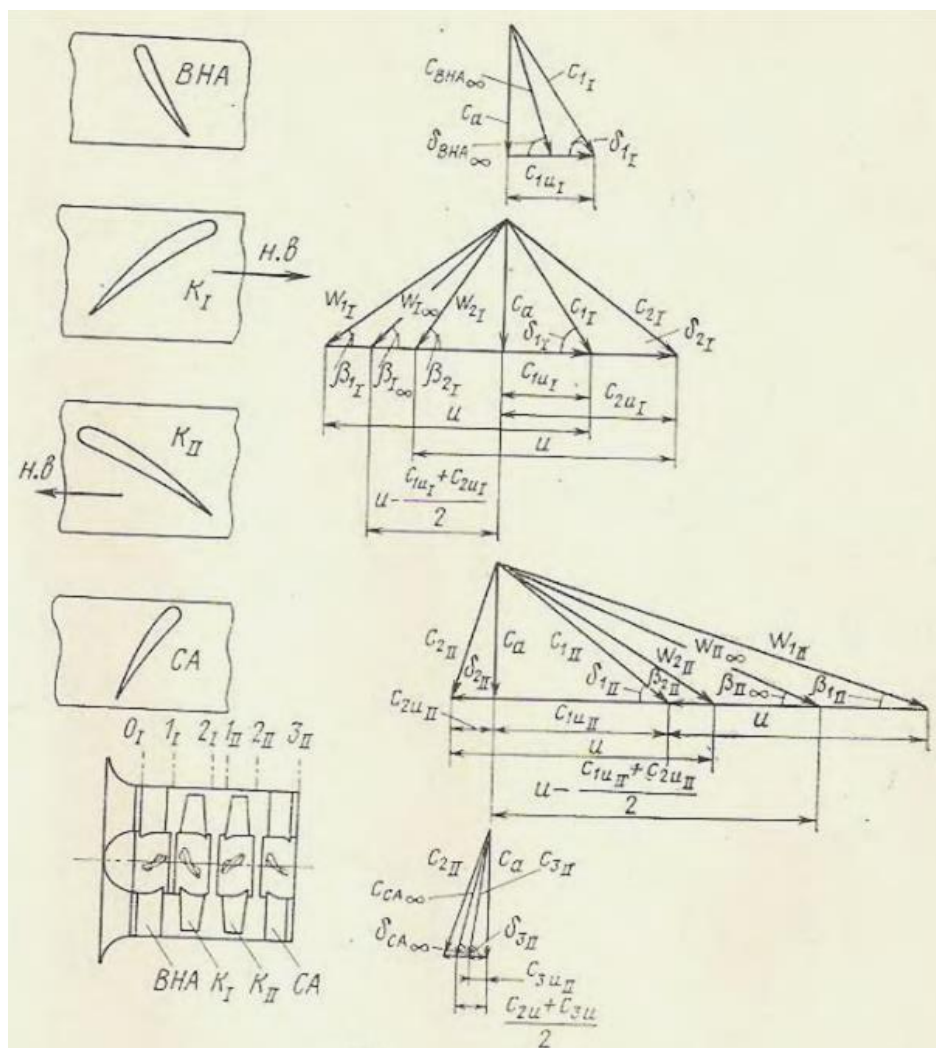


Рисунок 4.11 – Трикутники швидкостей у ВЗО, виконаного за схемою ВНА + КI + КII + СА

Звернемо увагу на зміну потужності, споживаної кожним колесом. Обидва колеса споживають однакову потужність на розрахунковому режимі або поблизу нього. За значень продуктивності $Q < Q_p$ потужність, споживана другим колесом, зростає, а за $Q > Q_p$, навпаки, зменшується, що переважно пов'язано зі зміною швидкості закручування потоку перед другим колесом. За кутів установки, які більші розрахункових, зазвичай також є точка, де потужності однакові, але зона, де потужність другого колеса більше, розширюється і, крім того, вона більшою мірою перевершує потужність першого колеса. За кутів установки, менших за розрахункові, зазвичай більше потужність, споживана першим колесом. Ці обставини необхідно враховувати під час вибору індивідуального привода коліс вентилятора зустрічного обертання. Такий вентилятор може ефективно регулюватися і завдяки зміні кута установки тільки лопаток першого колеса. Зона регулювання дещо зменшується, але ще досить обширна, щоб в низці випадків цей значно простіший у конструктивно-експлуатаційному відношенні спосіб міг успішно застосовуватися.

Викликає інтерес можливість роботи вентилятора зустрічного обертання за різних частот обертання першого і другого роторів. Досвід розробки ВЗО показує, що вони часто виконуються з індивідуальним приводом робочих коліс. Це відкриває можливості їхнього незвичайного регулювання – зміною відношення кутових швидкостей коліс, практично – зміною швидкості обертання тільки одного колеса. Виконання вентилятора з неповоротними лопатками призводить до спрощення його конструкції, відсутності зазору у втулці, мінімального рівномірного зазору між корпусом і лопатками, що сприяє підвищенню ККД. Легко здійснюється автоматизація регулювання без додаткових механізмів у конструкції самого вентилятора¹⁵⁷.

Регулювання вентилятора зустрічного обертання зміною відношення кутових швидкостей його робочих коліс, очевидно, є перспективним ще й з таких причин. Маючи зазначені вище якості, характерні під час регулювання зміною кутової швидкості, таке регулювання призводить також до зміни безрозмірної характеристики вентилятора, що є властивістю регулювання поворотом лопаток.

Розглянемо теоретичний тиск кожного з коліс і сумарний теоретичний тиск вентилятора. Покажемо, що його характеристика за даної швидкості обертання одного колеса визначається відношенням швидкостей коліс. Відповідно до рівняння Ейлера і використовуючи рисунок 4.12, можна записати теоретичний тиск для кожного колеса на радіусі r , де спостерігаються колові швидкості u_I і u_{II} , в такому вигляді:

$$p_{TvI} = \rho u_I c_{aI} (\operatorname{ctg} \beta_{1I} - \operatorname{ctg} \beta_{2I}); \quad (4.9)$$

$$p_{TvII} = \rho u_{II} c_{aII} (\operatorname{ctg} \beta_{1II} - \operatorname{ctg} \beta_{2II}). \quad (4.10)$$

Беручи до уваги, що завжди $c_{aI} \equiv c_{aII} = c_a$, $c_{1uII} \equiv -c_{2uI}$, можна показати, що

$$\operatorname{ctg} \beta_{1II} = \frac{u_{II} - c_{1uII}}{c_{aII}} = \frac{u_I + u_{II}}{c_a} - \operatorname{ctg} \beta_{2I}. \quad (4.11)$$

А оскільки $\operatorname{ctg} \beta_{1I} = u_I / c_a$, то

$$\operatorname{ctg} \beta_{1II} = \left(1 + \frac{n_{II}}{n_I}\right) \operatorname{ctg} \beta_{1I} - \operatorname{ctg} \beta_{2I}. \quad (4.12)$$

З (4.12) випливає, що кут входу потоку в друге колесо, тобто режим його роботи, повністю визначається режимом роботи першого колеса і відношенням їхніх швидкостей $n_{II}/n_I = u_{II}/u_I$. Тепер (4.10) можна записати в такому вигляді:

$$p_{TvII} = \rho u_{II} c_a \left[\left(1 + \frac{n_{II}}{n_I}\right) \operatorname{ctg} \beta_{1I} - \operatorname{ctg} \beta_{2I} - \operatorname{ctg} \beta_{2II} \right]. \quad (4.13)$$

Сумарний теоретичний тиск всього вентилятора $p_{Tv} = p_{TvI} + p_{TvII}$ запишемо, використовуючи (4.9) і (4.13), припустимо, що швидкість обертання першого колеса не змінюється і винесемо його колову швидкість u_I за дужку.

¹⁵⁷ Аэродинамический расчет осевых вентиляторов. – С. 214.

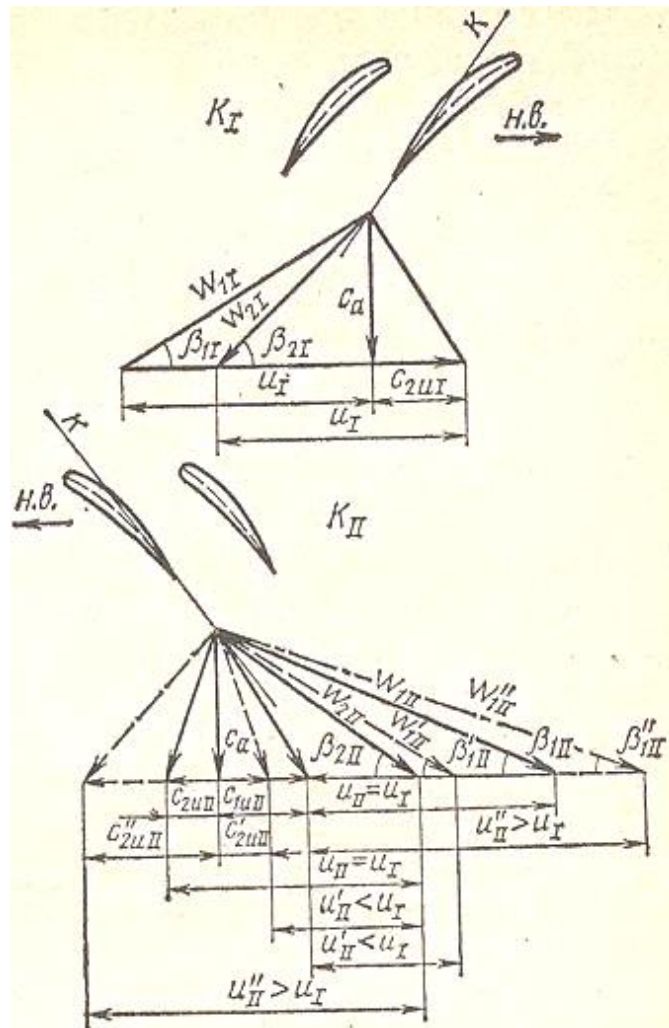


Рисунок 4.12 – Трикутники швидкостей у робочих колесах ВЗО за різних u_{II}/u_I (κ – дотична до середньої лінії профілю в задній кромці)

Отримаємо

$$p_{Tv} = \rho u_I c_a \left\{ \left[1 + \frac{n_{II}}{n_I} \left(1 + \frac{n_{II}}{n_I} \right) \right] ctg \beta_{1I} - \left(1 - \frac{n_{II}}{n_I} \right) ctg \beta_{2I} - \frac{n_{II}}{n_I} ctg \beta_{2II} \right\}. \quad (4.14)$$

За цих швидкостей c_a і u_I , що визначають режим роботи першого колеса, а згідно з (4.12) за даного n_{II}/n_I і режиму роботи другого колеса теоретичний тиск вентилятора зустрічного обертання повністю визначається відношенням швидкостей обертання його робочих коліс. Якщо припустити, що незмінною є швидкість обертання другого колеса, а регулювання здійснюється завдяки зміні швидкості першого, то вийде вираз для p_{Tv} , який буде тотожним виразу (4.14), якщо врахувати, що $u_I = u_{II} n_I / n_{II}$. Значення c_a , u_I (або u_{II}) і n_I/n_{II} визначають режим роботи кожного робочого колеса, тим самим визначають кут атаки і величину швидкостей, втрати тиску в колесах, а отже, характеристики тиску і ККД. За незмінних n_I/n_{II} , u_I (або u_{II}) робочі точки характеристики цього вентилятора повністю визначаються величиною c_a .

Потужнісна характеристика першого колеса не залежить від величини n_I/n_{II} . Однак в обох класах спостерігається різко виражений просторовий потік з обертовими вихровими зонами, є певний вплив другого колеса на течію в першому колесі, який проявляється по-різному, оскільки течія у другому колесі істотно залежить від величини n_I/n_{II} . Це видно з трикутників швидкостей на рисунку 4.12 за різних u_{II}/u_I .

Зі збільшенням величини n_I/n_{II} потужність, споживана другим колесом, змінюється більш значно, а перехід до турбінного режиму, коли споживана потужність дорівнює нулю, відбувається за меншої продуктивності. Значна зміна тиску за такої продуктивності відбувається завдяки другому колесу і обумовлена переважно зміною його теоретичного тиску $p_{T_{vII}} = \rho u_{II}(c_{2uII} - c_{1uII}) = \rho u_{II}(c_{2uII} - c_{2uI})$. Швидкість закручування потоку за першим колесом c_{2uI} водночас не змінюється. Зміна режиму роботи другого колеса через напрямні дії решітки профілів відбувається так, що величина і напрямок відносної швидкості на виході w_{2II} змінюються мало або практично не змінюються (див. рис. 4.12), і тому швидкості c_{2uII} і u_{II} пов'язані співвідношенням $u_{II} - c_{2uII} \approx \text{const}$.

Потрібно також зазначити, що під час регулювання спостерігається помітне зрушення режиму максимального ККД за продуктивністю. Для кожного з робочих коліс існує оптимальний кут атаки α_1 , за якого ККД максимальний. Цей режим першого колеса за зміни n_I/n_{II} не змінюється. Отже, зрушення режиму максимального ККД всього вентилятора за продуктивністю відбувається завдяки другому колесу.

Серед ВЗО відома також конструкція осьового контрроторного вентилятора Янагісава і Осава,¹⁵⁸ який використовується для охолодження комп'ютерних процесорів, а також може бути використаний у будь-якій іншій системі вентиляції або охолодження. Вентилятор складається з двох осьових коліс, що обертаються в протилежні боки. Вони приводяться в рух електромагнітами (рис. 4.13).

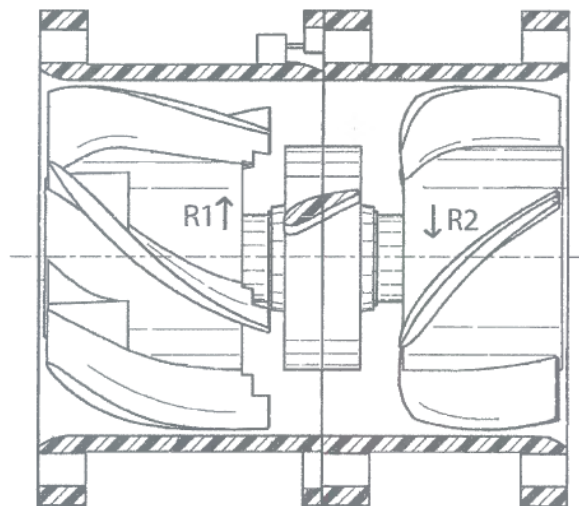


Рисунок 4.13 – Схема контрроторного осьового вентилятора Янагісава і Осава

За даними авторів така конструкція дозволяє поліпшити структуру потоку повітря, знижуючи одночасно споживану потужність, шум і вібрацію.

¹⁵⁸ Patent EP 2508760 A2 Counter-rotating axial flow fan / Atsushi Yanagisawa, Honami Oosawa – printed. 10.10.2012.

4.3 Контрроторні корабельні гребні гвинти

Сьогодні в суднобудуванні використовуються як класичні (гвинтові), так і водометні рушії. Серед них також знайшли застосування контрроторні конструкції. Розглянемо деякі конструкції гребних гвинтів морської техніки, під час створення яких використовувався принцип контрроторності. Зокрема контрроторний привод застосували ще за часів Другої світової війни на японських торпедах типу «кайтен», вироблених у 1944–1945 рр. і керованих пілотами-смертниками (рис. 4.14). Такий рушій забезпечував торпеду, що йде на невеликій глибині, швидкість понад 70 км/год.¹⁵⁹



Рисунок 4.14 – Зовнішній вигляд рушія торпеди типу «Кайтен»

Втрати на закручування струменя знижують ККД рушія на 12–18 % (з урахуванням впливу в'язкості рідини). Ці втрати можна істотно зменшити застосуванням пари співвісних гребних гвинтів протилежного обертання, що мають спільну вісь обертання (рис. 4.15). Кожен гвинт такої пари розташований на власному валу так, що вал заднього гвинта проходить через порожнистий вал переднього. Крутний момент двигуна за допомогою спеціального редуктора передається так, що гвинти обертаються у протилежні боки (один гвинт правий, інший – лівий). Упор комплексу дорівнює сумі упорів кожного гвинта.¹⁶⁰

Відзначимо водночас, що упор – це сила, що штовхає судно вперед. У неї гребний гвинт перетворює обертання вала двигуна. Під час обертання гвинта на поверхнях його лопатей, обернених у бік руху судна (всмоктувальних), створюється розрідження, а на обернених назад (нагнітаючих) – підвищений тиск води. Унаслідок різниці тисків на лопатях виникає підйомна сила Y . Розклавши силу на складові – одну, спрямовану в бік руху судна, а другу перпендикулярно до нього, отримуємо силу P , що створює упор гребного гвинта і силу T , що утворює крутний момент, який долається двигуном (рис. 4.16).

Підвищення ефективності такої співвісної контрбертової пари гвинтів порівняно з одиночним гребним гвинтом пояснюється істотним зниженням закручування струменя. Задній гребний гвинт використовує енергію, витрачену переднім гвинтом на закручування потоку, а також частково використовує енергію сліду, що утворюється за переднім гвинтом,

¹⁵⁹ Ёкота Ю. Субмарини-самоубийці. Секретное оружие Императорского флота Японии. 1944–1947 гг. / Ю. Ёкота ; пер. В.Д. Кайдалова. – Москва : Центрполиграф, 2005. – 317 с.

¹⁶⁰ Артюшков Л. С. Судовые двигатели : учебник / Л. С. Артюшков, А. Ш. Ачкинадзе, А. А. Русецкий. – Ленинград : Судостроение, 1988. – 296 с.

що трохи знижує і в'язкі втрати. Для такої контрроторної пари знижуються і втрати, пов'язані з кінцевою кількістю лопатей. ККД такого комплексу у вільній воді може на 10–12 % перевищувати ККД еквівалентного за навантаженням одиночного гвинта.¹⁶¹

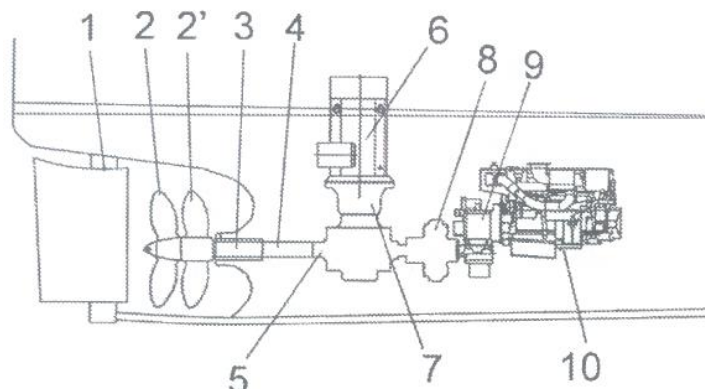


Рисунок 4.15 – Схема співвісної пари контрроторних гвинтів:

1 – кермо; 2 – гвинт (ротор); 2' – контрроторний гвинт; 3 – вал контрротора;
4 – вал ротора; 5 – корпус; 6 – електричний двигун; 7 – редуктор; 8 – муфта;
9 – редуктор; 10 – ДВС

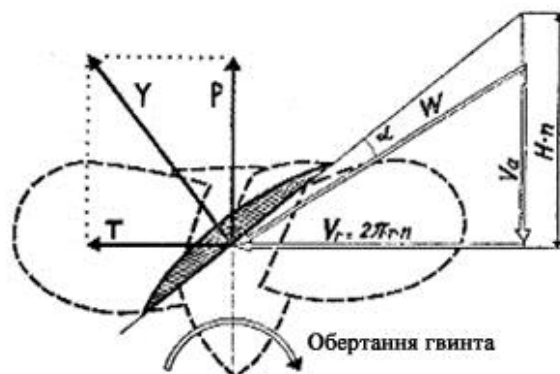


Рисунок 4.16 – Схема сил і швидкостей на лопаті гвинта

Схема з контрроторним корабельним водометним рушієм передбачає наявність приводного двигуна, на вхідний кромці якого закріплений один із гвинтів. Другий гвинт закріплений віссиметрично першому на іншій незалежній опорі. Він може бути нерухомим і виконувати значення спрямного апарата або приводиться в рух завдяки набігаючим потокам від першого гвинта, підвищуючи у такий спосіб упор (рис. 4.17).

Під час розрахунку і проектування контрроторних гвинтових комплексів зазвичай вважають, що потужність і крутний момент діляться навпіл, частота обертання гвинтів однакова, відстань між гвинтами $(0,20-0,25) D$. Задній гвинт має менший діаметр, щоб запобігти потраплянню кінцевих вихорів, що збігають із краю лопатей переднього гвинта, на лопаті заднього, та уникнути ерозії цих лопатей. Задній гвинт має більший крок, ніж

¹⁶¹ Воеводская Е. Н. Вопросы проектирования и эффективность использования соосных гребных винтов на крупнотоннажных судах / Е. Н. Воеводская // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. – 1975. – № 285. – С. 112–122.

передній, оскільки осьова складова швидкості натікання рідини на задній гвинт виявляється більше, ніж на передній гвинт¹⁶².

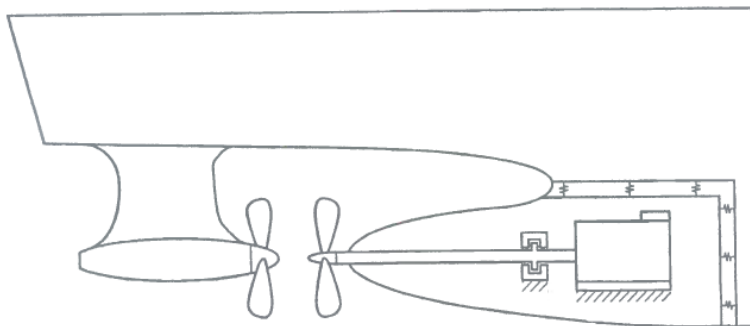


Рисунок 4.17 – Схема контрроторного водометного двигуна

Дослідження взаємодії комплексу з корпусом судна показує, що коефіцієнт всмоктування істотно знижується, оскільки комплекс індукує дещо менші швидкості поблизу корпусу. Дещо знижується нерівномірність попутного потоку і його середнє значення у зв'язку з тим, що контрроторна пара більше віддалена від корпусу в осьовому напрямку, ніж одиночний гвинт. Все це призводить до того, що коефіцієнт впливу корпусу зростає на 10–15 %, що дозволяє в підсумку знизити потрібну потужність до 20 %.

Зниження втрат енергії, що витрачаються на закручування струменя, може бути досягнуто попереднім закручуванням потоку, що набігає на гвинт в бік, протилежний обертанню гребного гвинта. Завдяки використанню гвинтом енергії такого закрученого потоку виявляється можливим підвищити пропульсивний коефіцієнт рушійного комплексу. (Пропульсивний коефіцієнт – характеристика ефективності рушія судна, що являє собою відношення корисної потужності за даної швидкості судна до потужності, що підводиться до рушія для надання судну цієї швидкості. Для суден цей коефіцієнт коливається в межах 0,45–0,55). Для створення попередньої закрутки потоку кормовій частині судна можна надати несиметричної форми (рис. 4.18), яка проектується так, щоб можна було забезпечити максимальне перетікання рідини з правого борту на лівий вище лінії вала (для гвинта правого обертання) і забезпечити попереднє закручування потоку в площині диска. Це дозволяє знизити потрібну потужність до 7 % або підвищити швидкість судна до 1 км/год.

Для підвищення ефективності рушійного комплексу запропоновано оригінальний пристрій, ідея якого полягає в установці за гребним гвинтом вільно обертового контргвинта, діаметр якого більше, ніж діаметр гвинта, а частота вільного обертання менше (рис. 4.19). Контргвинт спроектований так, що його внутрішня частина, що перебуває у струмені гвинта, працює як турбіна так, що контргвинт обертається під дією потоку, що на нього набігає, а ділянки лопатей, розташовані поза струменем гвинта, створюють додатковий упор (рис. 4.20). Оскільки під час роботи контргвинта в турбінному режимі викликані коллові швидкості, спрямовані у протилежний бік порівняно з наявними швидкостями гвинта,

¹⁶² Лаврентьев В. М. Расчет парных соосных винтов / В. М. Лаврентьев // Труды ЦНИИморфлота. – 1968. – № 89. – С. 22–48.

пристрій дозволяє знизити і втрати на закручування струменя. Все це призводить до підвищення ККД комплексу порівняно з ізольованим гвинтом¹⁶³.

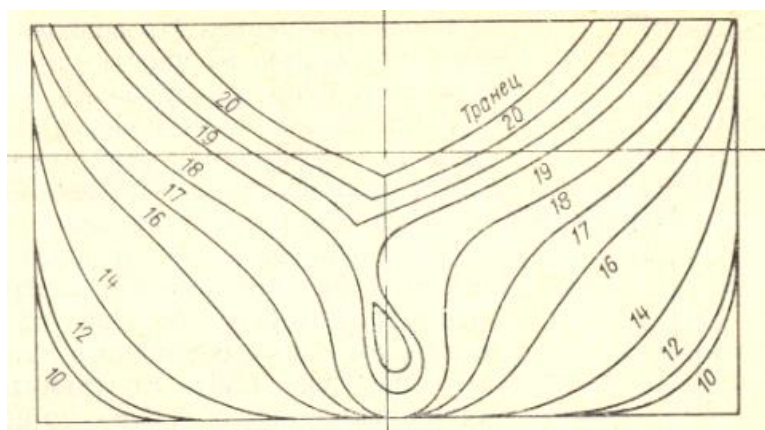


Рисунок 4.18 – Несиметричний кормовий край судна

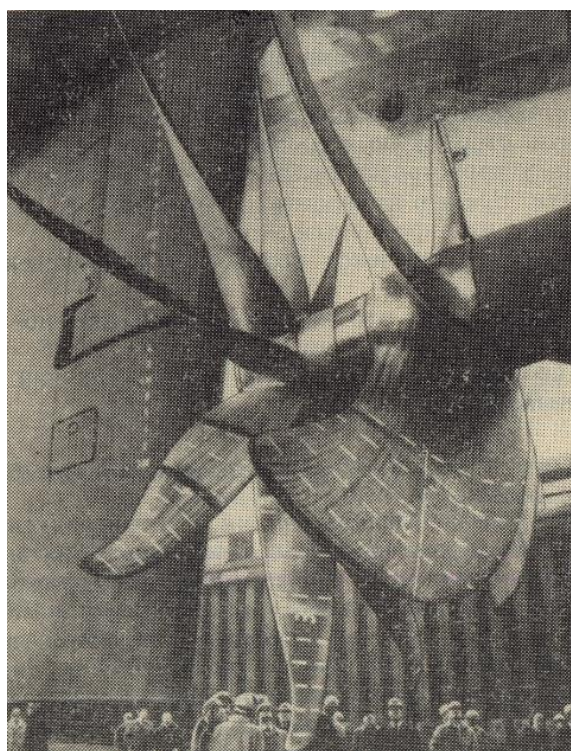


Рисунок 4.19 – Русійський контрроторний комплекс

Ефективність комплексу зростає зі збільшенням коефіцієнта навантаження. Досліди показують, що найбільш сприятливе співвідношення частот контргвинта і гвинта становить 0,35–0,45. Упор комплексу зростає на 10–13 % за постійної потужності, ККД збільшується до 10 %.

Розглянемо кінематику контробротних гребних гвинтів (рис. 4.21)¹⁶⁴. Під час обертання лопатей першого (1) і другого (2) гвинтів перед їхніми вхідними кромками

¹⁶³ Grim O. Propeller and vane wheel / O. Grim // Journal of ship research. – 1980. – № 24. – P. 203–226.

(перерізи B_1 і B_2) генерується розрідження, і частки водно-газового потоку з деякого перерізу H , яке називається зоною незбуреного потоку, починають переміщуватися до перерізу B_1 із прискоренням, що наростає (рис. 4.21 в, зона $H-B_1$). Під час досягнення вхідної кромки лопатей першого робочого колеса водно-газовий потік стискається в зоні B_1-K_1 , його осьова швидкість зменшується, а статичний тиск, навпаки, збільшується (див. рис. 4.21 б, зони $H-B_1$, B_1-K_1).

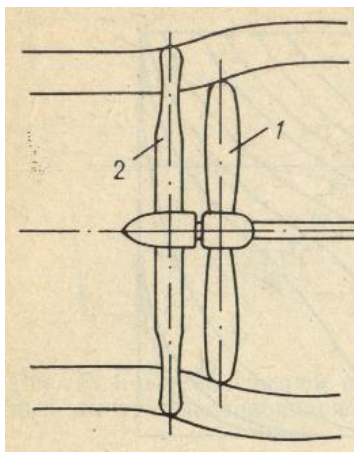


Рисунок 4.20 – Схема рушійного комплексу гвинт (1) – вільнообертовий контргвинт (2)

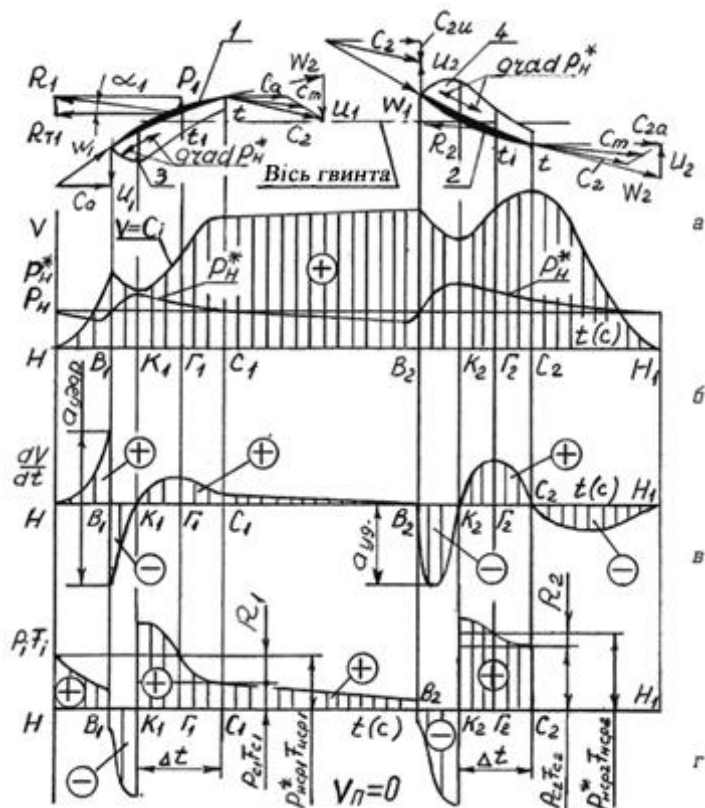


Рисунок 4.21 – Кінематичний аналіз системи контробротних гребних гвинтів

Процес стиснення водно-газової суміші здійснюється до перетину K_1 , після якого водно-газовий потік у зоні K_1C_1 прискорюється. Процес його прискорення в цій зоні завжди супроводжується зменшенням статичного тиску до P_n у перетині C_1-C_1 , зона K_1-C_1 водночас є реактивним соплом, у якому генерується тяга R_1 лопатей першого робочого колеса, оскільки робота первинних рушійних сил у зоні $H-V_1$ повністю компенсується роботою аналогічних сил у зоні V_1-K_1 (див. рис. 4.21 г). Позитивна робота первинних рушійних сил від зміни статичних тисків у зоні реактивного сопла K_1C_1 повністю компенсується роботою сил опорів $P_{c1}F_{c1}$ і R_1 .

Водночас необхідно зазначити, що вектор тяги R_1 , який генерується лопатями першого робочого колеса, завжди протилежний середньому вектору C_T (див. рис. 4.21 а) і становить певний кут α з віссю обертання гребних гвинтів. Вектор тяги R_1 розкладається на дві складові R_{T1} і P_1 , де R_{T1} – осьова складова, P_1 – підйомна (поперечна) сила, що генерується лопатями першого робочого колеса, яка дає можливість формулювати теорему про підйомні сили продувальних лопатей першого робочого колеса гребних гвинтів. Те ж саме стосується і лопатей другого робочого колеса¹⁶⁵.

Дотична до будь-якої точки кривої, що характеризує зміну осьових швидкостей водно-газового потоку в зоні $H-V_1$, має певний кут нахилу α до горизонту, водночас $\operatorname{tg}\alpha$ умовно характеризує прискорення водно-газового потоку, зі збільшенням осьової швидкості останнього зростає і має позитивне значення. У перетині V_1 $\operatorname{tg}\alpha$ миттєво змінює своє значення на негативне, що є свідченням наявності в перерізі V_1 так званої кінематичної зони пружного удару, сила якого прямо пропорційна добутку секундної маси продувального потоку на прискорення удару (див. рис. 4.21 в). Водночас генеруються потужні ударні хвилі в коливальному режимі, що є основним недоліком як однорядних, так і контробретових гребних гвинтів, обмежуючи колову швидкість на лопатях гребних гвинтів не більше ніж 40 м/с. Згідно з планом швидкостей на вхідній і вихідній кромках лопатей першого робочого колеса (див. рис. 4.21 а) впливає, що потік зазнає максимальної закрутки на вихідній кромці, водночас під дією відцентрових сил генерується додатковий градієнт статичних тисків $\operatorname{grad} P_d$, спрямований до центра перетину C_1 , який одночасно гальмує і стягує потік у джгут у зоні C_1-V_2 .

Процес гальмування потоку в зоні C_1-V_2 під дією додаткового градієнта статичного тиску $\operatorname{grad} P_d$ позитивно позначається на кінематиці потоку, оскільки останній досягає вхідної кромки лопатей другого робочого колеса за нульового прискорення і сила удару в перетині V_2 буде регламентуватися тільки нахилом характеристики зміни осьових швидкостей потоку в зоні V_2-K_2 . Сила удару у другій кінематичній зоні непружного удару (перетин V_2) майже наполовину менше, ніж аналогічна в перетині V_1 . Однак оберти другого робочого колеса істотно нижче, ніж оберти першого. Це пояснюється тим, що за наявності на вході зустрічної закрутки потоку по коритцях лопатей другого колеса ступінь стиснення загальмованого потоку в зоні V_2-K_2 істотно перевершує аналогічну в зоні V_1-K_1 першого робочого колеса, регламентуючи у такий спосіб, розрахункове гідродинамічне навантаження на лопаті другого колеса. Тому будь-яке збільшення обертів другого робочого колеса призведе до збільшення гідродинамічного навантаження на його лопаті, що невідворотно призведе до поломки останніх.

¹⁶⁵ Справочник по малотоннажному судостроению / составитель Б. Г. Мордвинов. – Ленинград : Судостроение, 1988. – 576 с.

Отже, кінематичний аналіз показує, що основною перевагою контрроторних гребних гвинтів є те, що їхня спільна робота істотно знижує потужність ударних хвиль, що генеруються в зоні непружного удару (перетин В₂). Це і призводить до зростання ККД такої системи порівняно з одиночним гвинтом.

Цікава конструкція так званого апарата реактивного руху П. М. Патерсона і Б. Д. Девіса¹⁶⁶. Винахід належить до водних струменевих двигунів і може бути використаний як апарат реактивного руху на човнах і судах, а також як стандартний насос у гідроенергетиці (рис. 4.22). Ідея цього апарата полягає у створенні вдосконаленого насоса низького тиску зі зменшеними масовими характеристиками, який був би ефективний за різних швидкостей роботи, зокрема мав би можливість забезпечувати необхідну швидкість за більш високих швидкостей.

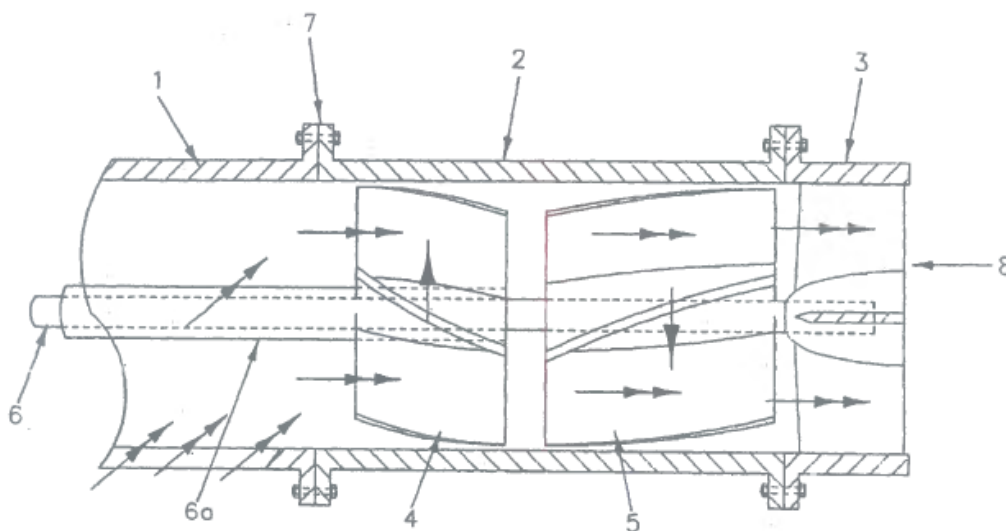


Рисунок 4.22 – Схема апарата реактивного руху:

- 1 – всмоктувальний корпус; 2 – корпус насоса; 3 – випускний корпус;
- 4 – робоче колесо; 5 – контрроторне робоче колесо; 6 – вал контрротора;
- 6а – вал ротора; 7 – ущільнення; 8 – спрямний апарат

Апарат складається з всмоктувального корпусу 1, корпусу насоса 2 і випускного корпусу 3, які пов'язані і ущільнені між собою. У корпусі насоса 2 розміщене робоче колесо 4 і контрроторне колесо 5, що має протилежний зміст обертання. Колеса закріплені на відповідних валах (6 і 6-а) і приводяться в рух електроприводом через коробку передач. У випускному корпусі 3 нерухомо закріплений спрямний апарат, що виконує також функцію додаткової опори вала 6.

4.4 Контрроторні конструкції авіаційних двигунів

Значно ширше і успішніше розглянута контрроторна схема установки робочих органів знайшла своє застосування в авіабудуванні. Необхідні умови роботи проєктованих апаратів часом не залишали вибору для застосування іншого технічного рішення, крім контрроторного. Це, зокрема, конструкції тягового гвинта гелікоптера КБ Камова палубного

¹⁶⁶ Patent EP 1644243 B1 Impeller drive for a water jet propulsion unit / Paul Mark Paterson, Barry John Davies – printed. 08.09.2010.

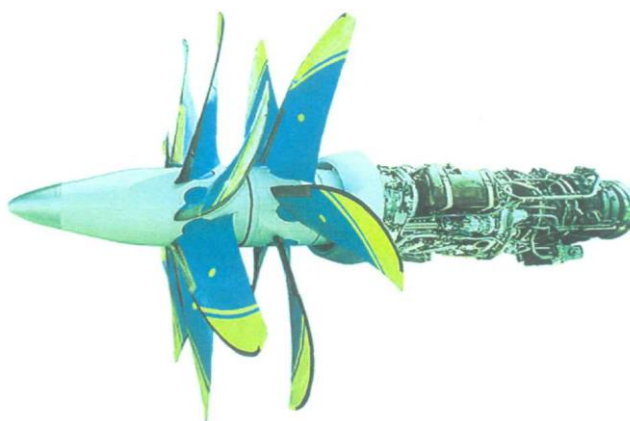
базування (рис. 4.23), тягових авіадвигунів бомбардувальника Ту-95 (турбогвинтовий двигун НК-12ПМ – рис. 4.24 а) і Ан-70 (гвинтовентиляторного двигуна Д-27 – рис. 4.24 б)¹⁶⁷.



Рисунок 4.23 – Гелікоптер Ка-25 із контрроторною системою тягових гвинтів



а



б

Рисунок 4.24 – Турбогвинтовий двигун НК-12ПМ (а)
і гвинтовентиляторний двигун Д-27 (б)

Ідею використання контрроторних динамічних машин – систем із співвісно розташованими гвинтами – висунув ще в 1754 р М. В. Ломоносов. Він запропонував використовувати для підйому метеорологічного зонда механізм співвісних гвинтів, який приводився в рух заводною пружиною.

З початку ХХ століття контрроторні конструкції тягових гвинтів почали використовуватися в гелікоптеробудуванні. У 1919–1920 рр. аргентинський інженер Р. Пескара спроектував і побудував один із перших гелікоптерів співвісної схеми (Pescara 2F). Апарат мав 4 гвинта, з'єднані попарно за типом біплана і, які обертаються в протилежні боки (рис. 4.25)¹⁶⁸.

¹⁶⁷ Казанджан П. К. Теория авиационных двигателей. Теория лопаточных машин : учебник / П. К. Казанджан, Н. Д. Тихонов, А. К. Янко ; под ред. П. К. Казанджана. – Москва : Машиностроение, 1983. – 217 с.

¹⁶⁸ Савинский Ю. Э. Наследники инженера да Винчи. Новеллы о вертолетах и людях. – Режим доступа : <http://y-savinskiy.ru/books/>.

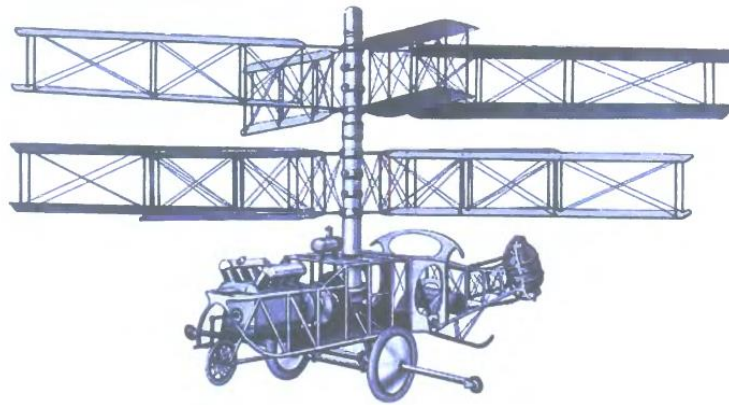


Рисунок 4.25 – Гелікоптер Pescara 2F

З 1944–1945 рр. у СРСР розробляли співвісні гелікоптери колективи конструкторів Яковлева і Камова^{169, 170}. Унаслідок цього були створені гелікоптери ЯК-ЕГ «Шутка» (рис. 4.26) і КА-8 «Іркутянин» (рис. 4.27). Варто зазначити, що саме для КБ Камова співвісна схема стала основною під час проектування гелікоптерів, і до сьогодні гелікоптери «КА» єдині у світі такої схеми, що випускаються серійно.

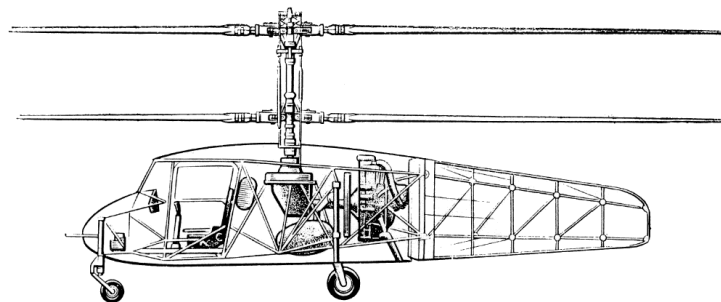


Рисунок 4.26 – Гелікоптер ЯК-ЕГ «Шутка»



Рисунок 4.27 – Гелікоптер КА-8 «Іркутянин»

¹⁶⁹ <https://vertoletrussia.jimdo.com/>.

¹⁷⁰ Лалетин К. Н. Практическая аэродинамика вертолета Ка-26 / К. Л. Лалетин. – Москва : Транспорт, 1974. – 192 с.

Використання контрроторних конструкцій гвинтів у літакобудуванні здатне сприяти істотному зниженню реактивного моменту, що передається від силової установки до літака. Це дозволяє усунути необхідність в аеродинамічних засобах компенсації негативної дії цього моменту. Крім того, співвісні гвинти мають більш високий ККД, ніж поодинокі, підвищують силу тяги до 15 %. Унаслідок цього відбувається поліпшення льотних якостей літака і підвищується паливна економічність польоту.

Сьогодні для літаків і гелікоптерів широко застосовують газотурбінні двигуни. У цих двигунах тиск повітря на вході в камеру згоряння підвищується за допомогою спеціального компресора, що приводиться в дію газовою турбіною, внаслідок чого створюється сила тяги також і в статичних умовах.

Принцип дії газотурбінного двигуна полягає в такому. Компресор 3 (рис. 4.28) у безперервний спосіб стискає і подає повітря в камеру згоряння 4, розташовану перед турбіною 5. У камері згоряння повітря нагрівається також за допомогою безперервного спалювання палива. Унаслідок стиснення і нагрівання газ набуває запасу високої енергії. Корисно використовувана частина цієї енергії використовується на створення роботи в газовій турбіні і на прискорення газового струменя у вихідному соплі.

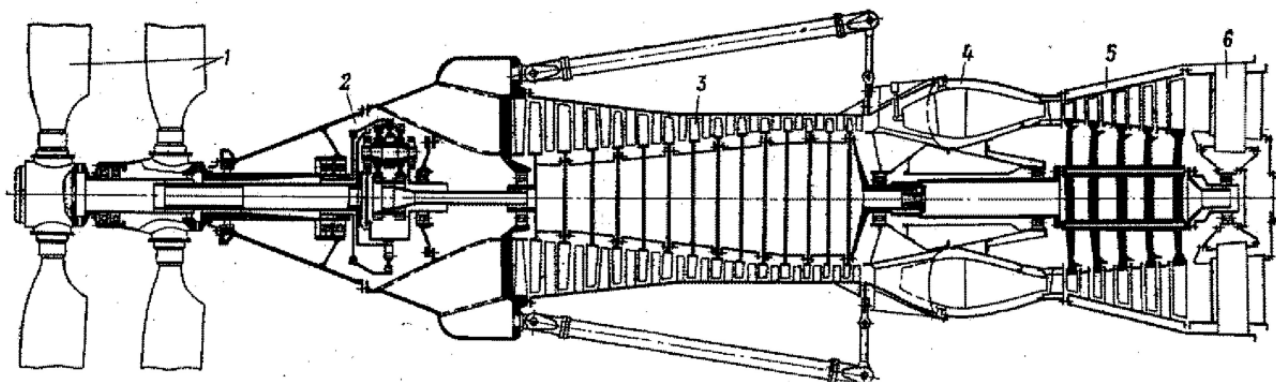


Рисунок 4.28 – Турбогвинтовий двигун із двома співвісними контрроторними повітряними гвинтами

Контрроторні повітряні гвинти обертаються з однаковою частотою у взаємно протилежних напрямках. Для привода таких співвісних гвинтів можуть застосовуватися прості, планетарні або диференціальні передачі. Редуктори, створені на основі простих і планетарних передач, зазвичай багатоступінчасті. Вони відрізняються великою складністю і значною масою і застосовуються переважно в силових установках гелікоптерів. У ТГД перевага надається диференціальним передачам.

Проста подвійна передача (рис. 4.29) може застосовуватися як останній ступінь редуктора гелікоптера з контрроторними повітряними гвинтами. За певного значення вхідного моменту співвідношення між моментами переднього і заднього гвинтів може бути різним залежно від кутів установки лопатей гвинтів. Якщо на повітряних гвинтах встановити однакові моменти, то момент на вузлах кріплення двигуна буде дорівнювати нулю. Тому гелікоптер із контрроторними тяговими гвинтами не має хвостового гвинта. Мінімальне значення передавального відношення виходить не менше ніж $\frac{1}{6} \div \frac{1}{8}$ як у простій подвійній передачі.

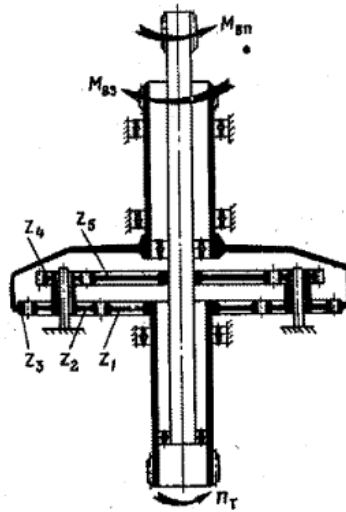


Рисунок 4.29 – Схема простого редуктора для привода контрроторних гвинтів гелікоптера

Диференціальна передача (рис. 4.30) є кінематично невизначеною, оскільки за заданої частоти обертання вала турбіни частоти обертання повітряних гвинтів можуть бути різними. Якщо управляти заднім повітряним гвинтом до повного його зупинення, передача перетвориться на планетарну, а в разі зупинення переднього гвинта виходить проста передача з проміжною «паразитною» шестернею. Для підтримки однакових частот обертання гвинтів необхідно мати два регулятори, кожен із яких кінематично зв'язується із одним з валів повітряних гвинтів. Диференціальний редуктор за тих же самих розмірів шестерень забезпечує більш глибоке редукування, ніж планетарний редуктор. Мінімальні значення передавального відношення досягають $\frac{1}{10} \div \frac{1}{12}$.

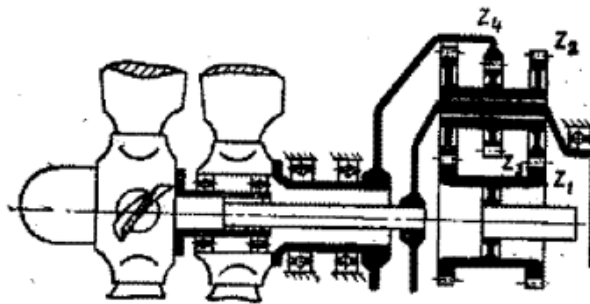


Рисунок 4.30 – Схема диференціального незамкнутого редуктора з двовінцевими сателітами

Момент на валу переднього гвинта більше, ніж абсолютна величина моменту на валу заднього гвинта, причому їхня різниця дорівнює вхідному моменту. Момент на вузлах кріплення двигуна до літака дорівнює за величиною і протилежний за напрямленням вхідному моменту. Для вирівнювання навантажень, що діють на підшипники сателітів, шестерні z_1 і z_2 виробляють із роздвоєними вінцями, розташованими симетрично щодо шестерні z_3 ^{171, 172}.

¹⁷¹ Максимов Н. А. Двигатели самолетов и вертолетов: основы устройства и летной эксплуатации / Н. А. Максимов, В. А. Секистов. – Москва : Воениздат, 1977. – 343 с.

Можливі й безредукторні схеми ТВД (рис. 4.31), у яких два співвісних гвинти протилежного обертання наводяться безпосередньо тихохідною біротативною вільною турбіною, що складається з двох барабанів із лопатковими вінцями, що обертаються в протилежні боки, причому кожен вінець, що обертається в один бік, є сопловим апаратом для подальшого вінця, що обертається в протилежному напрямку.

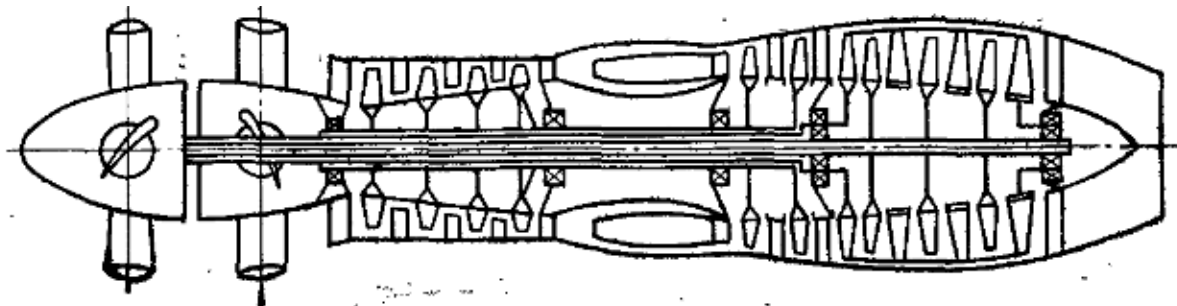


Рисунок 4.31 – Принципова схема ТВД з біротативною турбіною

Перевагами такої схеми є відсутність обмеження потужності редуктора, можливість роботи турбіни з мінімальними радіальними зазорами, можливість застосування легких, зокрема керамічних, лопаток. Застосування двох контрроторних гвинтів дозволяє підвищити ККД гвинта на 5–8 % порівняно з однорядним гвинтом¹⁷³.

4.5 Контрроторні конструкції вітродвигунів

Принцип контрроторності застосовується і в галузі створення вітроустановок (ВУ), а зокрема – ортогональних вітродвигунів, що мають вертикальну вісь обертання. Такі вітродвигуни можуть ефективно працювати за невеликих швидкостей вітру 4–5 м/с у складі автономних вітроелектроустановок, встановлених поряд із споживачем¹⁷⁴.

Для генерування електроенергії з максимальною енергоефективністю у вітроустановках із вертикальною віссю обертання застосовують синхронні генератори зі збудженням від постійних магнітів (СГПМ).

Основною проблемою широкого застосування малопотужних ВУ, які орієнтовані переважно на індивідуальних споживачів і працюють в умовах швидкозмінних (турбулентних) низькошвидкісних вітрів, є тривалий період їхньої окупності. Це пов'язано з високою вартістю регульованих і низькою енергоефективністю нерегульованих вітроустановок. Значну частину від вартості ВУ становить також ціна на СГПМ, який у разі прямого привода має значну кількість пар полюсів і великі розміри^{175, 176}.

¹⁷² Анфимов М. И. Редукторы. Конструкции и расчет : альбом / М. И. Анфимов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1993. – 284 с.

¹⁷³ Теория и расчет воздушно-реактивных двигателей : учеб. пособ. / под ред. С. М. Шляхтенко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1987. – 568 с.

¹⁷⁴ Ветроэнергетика / под ред. Д. де Рензо : пер. с англ. ; под ред. Я. И. Шефтера. – Москва : Энергоатомиздат, 1982. – 272 с.

¹⁷⁵ Волков Н. И. Аэродинамика ортогональных ветродвигателей / Н. И. Волков. – Сумы : Мрія-1, 1996. – 198 с.

¹⁷⁶ Тітко Р. Відновлювальні джерела енергії / Р. Тітко, В. Калініченко. – Варшава – Краків – Полтава, 2010. – 534 с.

Таких проблем вдається уникнути, застосувавши контрроторну схему вітроколеса і спеціальні пристрої передавання електроенергії. Вартість генератора для вітроустановки (гр/кВт) обернено пропорційна його швидкості обертання. Контрроторна ортогональна вітроустановка (КОВУ) (рис. 4.32) складається з двох співвісних вітроколес, що перетворюють кінетичну енергію руху повітряних мас на механічну енергію обертового руху, а також електрогенератор, індуктор (1-й ротор) якого прикріплений до одного колеса, а якір (2-й ротор – контрротор) – до іншого. Водночас вітроколеса обертаються в різні боки. Завдяки такій конструкції вітроустановки кутова швидкість генератора $\omega_r = \omega_I + \omega_{II}$, де ω_I і ω_{II} – кутові швидкості ротора і контрротора відповідно. Якщо $\omega_I = \omega_{II}$, то застосування контрроторної системи вітроколеса дає можливість удвічі збільшити кутову швидкість ВУ. А це, зі свого боку, дозволяє збільшити частоту ЕРС якоря і зменшити розміри і вартість генератора, а отже, і ВУ загалом¹⁷⁷.

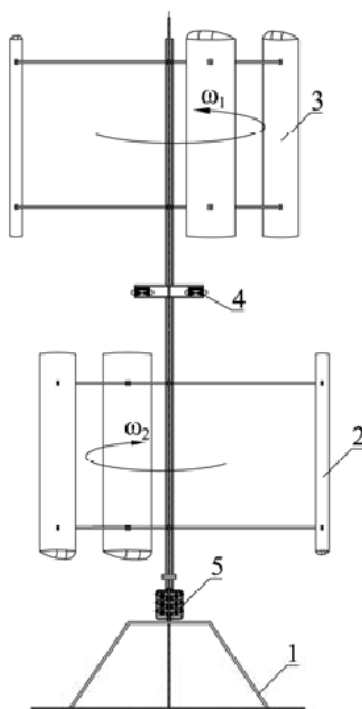


Рисунок 4.32 – Контрроторна ортогональна вітроустановка

Основними складовими КОВУ є несуча конструкція 1 із двома вітроколесами 2 і 3 і СГПМ 4. Для безконтактного передавання виробленої електроенергії з рухомого якоря СГПМ застосовують спеціальний електромеханічний прилад – трансформатор з обертальною половиною (ТОП) 5. На нього покладається також додаткова функція автоматичного управління роботою ВУ за допомогою перемикачів відводів від вторинних обмоток, що дає можливість відмовитися від дорогої системи оптимального управління навантаженням СГПМ. Це, зі свого боку, скорочує термін окупності всієї установки¹⁷⁸. Кінематична схема КОВУ подана на рисунку 4.33.

¹⁷⁷ Ковальчук А. І. Трансформатор для контрроторної вітроустановки з вертикальною віссю обертання / А. І. Ковальчук // Електроенергетичні та електромеханічні системи. – Львів : Вид-во Націон. ун-ту «Львівська політехніка». – 2012. – Вип. 736. – С. 59–63.

¹⁷⁸ Ковальчук А. І. Електромеханічна система автономної безконтактної контрроторної вітроелектроустановки з вертикальною віссю обертання : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / А. І. Ковальчук ; НТУ «Львівська політехніка». – Львів, 2015. – 20 с.

Варто зазначити, що розглянута конструкція контрроторної ортогональної установки не є оригінальною. Такі проекти великої потужності (25–35 млн кВт/рік) розроблялися під керівництвом Н. А. Малишева і В. М. Ляхтера (Інститут «Гідропроект») у СРСР у 80-ті роки ХХ ст. (рис. 4.34)¹⁷⁹.

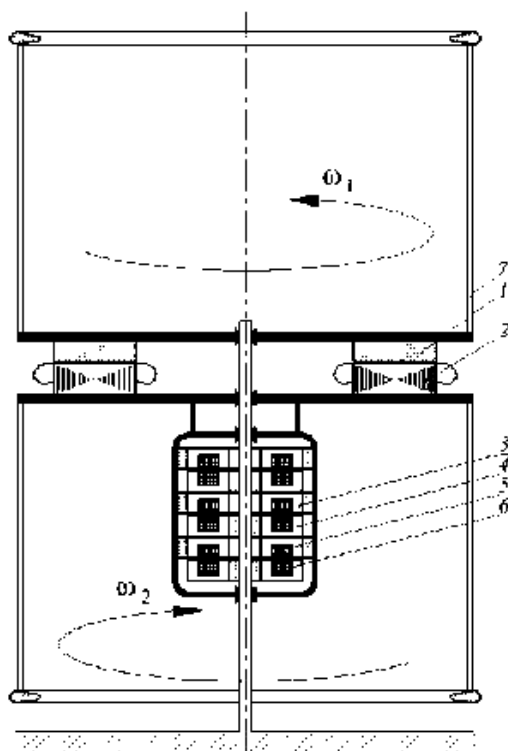


Рисунок 4.33 – Кінематична схема контрроторної ортогональної вітроустановки:
1 – індуктор; 2 – ярмір; 3 – рухомий сердечник трансформатора; 4 – нерухомий сердечник трансформатора; 5 – первинна (рухома) обмотка трансформатора; 6 – вторинна (нерухома) обмотка трансформатора; 7 – лопаті вітроколеса

Принципово інша конструкція контрроторної вітроустановки¹⁸⁰ (рис. 4.35), на думку автора винаходу, призначена для більш раціонального вітрового ресурсу і дає можливість значного збільшення вироблюваної енергії.

Ротори вітрової турбіни вставлені один в інший і утворюють обертові ротор і статор генератора подібно конструкції контрроторної ортогональної вітроустановки (див. рис. 4.32), що і забезпечує перетворення на електричну більшої кількості енергії вітрового потоку. Ідею таких конструкцій використовують під час створення інших апаратів, що перетворюють енергію поновлюваних джерел – контрроторних океанічних турбін.

Конструкцію контрроторної вітротурбіни, подібної попередній, але виконаної на основі найпоширенішої (трилопатевої) у світі схеми (рис. 4.36) запропонував І. Деблесер.¹⁸¹ Вітротурбіна складається з двох трилопатевих робочих коліс, встановлених віссиметрично і повернутих один до одного. Кожне з коліс встановлено на окремому роторі генератора, а

¹⁷⁹ Малишев Н. А. Ветроэнергетические станции большой мощности / Н. А. Малишев, В. М. Ляхтер // Гидротехническое строительство. – 1983. – № 12. – С. 38–44.

¹⁸⁰ Patent US 6278197 B1: Contra-rotating wind turbine system / Kari Appa. – printed. 21.08.2001.

¹⁸¹ Patent US 6504260 B1: Wind turbine with counter rotating rotors/ Yves Debleser. – printed. 07.01.2003.

статори закріплені в корпусі нерухомо. Електроенергія, що виробляється з обох генераторів, потрапляє на загальний накопичувач. Для здійснення управління виробленням енергії блок генераторів автоматично орієнтується на потік вітру, що набігає завдяки повороту гондоли (рис. 4.37).

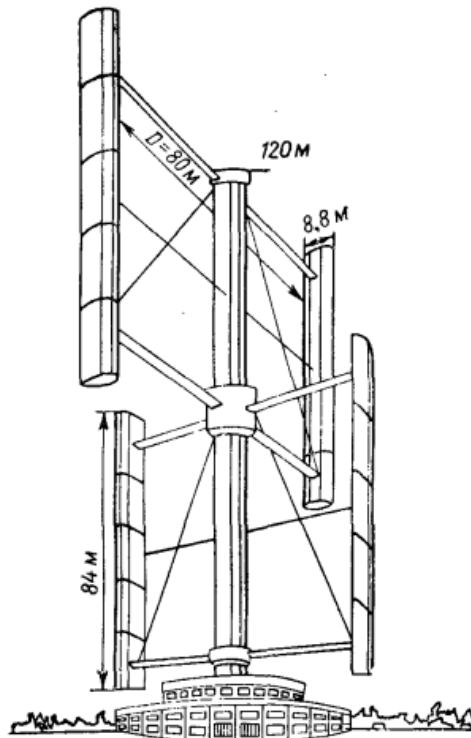


Рисунок 4.34 – Двороторна ВЕУ Інституту «Гідропроект»

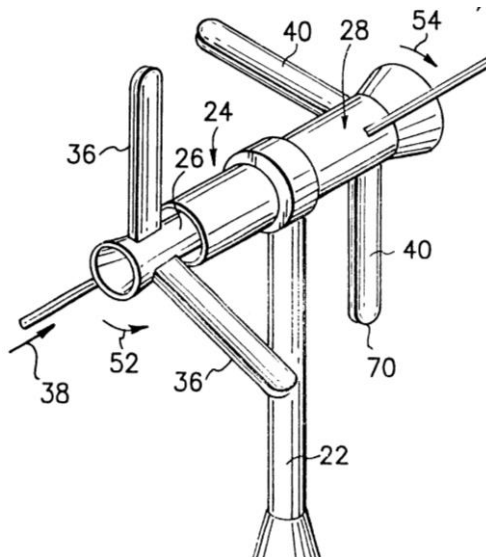


Рисунок 4.35 – Контрроторна вітрова турбіна



Рисунок 4.36 – Трилопатовий вітрогенератор

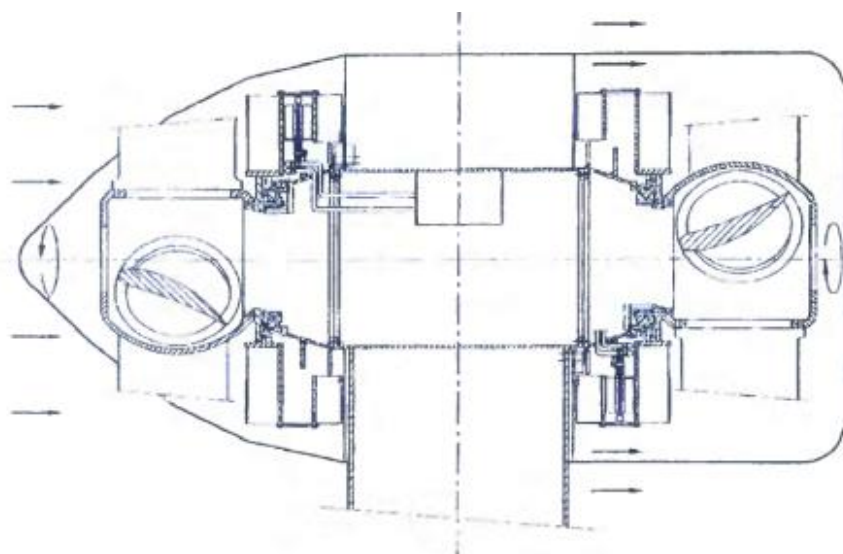


Рисунок 4.37 – Трилопатева контрроторна віротурбіна

Така конструкція має відносно великі габарити, проте стосовно принципу контрроторності дозволяє збільшити рекуперацію енергії до 70 % порівняно з використанням віротурбіни з одним робочим колесом.

4.6 Контрроторні турбіни для перетворення енергії океану

Сьогодні у світі розроблено кілька конструкцій контрроторних турбін для перетворення енергії підводних течій на електроенергію.

Турбіна, схема якої подана на рисунку 4.38 (турбіна Хепріксена), складається з двох поворотлопатових гвинтів закріплених на окремих співвісних горизонтальних валах. Вал першого гвинта пов'язаний із ротором генератора, а вал іншого – зі статором. Контрроторність забезпечується поворотом лопаті другого гвинта і дозволяє зменшити масогабаритні показники генератора¹⁸².

¹⁸² Patent EP 1467093 A1 Generator for water current turbine with counter-rotating rotors/ Svein Henriksen. – printed. 13.10.2004.

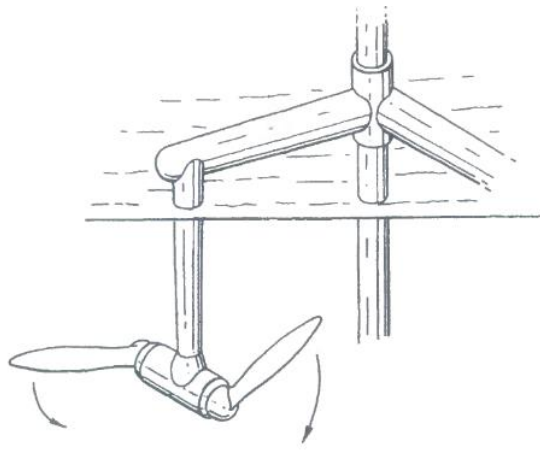


Рисунок 4.38 – Схема контрроторної турбіни Хепріксена

Конструкція турбіни також може бути виконана у двох варіантах:

- 1) опори турбіни спираються на дно (рис. 4.39), і вона використовується на мілководді (у каналах, руслах річок, бухтах тощо);
- 2) плавна (понтонного типу) для експлуатації у відкритому морі (рис. 4.40).

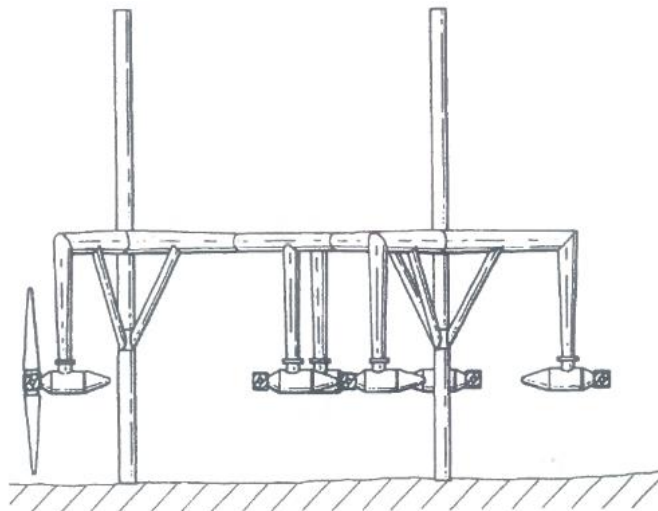


Рисунок 4.39 – Схема мілководної турбіни

У відділі досліджень енергетичних систем Університету Стратклайда була розроблена і випробувана контрроторна турбіна для сприйняття енергії морських течій (рис. 4.41)¹⁸³. Варто зазначити, що принцип контрроторності знайшов широке застосування саме в реалізації подібних турбін систем альтернативної енергетики (рис. 4.42)^{184, 185, 186, 187}.

¹⁸³ <http://energygeckkd.blogspot.com/2013/02/contra-rotating-marine-current-turbine.html>.

¹⁸⁴ <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1243/09576509JPE296>.

¹⁸⁵ Ordonez-Sanchez S. Contra Rotating Marine Turbines Tank Tests to Analyse System Dynamic Response / S. Ordonez-Sanchez, A. Grant and C. Johnstone // 3-rd International Conference on Ocean Energy, Bilbao.

¹⁸⁶ Louis J. F. Axial Flow Contra-Rotating Turbines / J. F. Louis // ASME 1985 International Gas Turbine Conference and Exhibit Volume 1: Aircraft Engine; Marine; Turbomachinery; Microturbines and Small Turbomachinery, Houston, Texas, USA, March 18–21, 1985.

¹⁸⁷ Huang B. Development of a model counter-rotating type horizontal-axis tidal turbine / B. Huang, K. Yoshida, T. Kanamoto // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 129 (2016).

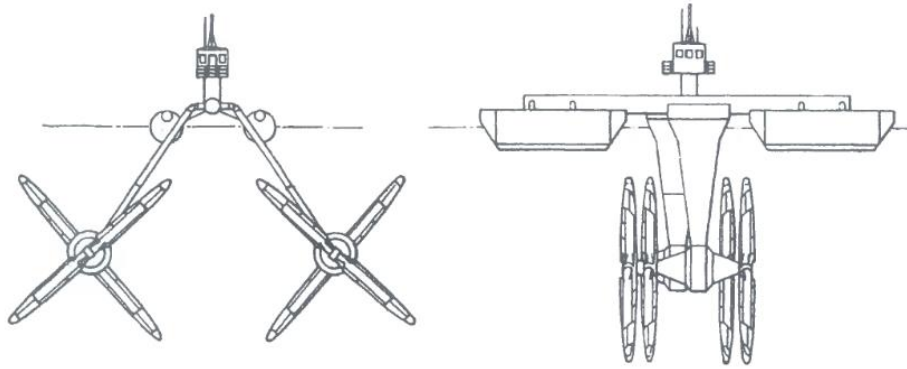


Рисунок 4.40 – Схема понтонної турбіни

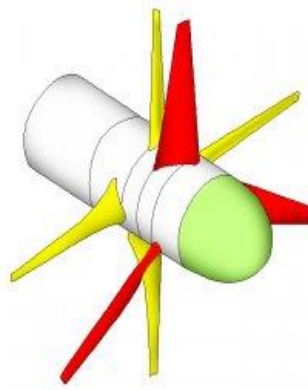


Рисунок 4.41 – Контрроторна турбіна Університету Стратклайда

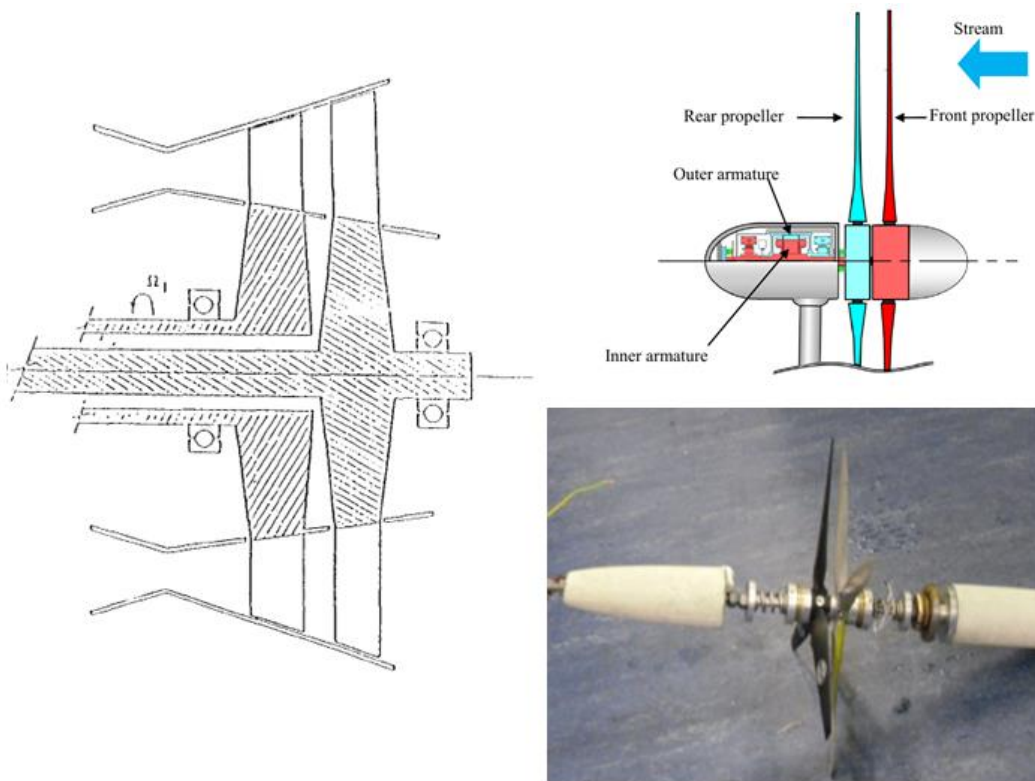


Рисунок 4.42 – Різноманітність конструкцій контрроторних підводних турбін

Однією з основних проблем перетворення енергії океану (течій, хвиль, припливів) є значна мінливість цих структур із часом. Тому одним з основних завдань, які стоять перед розробниками підводних турбін, є забезпечення їхнього «підлаштування», тобто слідування змін напрямку течії морських потоків. Застосування в турбіні двох спарених обертових у протилежних напрямках робочих коліс дозволяє розв'язати це завдання.

Важливим аспектом рентабельної експлуатації підводних турбін є зауваження того факту, що всі обертові системи виробляють реактивний крутний момент. Це призводить до неминучого ускладнення і подорожчання пристроїв кріплення (до дна або плавучих буїв) таких систем. Водночас контрроторні турбіни, на відміну від турбін інших конструкцій відрізняються високою стабільністю.

Конструкція всієї енергетичної системи містить у собі власне контрроторну турбіну, яка безпосередньо пов'язана з ротором генератора, електровідвідну систему і кріплення до дна (рис. 4.43). Загалом ця система отримала назву CORMAT. Розробники вказують, що енергетичний комплекс ефективно експлуатується в зоні морських течій і припливів на глибинах 10–500 метрів.

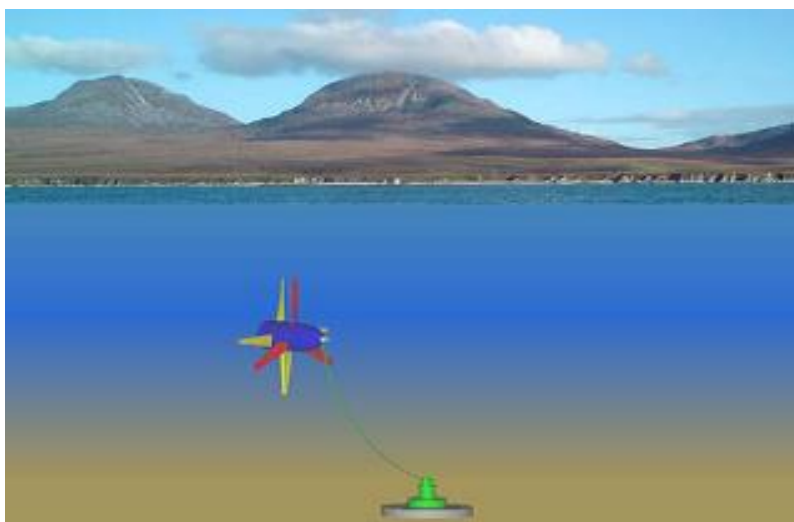


Рисунок 4.43 – Енергетична система CORMAT на базі контрроторної підводної турбіни

Система контрроторних робочих коліс має специфічні конструктивні особливості, що дозволяють домогтися більш високої швидкості обертання вала генератора порівняно з турбінами інших конструкцій. Вона розроблена так, щоб створювався однаковий крутний момент і осьове зусилля на ротор і контрротор. Водночас використовується диференціальна коробка передач. Обидва робочих колеса повинні розміщуватися дуже близько один до одного (на відстані менше ніж 60 мм, або 0,073 діаметра ротора). Отже, за допомогою мінімізації турбулентного сліду і втрат на вихороутворення вдається підтримувати високу продуктивність турбіни. Загалом тільки таким комплексом заходів досягається стабільна й ефективна робота енергетичного комплексу на основі контрроторної підводної турбіни.

На підставі вищезгаданих особливостей роботи, необхідних для підтримання високої енергоефективності насамперед турбіни, важливим завданням є забезпечення міцності лопатей робочих коліс. На основі виконаних у середовищі ANSYS численних досліджень

(рис. 4.44) рекомендується виготовляти лопатки з багатошарового вуглецевмісного епоксидного матеріалу.

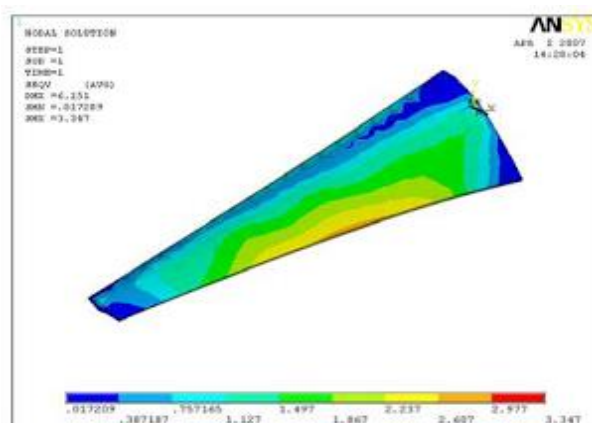


Рисунок 4.44 – Розподіл напружень у лопатці робочого колеса контрроторної турбіни

Принцип контрроторності в певній формі застосовують і серед перетворювачів хвильової енергії океану, а зокрема серед гідропневматичних перетворювачів. Як уже згадувалося, в основі роботи цих пристроїв лежить принцип коливання стовпа води у трубі з відкритим знизу коліном (див. п. 3.2.9.2). Завдяки пульсаціям гідростатичного тиску під час проходження хвиль стовп води відіграє роль рідкого поршня, який стискає повітря, розташоване над ним. Зі свого боку, повітря запускає пневмотурбіну, сталість напрямку обертання якої забезпечується системою клапанів.

Водночас необхідність у цій конструкції забезпечення сталості напрямку обертання є істотним недоліком перетворювачів із вагомим стовпом рідини, оскільки клапанна коробка є найненадійнішим елементом конструкції.

Цей недолік був усунутий М. Мак-Корміком¹⁸⁸, який запропонував використовувати повітряну турбіну, нечутливу до напрямку руху повітряного потоку (рис. 4.45). Вона складається з двох дзеркально розташованих і обертових у різні боки робочих коліс із 60 лопатками кожне і двох також дзеркальних напрямних систем лопаток (по 30 у кожній). Рух коліс передається за допомогою зубчастих передач вала генератора, водночас частота обертання підвищується у відношенні 1:2.

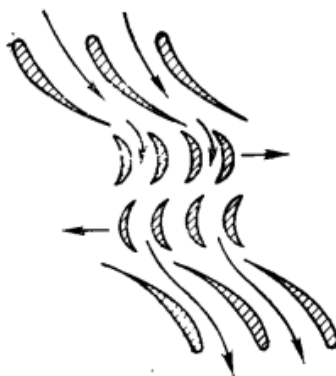


Рисунок 4.45 – Принципова схема повітряної турбіни Мак-Корміка

¹⁸⁸ Преобразование энергии океана. – С. 154.

Хвильова електростанція з такою турбіною розрахована на роботу в оптимальному режимі за висоти хвиль 3 метри і періоду 7 секунд. Дослідні зразки енергетичної установки висотою 6 метрів дозволили знімати енергію 360 кВт за ККД 35 %, що вже можна порівняти з ефективністю ТЕС.

4.7 Багатоступінчасті контрроторні системи

Цікаво застосовуються контрроторні конструкції в багатоступінчастому одноколісному виконанні. Такі системи набули поширення під час проектування радіальних доцентрових парових турбін¹⁸⁹. На рисунку 4.46 схематично подана конструкція однієї з таких турбін системи Юнгстрема, у якій внаслідок значного збільшення об'єму пари радіальна доцентрова течія потоку є єдино можливою¹⁹⁰.

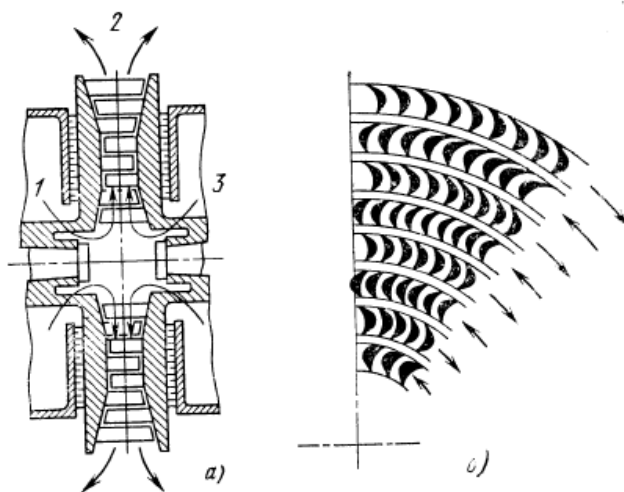


Рисунок 4.46 – Радіальна турбіна Юнгстрема: а) меридіональний перетин турбіни; б) лопаткові апарати і напрямки обертання; 1 – вхідна пара; 2 – випуск у конденсатор; 3 – концентричні лабіринтові кільця (для зменшення витоків)

Особливість цієї турбіни полягає в тому, що вона не має жодного нерухомого ряду лопаток. Два ряди лопаток кожного ступеня обертаються у протилежних напрямках і їх можна розглядати як робочі решітки¹⁹¹. У цьому і полягає контрроторний ефект турбіни Юнгстрема.

Можливість застосування контрроторних однолопатових конструкцій досліджував ще Пфлейдерер під час розгляду особливостей роботи лопаток із малими радіальними розмірами (рис. 4.47). Німецький вчений зазначав, що коли ширина колеса досить мала, а її радіус великий, то лопатка сильно звужується до периферії. Водночас досягається такий самий ККД, як і в разі використання лопаток нормальної форми. Цей факт потрібно брати до уваги під час проектування багатоступінчастих одноколісних компресорів (рис. 4.48)¹⁹².

¹⁸⁹ Shepherd D. G. Principles of turbomachinery. Macmillan, 1956.

¹⁹⁰ Kearton W. J. Steam turbine theory and practice (6th edn.) Pitman, 1951.

¹⁹¹ Диксон С. Л. Механика жидкостей и газов. Термодинамика турбомашин / С. Л. Диксон ; ред. З. М. Рябкова. – Москва : Машиностроение, 1981. – 213 с.

¹⁹² Пфлейдерер К. Лопаточные машины для жидкостей и газов. Водяные насосы, вентиляторы, турбовоздуходувки, турбокомпрессоры / К. Пфлейдерер. – 4-е изд., перераб. – Москва : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1960. – 685 с.

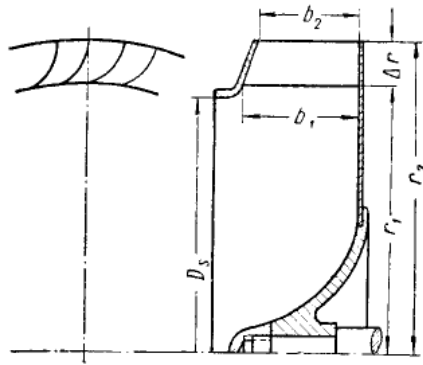


Рисунок 4.47 – Коротка відцентрова лопатка

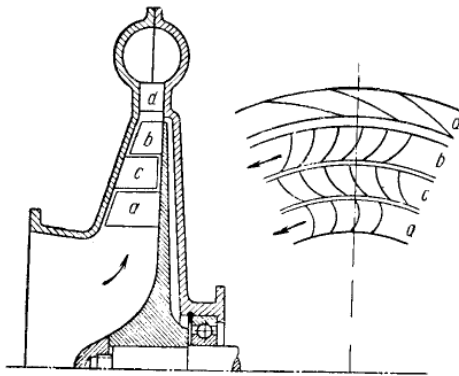


Рисунок 4.48 – Багатоступінчастий компресор з одним колесом

4.8 Резюме розділу IV

Перед нами постає різноманіття технічних систем, у яких ефективно застосовується контрроторний ефект. Контрроторні лопатеві конструкції (осьового типу) знайшли широке застосування в багатьох галузях машинобудування. Можливість застосування контрроторного принципу у відцентрових машинах на цей момент не досліджена, однак вона, безсумнівно, потенційно можлива.

Незважаючи на певне ускладнення конструкції, контрроторні системи мають цілу низку переваг порівняно з однорядними лопатевими конструкціями, що робить їх привабливим об'єктом для дослідження можливості застосування в нових галузях машинобудування, зокрема під час створення відцентрових насосів. Накопичений багатий досвід застосування контрроторних лопатевих систем і супутніх вузлів у багатьох галузях дозволить використовувати його як гарну основу для розроблення і проектування контрроторного відцентрового насоса в межах пошуку та реалізації способів подальшого розвитку насособудування на «ближню» перспективу.

РОЗДІЛ V

КОНТРРОТОРНИЙ ЕФЕКТ У НАСОСОБУДУВАННІ

Підкреслимо насамперед, що вивчення та застосування контрроторного ефекту в насособудуванні є закономірним наслідком розвитку динамічних лопатевих систем відповідно до закону динамізації (див. п. 3.2.5). На підставі аналізу, наведеного в попередньому розділі, можемо зазначити, що найбільш перспективними щодо застосування контрроторного ефекту є осьові насоси. І хоча відцентровим насосам, а не осьовим приділяється значна увага в цій роботі, дослідження останніх становить, на нашу думку, певний інтерес, зокрема під час розгляду фактично контрроторного ефекту – застосування від’ємної циркуляції (негативної закрутки) на вході у відцентрове робоче колесо. Це питання буде розглянуто в кінці цього розділу.

5.1. Осьовий контрроторний насос

Основна сфера застосування турбомашин із контрроторними лопатевими решітками – осьові агрегати. Японськими дослідниками Momosaki, Usami, Watanabe, Furukawa були проведені чисельні та експериментальні дослідження осьового контрроторного насоса (рис. 5.1), спроектованого на напір $H = 4$ м (по 2 м на кожен ротор) і витрату $Q = 70$ л/с за однакових, але протилежних напрямках обертання роторів $n_1 = n_2 = 1225$ об./хв^{193, 194, 195}. Ротори розмішувалися на двох незалежних валах, розміщених «один в іншому» і закріплені у корпусі консольно збоку кільцевої камери відводу. Вхід – циліндричний, осьовий, відвід такий самий, без напрямного апарата. Кількість лопатей $z_1 = 4$, $z_2 = 5$, вони виготовлені на основі профілів NACA 4410 (на втулці), 4408 (середина), 4406 (на зовнішньому діаметрі) (див. рис 5.1).

Згідно з ухваленим у попередньому пункті позначенням уявімо кінематику течії в осьовій контрроторній лопатевій решітці (рис. 5.2). Проаналізуємо подані авторами зовнішні характеристики цього насоса (рис. 5.3). На графіках рисунка 5.3 а видно, що другий ротор, як і варто було очікувати, створює дещо більший напір у зоні зменшеної витрати (20–50 л/с) і практично збігається в розрахунковому режимі. Особливий інтерес викликають графіки на рисунку 5.3 б. Вони свідчать про те, що практично без розбіжностей кожен окремий ротор і об’єднаний із них контрротор на всіх режимах працюють з однаковим ККД за наявності чіткого максимуму більш ніж 80 % на розрахунковому режимі. Водночас досить високі значення ККД від 70 % і вище зберігаються в діапазоні $\bar{Q} = Q/Q_p = 0,57-1,14$. Відхилення від цього діапазону супроводжується різким падінням ККД. Ці результати свідчать про досить гарне обтікання лопатей на режимах, близьких до розрахункових (на 40 % у бік недовантаження і на 15 % – перевантаження).

¹⁹³ Shigemitsu T. Flow measurement with LDV in a contra-rotating axial flow pump / T. Shigemitsu, A. Furukawa, S. Watanabe, K. Okuma // 23th JANR symposium of hydraulic machinery and system. – 2007. – P. 51–56.

¹⁹⁴ Watanabe S. Internal flow structure in real rotor of contra-rotation axial flow pump at partial flow rates / S. Watanabe, A. Furukawa, S. Usami // Materials of 9th Int. Symp. on exp. and computational aerothermodynamics of internal flow. – 2009. – P. 70–76.

¹⁹⁵ Momosaki S. Numerical simulation of internal flow in a contra-rotating axial flow pump / S. Momosaki, S. Usami, S. Watanabe, A. Furukawa // 25th JANR symposium of hydraulic machinery and system. – 2010. – P. 114–119.

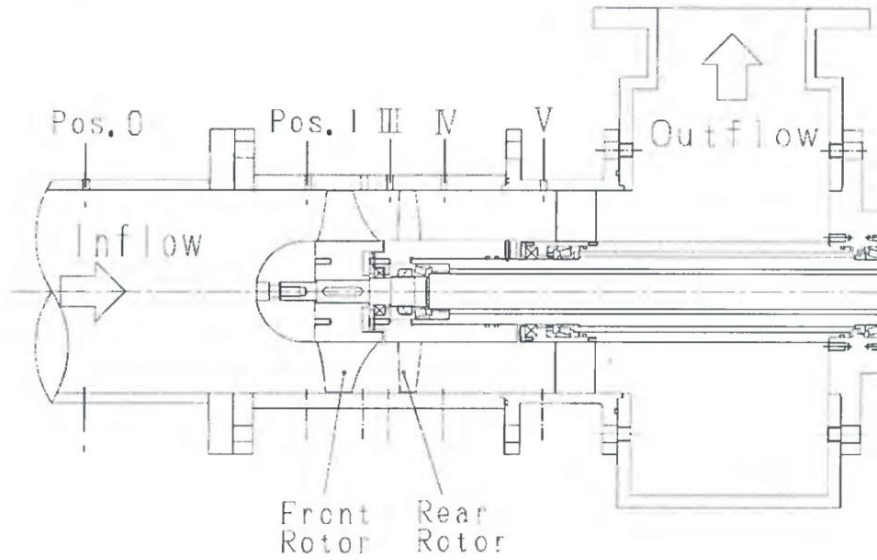


Рисунок 5.1 – Експериментальний контрроторний осьовий насос

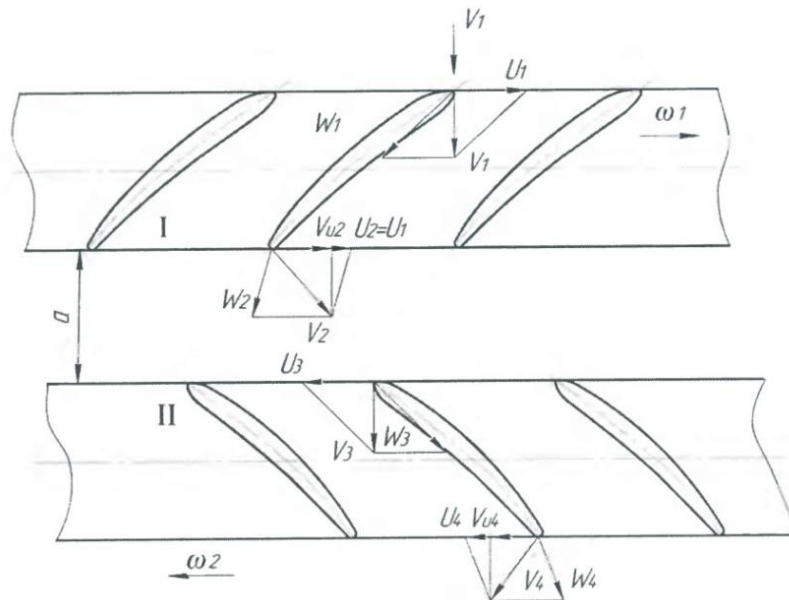
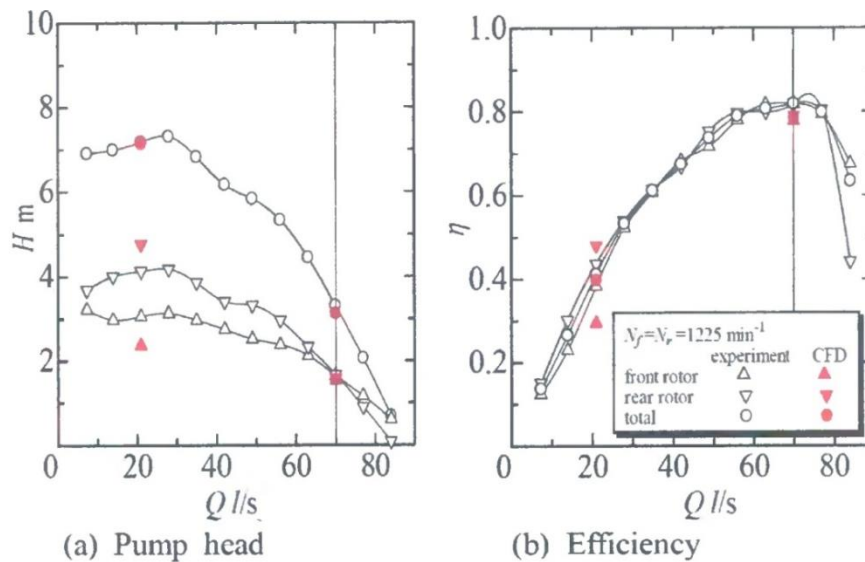


Рисунок 5.2 – Кінематика течії в осьовій контрроторній решітці

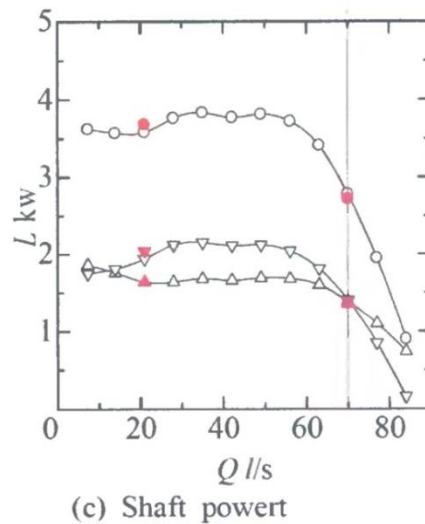
Ще один важливий висновок полягає в тому, що другий ротор, лопаті якого рухаються назустріч течії зі значною негативною циркуляцією, за ефективністю (ККД) не програє нормальним, класичним лопатевим решіткам. Це дозволяє наголосити на необхідності глибокого дослідження впливу негативної циркуляції на вході у відцентрову лопатеву решітку.

На рисунку 5.4 подано розподіл осереднених швидкостей (v_z – осьової, v_θ – колової) течій, отриманих п'ятиканальним зондом у трьох перетинах: I – першим ротором, III – між роторами, IV – за другим ротором.



a

b



b

Рисунок 5.3 – Експериментальні характеристики осьового насоса

Компоненти абсолютної швидкості v_z і v_θ подані залежно від відносних радіусів r/r_c (r_c – радіус корпусу). Позитивний напрямок v_θ відповідає напрямку обертання першого ротора, тоді як від’ємне значення v_θ означає обертання абсолютної течії у протилежному напрямку, яка збігається з напрямком обертання другого ротора. Водночас видно, що на розрахунковому режимі $Q = 70$ л/с чисельні результати добре збігаються з експериментальними як для v_z , так і для v_θ .

Перед першим ротором на цьому режимі вздовж усього радіуса \bar{r} закрутки течії немає ($v_\theta = 0$ і за розрахунками і відповідно до експерименту), а витратна складова $v_z = 3$ м/с вздовж усього радіуса (за винятком невеликих відхилень уздовж вала – $v_z = 3,6$ м/с і стінки корпусу – $v_z = 2,5$ м/с).

Між ротором (поз. III, рис. 5.4) на режимі $Q = 70$ л/с з’явилася закрутка течії в напрямку обертання першого ротора в межах $v_\theta = 3,2$ м/с поблизу ротора і 2 м/с практично по всій довжині \bar{r} . Це і є та складова абсолютної швидкості, яка обумовлює циркуляцію Γ_2 у рівнянні Ейлера і за якою можна визначити напір першого ротора на цьому режимі.

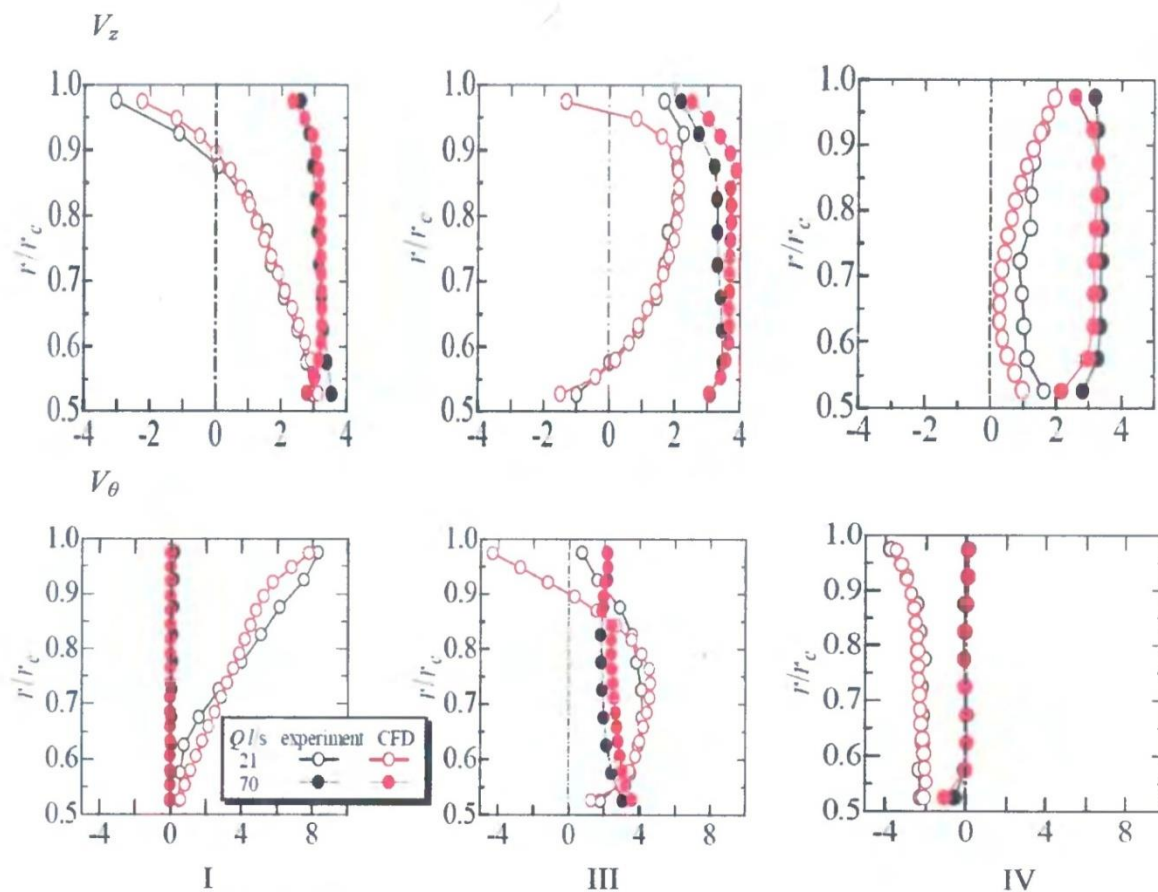


Рисунок 5.4 – Радіальний розподіл осереднених по колу швидкостей v_z і v_θ на режимах $Q = 70$ л/с (розрахунковий) і $Q = 21$ л/с

Для нас вона становить інтерес насамперед як характеристика структури течії на вході в другу решітку ($v_\theta = 2$ м/с і $v_z = 3,5$ м/с згідно з графіками поз. III, див. рис. 5.4). Як продемонстровано, ця течія перед входом у другий ротор має позитивну циркуляцію. Дотримуючись класичного уявлення, можна було б очікувати, що друга решітка, зустрівши течію з $+G_2$, зупинить її і розгорне обертання в протилежний бік, створивши одночасно за собою циркуляцію G_4 . Але, як демонструють графіки поз. IV, див. рис. 5.4, величина швидкості v_z не змінилася (і це правильно), а v_θ знову стала уздовж всього радіуса нульовою (за невеликим винятком поблизу вала другого ротора). Отже, друга лопатева решітка була спроектована у такий спосіб, щоб розкрутити циркуляцію G_2 у протилежному напрямку до нуля. Водночас за нею течія є винятково осьовою, що дозволяє не встановлювати випрямний апарат за другим ротором. Основне рівняння лопатевих машин для другої решітки матиме вигляд

$$\begin{aligned}
 H_{T\infty}(II) &= \frac{\omega}{g} (v_{\theta_{\text{ВЫХ}}} \cdot r_{\text{ВЫХ}} - v_{\theta_{\text{ВХ}}} \cdot r_{\text{ВХ}})_{II} = \\
 &= \frac{\omega}{g} [0 - (-v_{\theta_{\text{ВХ}}} \cdot r_{\text{ВХ}})]_{II} = \frac{\omega}{g} (v_{\theta_{\text{ВХ}}} \cdot r_{\text{ВХ}})_{II}.
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

Зауважимо, що $v_{\theta_{\text{ВХ}}}(II) = v_{\theta_{\text{ВЫХ}}}(I)$, тому $H_T(II) = H_T(I)$, тобто другий ротор створює такий самий напір, як і перший ротор, витративши на це енергію від другого вала і

розкрутивши течію на виході з другого ротора осьового насоса до нуля. Тому і загальний напір насоса повинен подаватися сумою $H = H(I) + H(II)$.

Для нас цей висновок, зроблений на підставі реальних характеристик течії, отриманих експериментально і чисельно, важливий тим, що він підтверджує правильність рівняння (5.1) для розрахунку напору другого ротора для відцентрового насоса.

Необхідно також зазначити, що проведений аналіз належить до осьових насосів, для яких характерні високі n_s , тобто вони забезпечують високі і дуже високі подачі за низьких напорів. Це означає, що в разі використання контрроторних осьових схем компоненти $v_u(v_\theta)$ на виході з першого ротора будуть відносно невеликими і тому зустріч таких течій із лопатями другого ротора буде значно м'якшою і гідродинамічно більш досконалою, ніж у радіальних решітках.

5.2. Дослідження осьового контрроторного насоса

Як відомо, людство використовує воду повсюдно для побутових потреб, у сільському господарстві, промисловості тощо. Сьогодні в багатьох галузях існує потреба у великій кількості води (іригація, системи центрального опалення, прямоточне водопостачання тощо). З такою метою використовуються осьові насоси, оскільки вони здатні перекачувати великі об'єми рідини за незначних напорів.

Однак із розвитком технологій і появою нових актуальних завдань, що постають перед насособудівною галуззю, виникла необхідність у насосах не лише з високими подачами, а й напорами. Серед способів підвищення напору осьового насоса особливо виділяють застосування контрроторності. На кафедрі ПГМ СумДУ дослідження контрроторного осьового насоса здійснила О. А. Матвієнко¹⁹⁶.

У контрроторних осьових машинах робочі колеса за сумісництвом виконують також значення напрямного апарата. Завдяки цьому у два рази скорочується кількість перехідних ділянок між ступенями і також у два рази скорочується протяжність робочих каналів. Загалом це призводить до поліпшення гідродинаміки і зниження втрат на тертя. Основний ефект тут полягає в тому, що гідродинамічні режими на переходах контрроторних і звичайних (з нерухомим напрямним апаратом) осьових машин рівнозначні. Теоретично знижуючи частоту обертання робочого колеса конкретного насоса вдвічі, а напрямний апарат водночас обертаючи в протилежний бік з тією самою (зниженою) швидкістю, виявиться, що гідродинамічні режими між ними залишилися незмінними, такими самими, як і у вихідній схемі. Знаючи це, можливо оптимізувати конструкції гідромашин із гарантованим збільшенням ККД і зниженням їхніх масогабаритних параметрів. Такий принцип був застосований і під час дослідження контрроторних відцентрових машин (п. 5.3).

Можливості застосування контрроторності в осьових насосах і її вплив на напірні та енергетичні характеристики досліджувалися на кафедрі ПГМ СумДУ на основі малогабаритного осьового ступеня низької швидкохідності¹⁹⁷. Широке використання цих ступенів на сьогодні є проблематичним через відсутність достатньої інформації щодо особливостей

¹⁹⁶ Лібець О. С. Проектування осьового контрроторного ступеня: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра / О. С. Лібець.; наук. керівник О. А. Матвієнко. – Суми: СумДУ; ф-т ТеСЕТ, 2015. – 102 с.

¹⁹⁷ Матвієнко О. А. Малогабаритний осьовий ступінь свердловинного насоса з підвищеною енергетичною ефективністю: дисертація на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук / О. А. Матвієнко; наук. кер. О. Г. Гусак. – Суми: СумДУ, 2013. – 148 с.

їхнього робочого процесу, а також досвіду проектування й експлуатації. На підставі цього як першочергове завдання вивчалися гідродинамічні особливості течії в декількох контрроторних системах. На основі аналізу цих особливостей була спроектована модельна проточна частина, і проводилася розрахунково-експериментальна перевірка її характеристик.

Наведемо можливі варіанти конструкції привода контрроторного осьового насоса (КОН)¹⁹⁸.

1 Із двома послідовно розташованими електродвигунами (рис. 5.5).

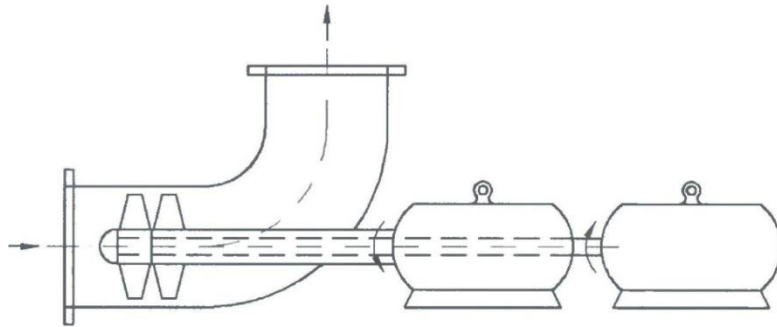


Рисунок 5.5 – Схема КОН з двома послідовно розташованими електродвигунами

Відзначимо, що ця конструкція має право на існування, однак вона має низку істотних недоліків:

- значні габарити;
- наявність двох електродвигунів, один із яких апріорі буде нестандартним і може бути виготовлений тільки на окреме замовлення;
- складність обслуговування;
- відсутність економічної доцільності застосування цієї схеми.

2 Із двома паралельно розташованими електродвигунами і гнучким зв'язком (рис. 5.6).

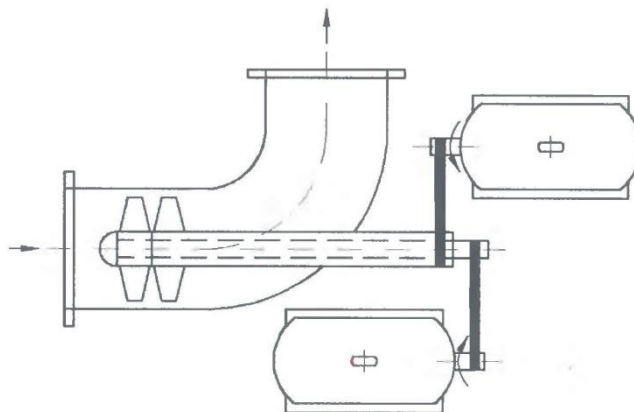


Рисунок 5.6 – Схема КОН із двома паралельно розташованими електродвигунами і гнучким зв'язком

¹⁹⁸ Детали машин : учебник / Л. А. Андриенко, Б. А. Байков, И. К. Ганулич, и др. ; под ред. Ряховского. – Москва : Московский государственный технический ун-т им. Баумана, 2002. – 544 с.

Як гнучкий зв'язок можуть бути використані ремінна, ланцюгова або зубчаста передачі. Всі вони мають можливість передавати рух між валами на значну відстань, є простими в обслуговуванні та експлуатації, мають високий ККД (90–99 %). Однак поряд із цим ремінна передача має низьку довговічність і непостійне передавальне число через можливе проковзування ременя під час перевантажень. Ланцюгова передача вимагає додаткового пристрою для регулювання натягу, має нерівномірність руху і, як наслідок, підвищений шум.

Конструкція з двома паралельно розташованими електродвигунами і гнучким зв'язком може використовуватися на практиці, однак вона також має недоліки:

- значні габарити;
 - наявність двох електродвигунів;
 - наявність гнучкого зв'язку;
 - відсутність економічної доцільності застосування цієї схеми
- 3 З одним електродвигуном і циліндричним редуктором (рис 5.7).

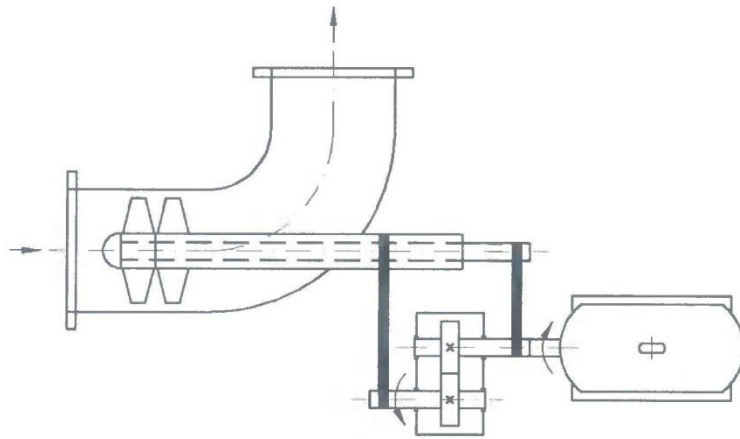


Рисунок 5.7 – Схема КОЧ з одним електродвигуном і циліндричним редуктором

Така конструкція є економічно більш вигідною (наявність тільки одного привода), але, як і попередні, має значні габарити і містить у собі гнучкий зв'язок, недоліки якого вже були розглянуті.

4 З одним електродвигуном і двома ременями (рис. 5.8).

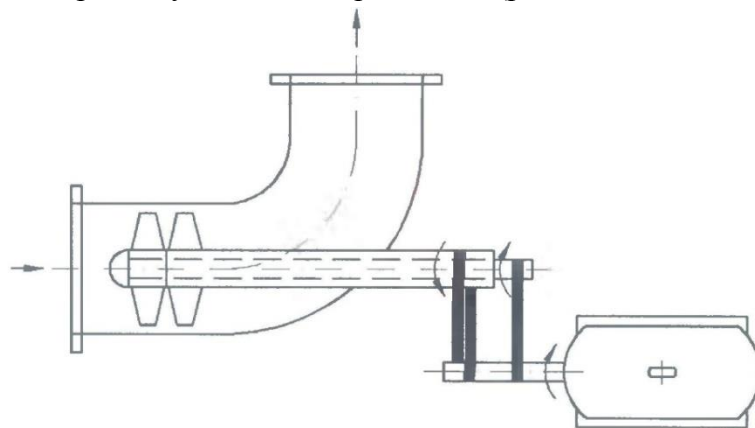


Рисунок 5.8 – Схема КОЧ з одним електродвигуном і двома ременями

Ця конструкція має менші габарити порівняно з попередніми, у ній відсутній редуктор (а отже, здешевлення всієї приводної системи), вона приводиться в дію одним двигуном і є простою в обслуговуванні. Однак наявність перекрученого ремня знизить термін працездатності конструкції і буде вимагати частой його заміни.

5 З одним електродвигуном і кінчним редуктором (рис. 5.9).

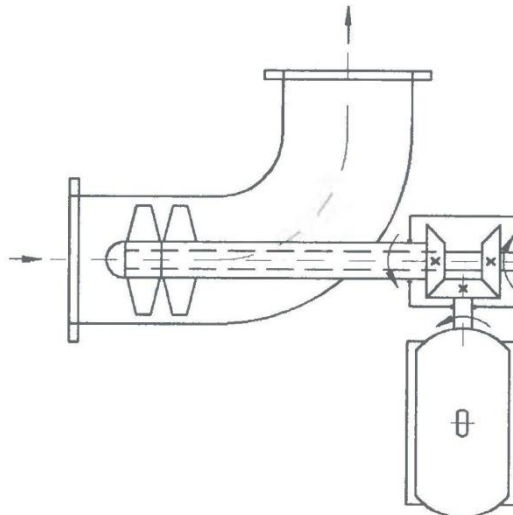


Рисунок 5.9 – Схема КОН з одним електродвигуном і кінчним редуктором

Конструкція цього типу є найбільш прийнятною для використання, оскільки має мінімальну кількість перехідних ділянок, менші габаритні розміри, є простою в обслуговуванні й експлуатації. Отже, конструкцію з одним електродвигуном і кінчним редуктором потрібно рекомендувати як основну для використання як привода осьового контрроторного насоса. На основі неї здійснювалися подальші розрахунки і проектування.

Об'єктом подальшого дослідження було малогабаритне осьове робоче колесо низької швидкості (рис. 5.10) з параметрами $Q_{ном} = 120 \text{ м}^3/\text{ч}$, $H = 14 \text{ м}$, $n = 3000 \text{ об/мин}$, $n_s = 276$, $N = 5 \text{ кВт}$, $D_l = 155 \text{ мм}$, $d = 124,5 \text{ мм}$, $z = 8$ (рис. 5.10).

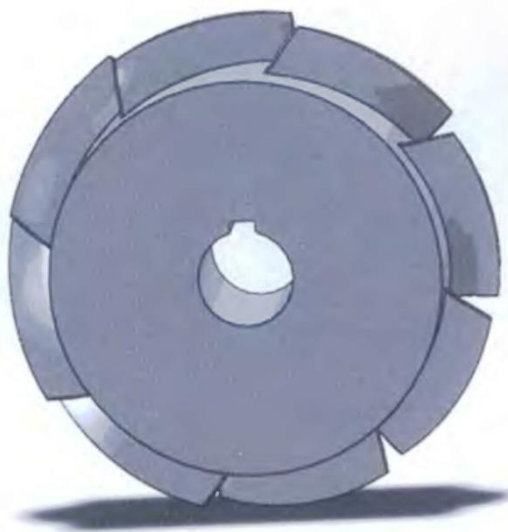


Рисунок 5.10 – Малогабаритне осьове робоче колесо низької швидкості

Отримані початкові наближення дали можливість провести нестационарний розрахунок і розробити осьову контрроторну ступінь із високими напірними й енергетичними характеристиками. Чисельне дослідження велося з використанням програмного комплексу ANSYS CFX для чотирьох контрроторних систем, що складаються з малогабаритного осьового колеса і контрроторного осьового колеса з різними профілями лопатей (рис. 5.11, 5.12). Зазначимо, що докладно методика дослідження у програмному комплексі ANSYS CFX наведена в пункті 5.4 і є типовою для всіх наведених у цій роботі результатів чисельних досліджень.

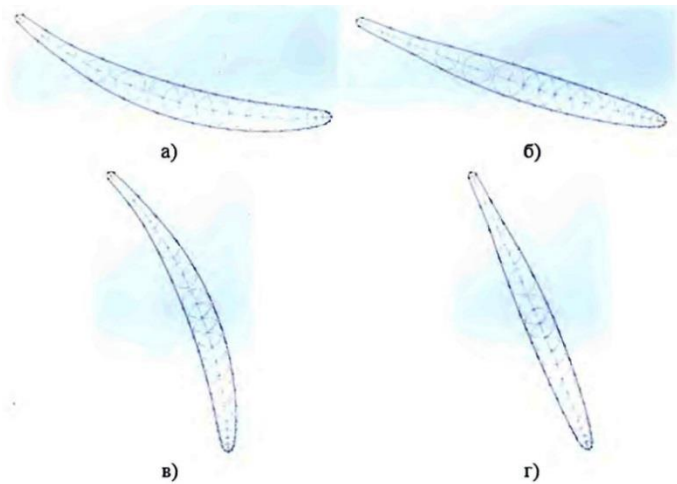


Рисунок 5.11 – Профілі лопатей контрроторів № 1–4 (а–г відповідно)

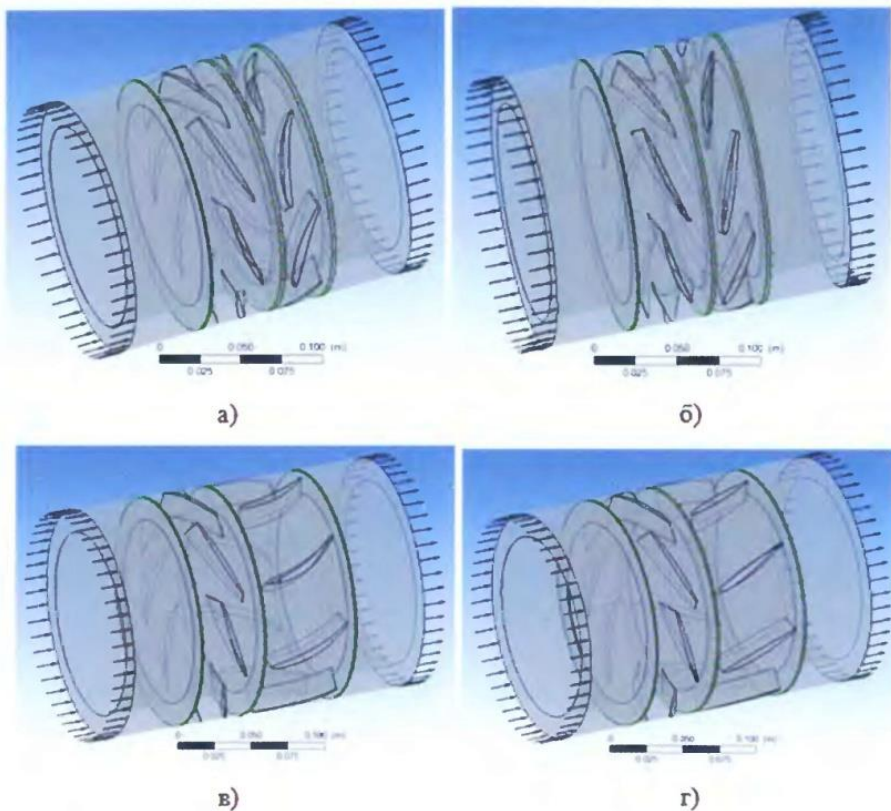


Рисунок 5.12 – Розрахункова модель КОН із різними профілями лопатевої системи контрротора

Унаслідок дослідження отримані напірні й енергетичні характеристики контрроторних осевих систем, побудовані на режимах $0,7Q_{ont}$, Q_{ont} , $1,2Q_{ont}$ у координатах $K_H - K_Q - K_{КД}$ (рис. 5.13). На рисунку 5.14 подані графіки розподілу відносних швидкостей у каналах контрроторних ступенів у вигляді ліній струму при $Q = 1,2Q_{ont}$.

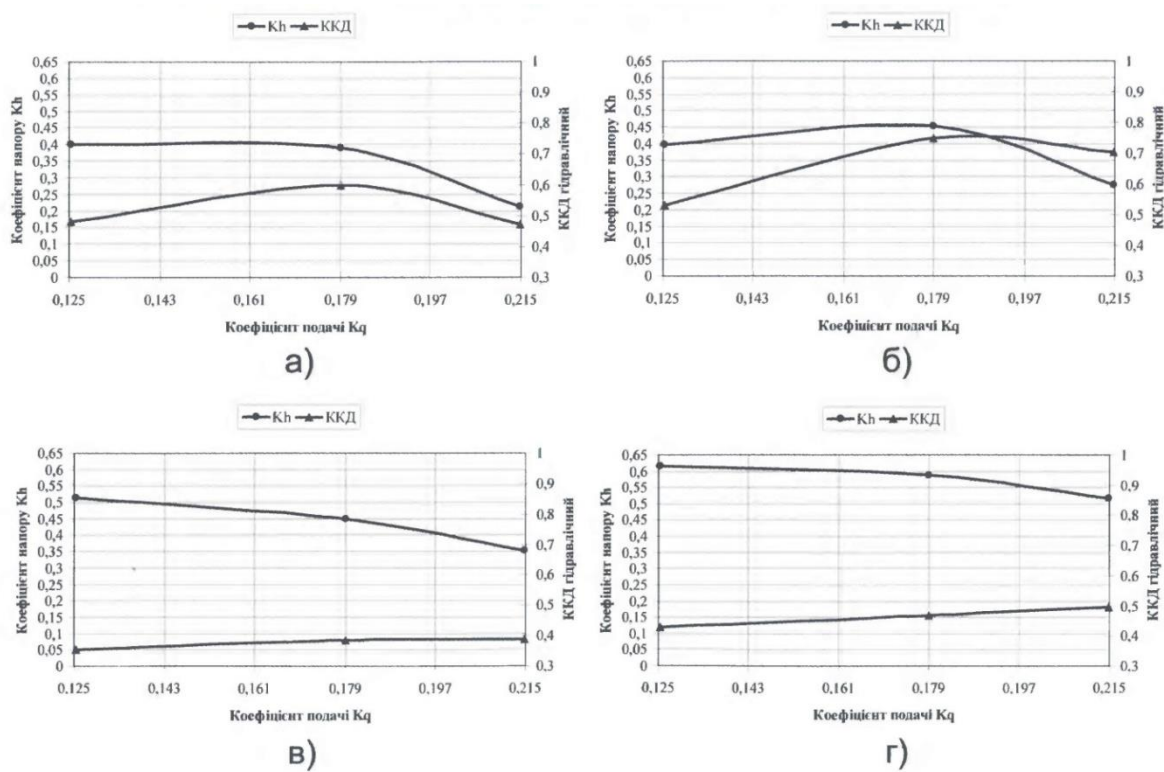


Рисунок 5.13 – Напірні й енергетичні характеристики КОН

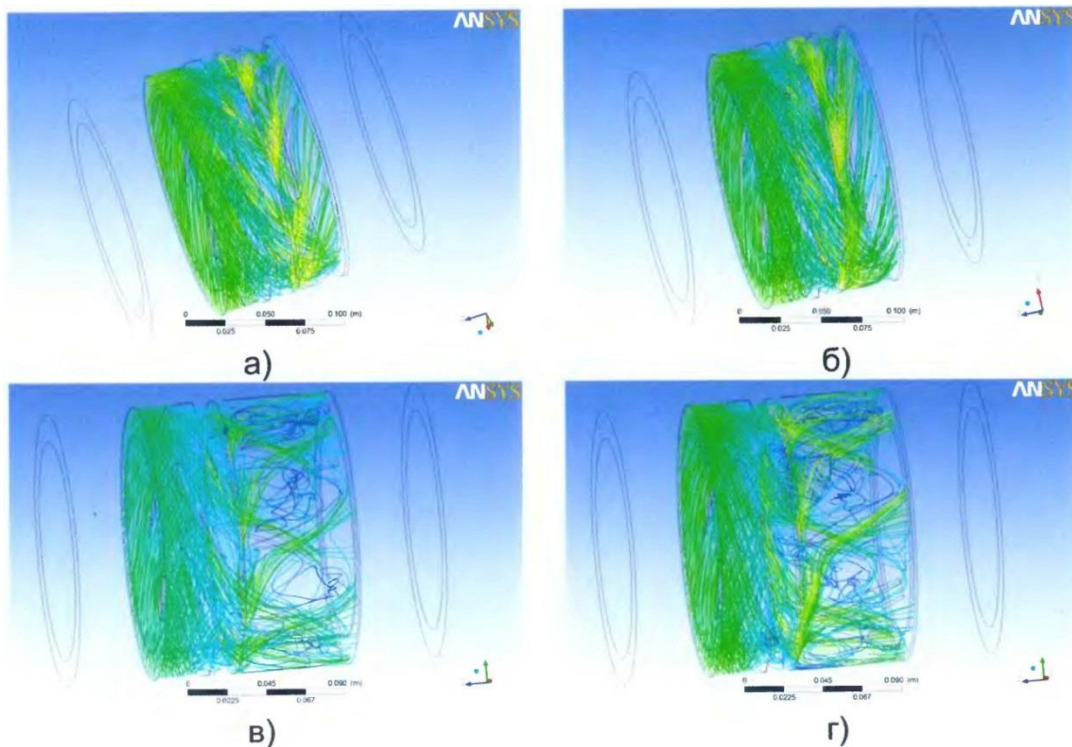


Рисунок 5.14 – Розподіл відносних швидкостей

Аналізуючи результати досліджень, було визначено, що найкращі показники має контрроторний ступінь із геометрією лопатевої системи контрротора другого профілю (див. рис. 5.11, 5.12 б). Порівнявши напірні й енергетичні характеристики одного робочого колеса з напрямним апаратом (ступеня) і контрроторного осьового ступеня (рис. 5.15), отримали на розрахунковому режимі ($Q = Q_{opt}$) зростання напору контрроторної системи на 87,5 % за неминучого зниження ККД, яке становило 18 %.

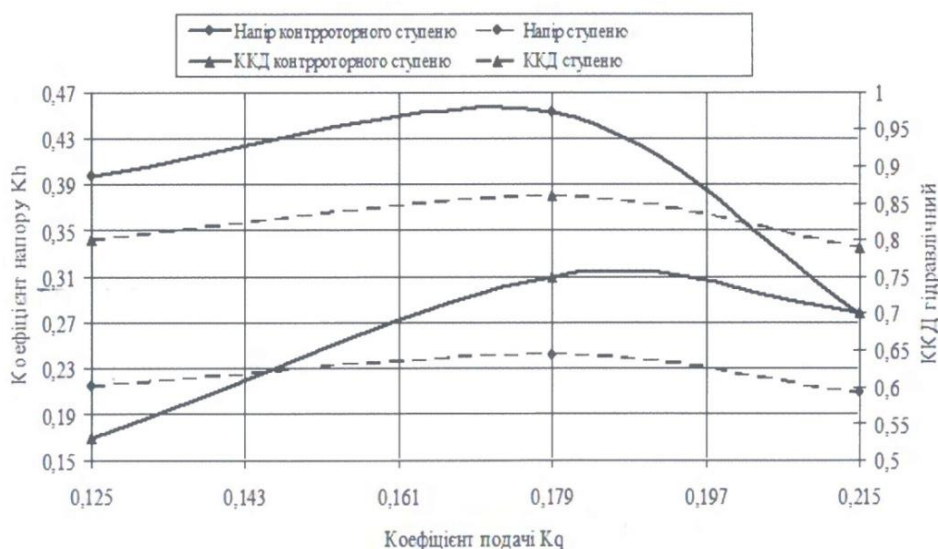


Рисунок 5.15 – Порівняння характеристик

Отже, застосування контрроторного ефекту в осьових насосах дозволило істотно підвищити напір ступеня за відчутного, проте в певних випадках експлуатації допустимого і неминучого (ускладнення робочого процесу) зниження ККД.

5.3 Контрроторна лопатева система відцентрового насоса

Незалежно від типу (осьова, діагональна, радіальна, відцентрова, доцентрова) лопатева решітка під час своєї взаємодії з потоком рідини, що проходить через неї, здійснює однако-вий фізико-механічний процес зміни інтегрального значення моменту імпульсу від входу в решітку до виходу з неї. Водночас можна вважати несуттєвими ті чи інші особливості кожної решітки (наявність або відсутність поля відцентрових сил, рух рідини проти поля цих сил, конфузорність або дифузорність відносних течій, наявність вихрових зон у міжлопаткових каналах). Розглянемо теоретичні передумови роботи контрроторної відцентрової лопатевої системи, яка в теорії здатна суттєво підвищити інтенсивність енергопередачі від робочих органів до потоку перекачуваного середовища.

Для аналізу контрроторної конструкції визначимо такі терміни та індекси.

Перший (I) ротор – це перша лопатева решітка, у яку входить потік рідини безпосередньо з підвода.

Другий (II) ротор – це друга лопатева решітка, яка сприймає потік рідини на виході з першого ротора і після його проходження направляє на вихід із контрроторної конструкції.

Водночас співвідношення кутових швидкостей роторів ω_I і ω_{II} можуть бути різними:

а) обертання решіток у протилежних напрямках з однаковою кутовою швидкістю;

- б) обертання решіток у протилежних напрямках із різними кутовими швидкостями;
- в) обертання решіток в одному напрямку з різними кутовими швидкостями;
- г) обертання першої і другої решіток зі змінними кутовими швидкостями¹⁹⁹.

На рисунку 5.16 поданий один із можливих варіантів відцентрового насоса з контрроторною лопатевою системою.

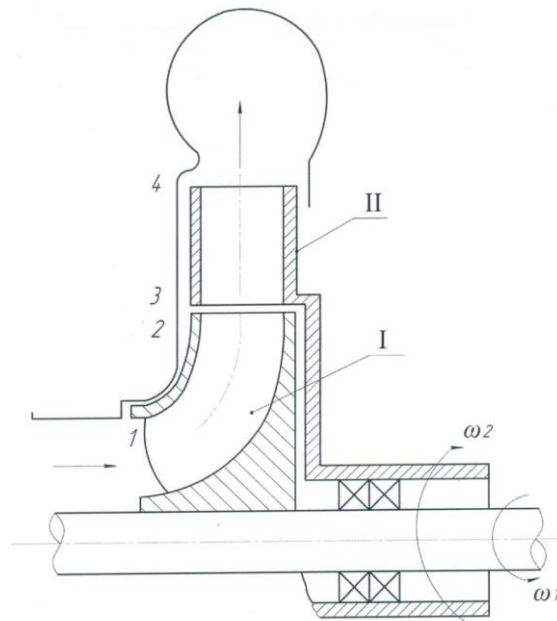


Рисунок 5.16 – Схема відцентрового контрроторного насоса

Водночас індексом «1» будемо позначати всі параметри течії і геометричні розміри, що належать до входу в першу лопатеву решітку. Аналогічно індексом «2» будемо використовувати для параметрів на виході з першої решітки, індекси «3» і «4» – для параметрів на вході і виході другої решітки відповідно. На рисунку 5.17 показана кінематика течії в цих лопатевих решітках.

Для зручності сприйняття решітки були рознесені на відстань «а». Вектори швидкостей і їхні складові подані для вісесиметричної схеми течії й умови $\omega_I = -\omega_{II}$ (решітки обертаються в протилежних напрямках з однаковою кутовою швидкістю). Крім того, на вході в кожну решітку обрані умови безциркуляційного натікання. Водночас варто зазначити, що якщо для першої решітки цю умову ($v_{u1} = 0$) нескладно забезпечити завдяки конструкції підвода, то забезпечити умову $v_{u3} = 0$ на вході в другу решітку буде значно складніше. Домогтися цього можна тільки завдяки відповідній комбінації геометричних і кінематичних параметрів як першої, так і другої решіток. Рекомендації для таких параметрів можуть бути встановлені аналітично із залученням експериментальних даних за впливом на інтегральні параметри контрроторної системи реальних параметрів лопатевих решіток. На цей момент таке завдання не ставиться.

На підставі з наведеної на рисунку 5.17 кінематики течії рідини через дві контрроторні решітки встановимо механізм істотного підвищення напору такою системою. Для цього скористаємося основним рівнянням робочого процесу лопатевих машин²⁰⁰.

¹⁹⁹ Ковалев И. А. Теоретическое описание работы контрроторной лопастной системы центробежного насоса / И. А. Ковалев, А. В. Ратушный, Н. В. Семёнова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія Математичне моделювання в техніці та технологіях. – 2016. – № 16 (1188). – С. 122–127.

²⁰⁰ Лопастные насосы. Теория, расчет и конструирование. – С. 17.

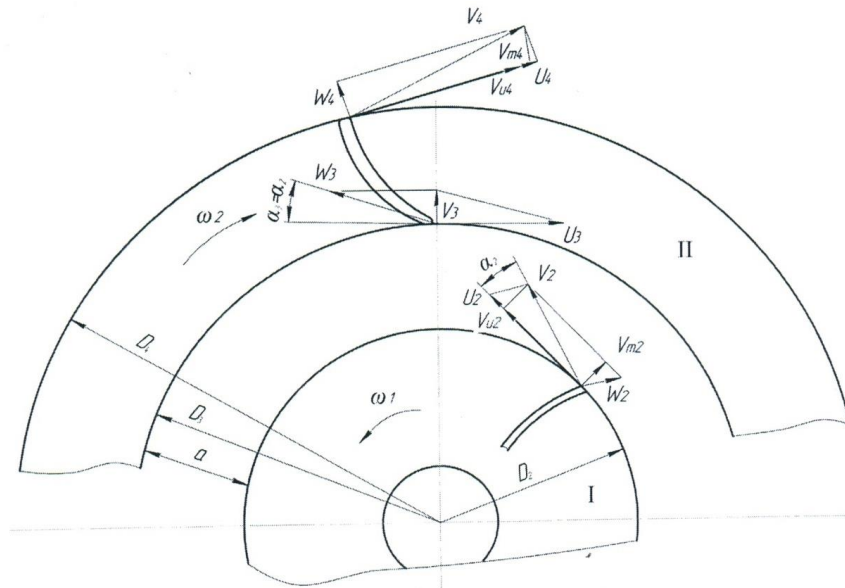


Рисунок 5.17 – Кінематика течії в контрроторних відцентрових решітках

Для першої решітки матимемо

$$H_{T\infty}(I) = \frac{\omega_I}{g} (v_{u2} \cdot r_2 - v_{u1} \cdot r_1). \quad (5.2)$$

При $v_{u1} = 0$ вираз (5.2) набуде вигляду

$$H_{T\infty}(I) = \frac{\omega_I}{g} (v_{u2} \cdot r_2). \quad (5.3)$$

Для другої решітки

$$H_{T\infty}(II) = \frac{\omega_{II}}{g} (v_{u4} \cdot r_4 - v_{u3} \cdot r_3 - (-v_{u2} \cdot r_2)). \quad (5.4)$$

За умови $v_{u3} = 0$ маємо

$$H_{T\infty}(II) = \frac{\omega_{II}}{g} (v_{u4} \cdot r_4 + v_{u2} \cdot r_2). \quad (5.5)$$

Зауважимо, що вираз (5.5) отримано на підставі того, що на вході в другу решітку течія, що вийшла з першої, має значний момент імпульсу (закрутку), створений першою решіткою ($v_{u2} \cdot r_2$). Водночас його напрям протилежний напрямку обертання другої решітки. І хоча вектор \bar{v}_3 закрутки не створює ($v_{u3} = 0$), закрутка $v_{u2} \cdot r_2 \in$ реальною негативною циркуляцією на вході в другу решітку і повинна враховуватися переважно в рівнянні.

У разі реальної лопатевої решітки циркуляція Γ_4 на виході з другого ротора при $\omega_I = -\omega_{II}$ ніколи не може бути нульовою, зважаючи на очевидні геометричні співвідношення ($r_4 > r_2$). Саме тому теоретичний напір для другого ротора (контрротора) необхідно розраховувати з урахуванням власних циркуляцій Γ_4 (на виході), Γ_3 (на вході) та Γ_2 , створену попереднім, першим відцентровим ротором, тобто

$$H_{T\infty}(II) = \frac{\omega_{II}}{2\pi g} (\Gamma_4 - \Gamma_3 - (-\Gamma_2)). \quad (5.6)$$

У разі, коли $\Gamma_3 = 0$ для забезпечення безциркуляційного входу і підвищення теоретичного напору,

$$H_{T\infty}(II) = \frac{\omega_{II}}{2\pi g} (\Gamma_4 + \Gamma_2). \quad (5.7)$$

Загальний напір обох решіток буде дорівнювати сумі напорів кожної з них

$$H_{T\infty} = H_{T\infty}(I) + H_{T\infty}(II) = \frac{\omega}{g} (v_{u4} \cdot r_4 + v_{u2} \cdot r_2) \quad (5.8)$$

за умови, що кутові швидкості кожної решітки однакові за модулем і різні за напрямком $\omega = \omega_I = -\omega_{II}$.

Варто також звернути увагу на те, що лопаті другої решітки рухаються назустріч течії, що виходить із першої решітки, змінюючи її момент імпульсу за дуже короткий час. А це згідно з теоремою імпульсів зумовлює різке зростання сили взаємодії між твердою поверхнею лопаті і течією, що на неї набігає. Це, очевидно, призводить до суттєвого зростання інтенсивності процесу енергопередачі. Закономірно постає важливе питання щодо того, а які ж саме фізичні процеси відбуваються в тонкій кільцевій зоні між ротором і контрротором; як вони впливають на процес енергопередачі загалом відцентрової контрроторної лопатевої системи. Фізична модель відповідних явищ буде запропонована в наступному пункті.

Розглядаючи робочий процес контрроторної лопатевої системи і насамперед роботу другої решітки, виникає припущення, що перша решітка, створюючи на вході в другу течію зі значною негативною циркуляцією Γ_2 , забезпечує тим самим інтенсивну зустрічну течію для лопатей другого ротора, з якими вони активно взаємодіють. Очевидно, що кінетична енергія цієї течії швидко переходить у стан енергії тиску, що нагадує робочий процес у гідромашинах активного принципу дії (наприклад, у струменевих ковшових турбінах)²⁰¹.

У радіальних контрроторних решітках через значно більш високий напір і меншу подачу (порівняно з осьовими) необхідно очікувати взаємодію сильно закрученої течії з лопатями другого ротора, що рухаються їй назустріч. Це, зі свого боку, викличе відповідні негативні гідродинамічні наслідки. Щоб їх зменшити, можна рекомендувати вихід із першої решітки розміщувати на значно меншому радіусі, а необхідну величину напору добирати завдяки другому ротору.

Наведені дослідження особливостей робочого процесу в контрроторних конструкціях дозволяють у межах ідеальної схеми вісесиметричності пояснити механізм енергопередачі (підвищення напору) в першій і особливо в другій лопатевих решітках і пояснити значення і місце кожної з них у цьому процесі.

У практиці створення відцентрових гідравлічних машин контрроторний принцип практично не трапляється. Відома розробка польських вчених²⁰², які ще на початку

²⁰¹ Папченко А. А. Спеціальні гідромашини : навч. посіб. / А. А. Папченко, В. О. Панченко. – Суми : СумДУ, 2015. – 221 с.

²⁰² Пат. 134101 ПНР. Центробежный проточный компрессор / J. Graczyk, J. Brejnak, K. Kawalec. – № 232056; заявл. 06.07.81; опубл. 31.10.86.

80-х років XX століття запропонували конструкцію компресора для авіаційних турбінних двигунів (рис. 5.18).

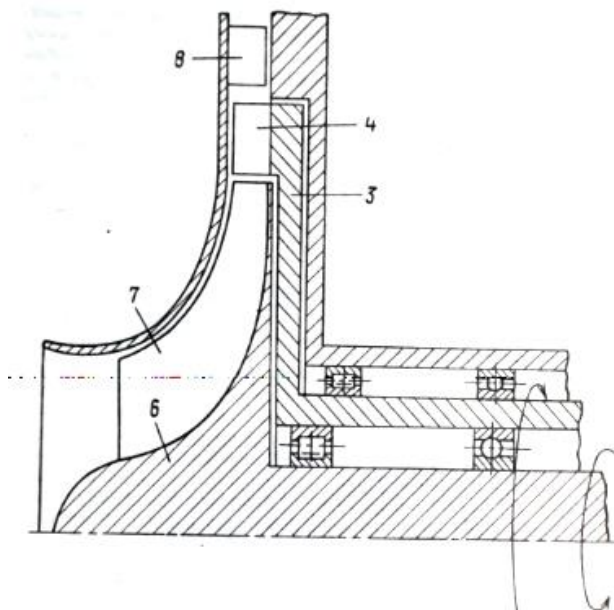


Рисунок 5.18 – Конструкція контрроторного компресора

У компресорі, що містить концентрично розташовані напіввідкрите робоче колесо 6 з лопатями 7 і нерухомий напрямний апарат 8. Між ними пропонується встановити додаткове РК 3 з відцентровими лопатями 4, яке обертається у зворотний бік щодо основного колеса. Автори вказують на те, що використання такої конструкції дозволяє домогтися підвищення тиску й ефективності компресора.

5.4 Дослідження відцентрового контрроторного комплексу

Як уже згадувалося, зважаючи на сучасні реалії розвитку промисловості загалом і насособудування зокрема, необхідно вести пошуки нових способів розвитку систем, що передають енергію рідині. Один із перспективних способів реалізації таких планів полягає в підвищенні інтенсивності передання енергії від робочого органа насоса до потоку рідини. Реалізація цього процесу полягає в застосуванні принципу контрроторності в насособудуванні як ідеї розвитку на «ближню» перспективу. У попередніх пунктах було продемонстровано, що він ефективно використовується в багатьох галузях техніки і досить добре розроблений для осьових вентиляторів і насосів. Відцентрові ж контрроторні системи на сьогодні є практично невідомими в техніці. Перші спроби їхнього комплексного теоретичного і чисельного дослідження були зроблені на кафедрі ПГМ СумДУ О. В. Ратушним і І. О. Ковальовим.

У пункті 5.3 наведений спрощений теоретичний опис роботи відцентрової контрроторної лопатевої системи і репрезентована можливість отримання нею значно більш високих напорів порівняно з одним колесом. Водночас розмір контрроторної частини II (див. рис. 5.16) може мати значно менші розміри, ніж діаметр робочого колеса (ротора) I. Звичайно, ротор і контрротор обертаються в протилежні боки.

Ще раз відзначимо, що привабливість контрроторної лопатевої системи полягає в тому, що перший ротор згідно з основним рівнянням гідромашин після себе створює напір H_I

і значну циркуляцію на виході ($+Γ_2$) у напрямку свого обертання. Ця циркуляція є негативною на вході для другого ротора, який обертається у протилежному напрямку ($Γ_3 = -Γ_2$). Отже, створюються гідродинамічні умови силової взаємодії течії з твердою поверхнею лопаті, яка рухається назустріч рідині. Тобто для лопатей другого ротора створюються умови істотно більшої силової взаємодії, яку для теоретичного напору другого ротора можна записати як $H_{II} = H_I + \frac{\omega}{2\pi g} [\Gamma_4 - (-\Gamma_2)]$.

Природне пояснення малої кількості спроб використання контрроторності у відцентрових системах – істотне ускладнення конструкції насоса, неминуче зростання різних видів втрат, пов'язаних із значним зростанням напору. Але проведення такого дослідження, на нашу думку, є важливим і актуальним завданням, оскільки воно у своїй основі має потенціал створення нової групи насосних систем з унікальними якостями.

Чисельне дослідження відцентрової контрроторної системи мало на меті отримання напірних і енергетичних характеристик відцентрових контрроторних лопатевих систем. Для досягнення поставленої мети були запропоновані декілька конструкцій лопатевої системи контрротора і розроблені на їхній основі тривимірні моделі рідини в контрроторній відцентровій лопатевій системі.

Відзначимо, на цьому етапі не ставилося завдання вироблення тих чи інших конструктивних рекомендацій, оскільки важливим є оцінювання діапазону їхніх параметрів. Також для подальших досліджень залишене питання про особливості привода відцентрового контрроторного насоса. Цілком можливо, оптимальною виявиться схема, запропонована як привод контрроторного осьового насоса (див. рис. 5.9).

Дослідження велися з використанням програмного продукту ANSYS CFX університетської ліцензії, в основі якого – метод чисельного розв'язання фундаментальних законів гідромеханіки^{203, 204}. Варто зазначити, що ANSYS CFX неодноразово апробувався під час розв'язання завдань насособудування, розбіжність результатів чисельного і фізичного моделювання не перевищує 5 %, тому цей програмний продукт придатний для розв'язання поставленого завдання дослідження.

Моделювання турбулентної течії потоку рідини виконувалося з використанням рівнянь Рейнольдса ($i, j = 1 - 3$)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\overline{\rho u_i}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u_i' u_j'}) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \right] + f_i \quad (5.9)$$

де $\overline{u_1}, \overline{u_2}, \overline{u_3}$ – осереднені за часом значення швидкостей;

$\overline{u_1'}, \overline{u_2'}, \overline{u_3'}$ – пульсаційні складові швидкостей.

Для замикання рівнянь Рейнольдса використовували $k-\varepsilon$ -моделі турбулентності. Під час використання цієї моделі система рівнянь руху рідини доповнюється двома диференціальними рівняннями, які описують перенос кінетичної енергії турбулентності k і швидкості дисипації ε відповідно (5.10), (5.11).

²⁰³ Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа : учебн. для вузов / Л. Г. Лойцянский. – 7-е изд. – Москва : Дрофа, 2003 – 840 с.

²⁰⁴ ANSYS CFX 13.0 Solver Theory. Release 13.0, 2010. – 261 p. – Режим доступа : <http://www.ansys.com>.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \overline{u_j k}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \rho \varepsilon, \quad (5.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \overline{u_j \varepsilon}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - \rho C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \dots, \quad (5.11)$$

де $P_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}$ – член, що виражає генерацію енергії k ,

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \quad \Gamma_\varepsilon = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}.$$

Параметри ε і μ_t визначаються так:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_j}} \right)^2, \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}.$$

Для чисельного дослідження за допомогою генератора сіток ICEM CFD були побудовані неструктуровані сітки тривимірної моделі рідини в робочих колесах. Для опису прикордонного шару поблизу твердих стінок було створено 12 шарів призматичних комірок. Попередньо було виконано дослідження на сіткову незалежність. Після генерації сітки у препроцесор задавалися вихідні дані. Як гранична умова на вході в розрахункову область задавалася масова витрата, на виході – статичний тиск. Для всіх твердих стінок була задана умова рівності нулю швидкості. Шорсткість стінок була взята $Ra_{6,3}$.

Величина змінної y^+ , яка характеризує згущення сітки біля стінок, перебувала в межах $20 < y^+ < 100$ одиниць, що відповідає рекомендаціям, наведеним у керівництві користувача.

Як еталон для порівняння отриманих результатів дослідження взяли параметри робочого колеса проміжного ступеня насоса ЦНС 180–1900, позначивши його РК № 1. Тривимірна рідинна модель колеса наведена на рисунку 5.19 а. За основу для конструкції лопатевої системи контрротора використана конструкція прямого апарата проміжного ступеня насоса ЦНС 180–1900 (рис. 5.19 б) як лопатева система, що добре себе зарекомендувала і гарно сприймає потік на виході з вищевказаного робочого колеса.

Відзначимо, що дослідження можливостей застосування ефекту контрроторності в відцентрових насосах, на наш погляд, доцільніше вести, ґрунтуючись на вже відпрацьованих елементах. Такий підхід застосовується, щоб, не ставлячи на цьому етапі питання про практичну реалізацію отриманих результатів, все ж таки мати в майбутньому можливість запропонувати промисловості до виготовлення відцентрові контрроторні насосні системи, вносячи водночас, якщо можна, мінімальні зміни у вже наявні конструкції, на основі яких такі системи досліджуються і будуть пропонуватися, якщо можливо, до подальшого виробництва.

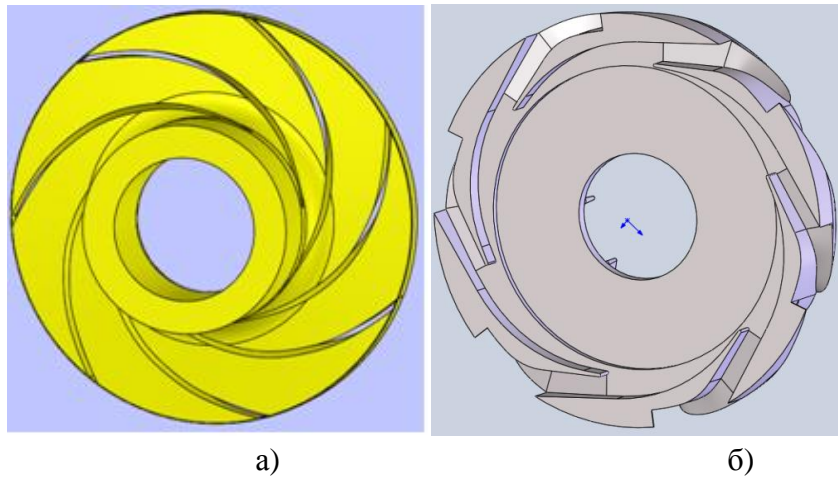


Рисунок 5.19 – Тривимірні моделі: а) рідини в робочому колесі (схема РК № 1), б) напрямного апарата

На рисунку 5.20 наведені тривимірні моделі рідини в контрроторах, які досліджувалися під час спільної роботи з еталонним робочим колесом згідно зі схемою рисунка 5.16. Ці конструкції отримали позначення РК № 2 – РК № 4 (рис 5.20 а–в). Про особливості вибору конструкцій контрроторів схем РК № 3 і РК № 4 буде зазначено нижче. Також для порівняння були досліджені дві конструкції лопатевої системи контрротора J- і С-подібної форми із $Z_{\text{контрротора}} = 25$ (схеми РК № 5 і № 6 відповідно – рис. 5.20 г–д).

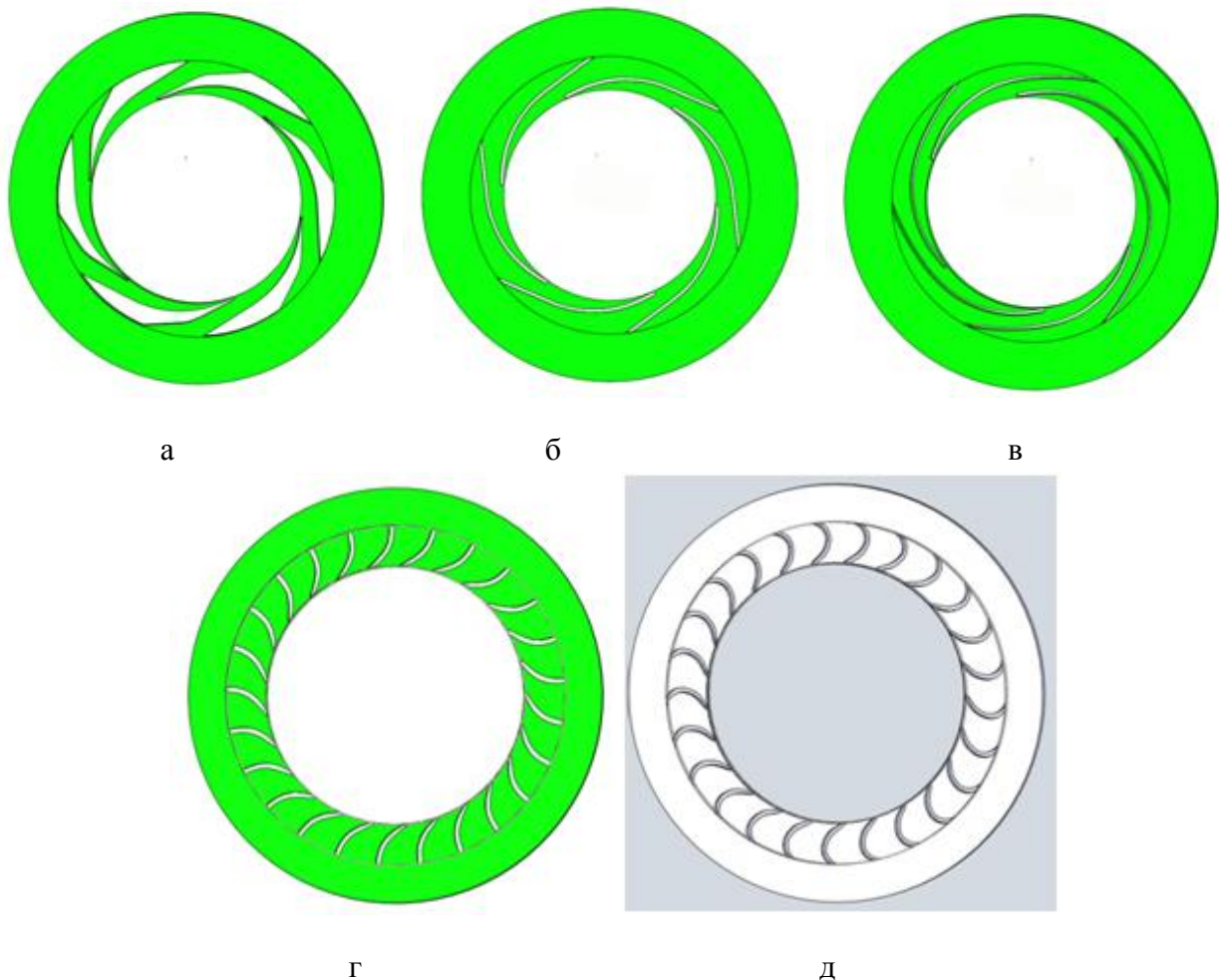


Рисунок 5.20 – Конструкції лопатевих систем контрроторів схем РК № 2 – РК № 6

Отже, чисельні дослідження проводилися на основі робочого колеса ($n_s = 65$) і напрямного апарата проміжного ступеня насоса ЦНС 180–1900 з такими параметрами: $Z_{ротора} = 7$, $Z_{контрротора} = 6$ (схеми РК № 2 – РК № 4), $Q = 180 \text{ м}^3/\text{год}$, $n = 3000 \text{ об./хв}$ при $\bar{Q} = 0,5; 0,7; 0,9; 1; 1,1; 1,2$. Для оцінювання параметрів зручним є використання співвідношення безрозмірних коефіцієнтів напору (ψ), потужності (μ), подачі (φ) і ККД (η) розглянутих систем до безрозмірних коефіцієнтів цих параметрів у точці максимального ККД ($\psi_0, \mu_0, \varphi_0, \eta_0$) еталонного колеса

$$\psi = \frac{2gH}{u_2^2}; \quad \varphi = \frac{4Q}{\pi D_2^2 u_2}; \quad \mu = \frac{\varphi\psi}{\eta} = \frac{8N}{\rho \pi D_2^2 u_2^3 \eta}.$$

Розподіл відносних швидкостей для схем РК № 2 – РК № 6 подано на рисунку 5.21 а–д відповідно. Результати розрахунків подані на рисунку 5.22, зміни параметрів напору, потужності і ККД щодо еталонного колеса за номінальної подачі ($Q = 180 \text{ м}^3/\text{год}$) подані в таблиці 5.1.

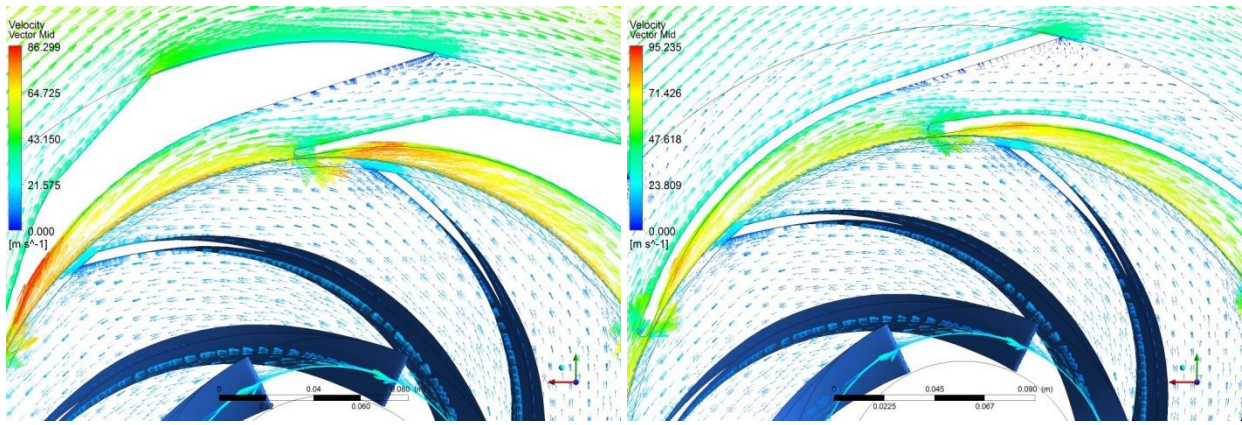
Отримані внаслідок проведеного чисельного дослідження інтегральні характеристики досліджуваних контрроторних відцентрових лопатевих систем підтвердили припущення про те, що такі системи здатні значно інтенсифікувати процес енергопередачі від робочих органів до потоку рідини. Досягнуте підвищення напору в межах цієї системи в багато разів перевищує результати всіх інших можливих способів підвищення напору відцентрового робочого колеса²⁰⁵. Звернемо увагу, що всі результати отримані порівняно з параметрами одного робочого колеса. Для того, щоб порівнювати параметри ступенів, закономірним є проведення дослідження контрроторної відцентрової лопатевої системи в комплексі з відповідним пристроєм.

Водночас неможливо не відзначити негативну тенденцію суттєвого падіння ККД системи. Як видно з рисунка 5.21 а)–б) (схеми РК № 2 і № 3), на тильному боці лопатей контрротора спостерігається зона вихороутворення. Спроба змінити конструкцію цієї лопатевої решітки була покликана для узгодження положення лопаті з напрямком течії потоку в робочому колесі після зони повороту потоку, усунувши зону вихороутворення (РК № 4). Цей захід не дав позитивного результату через збільшення гідравлічних втрат у зв'язку з подовженням самої лопаті.

Таблиця 5.1

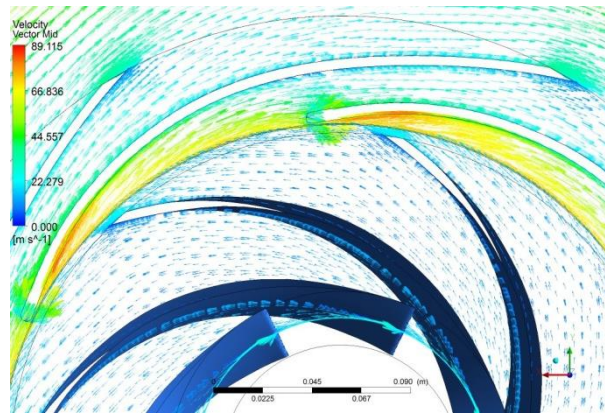
Схема РК	$\Delta H, \%$	$\Delta N, \%$	$\Delta \eta, \%$
№ 2	+142	+237	-28
№ 3	+182	+274	-24,4
№ 4	+175	+264	-24,4
№ 5	+163	+488	-54,9
№ 6	+253	+744	-58,5

²⁰⁵ Ратушный А. В. Исследование перспективных способов повышения напорности центробежного насосного колеса / А. В. Ратушный // Герметичность, вибронадежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования. Гервикон+насосы-2014 : сборник докладов участников XIV Международной научно-технической конференции. – Сумы : Папирус, 2014. – С. 139–141.

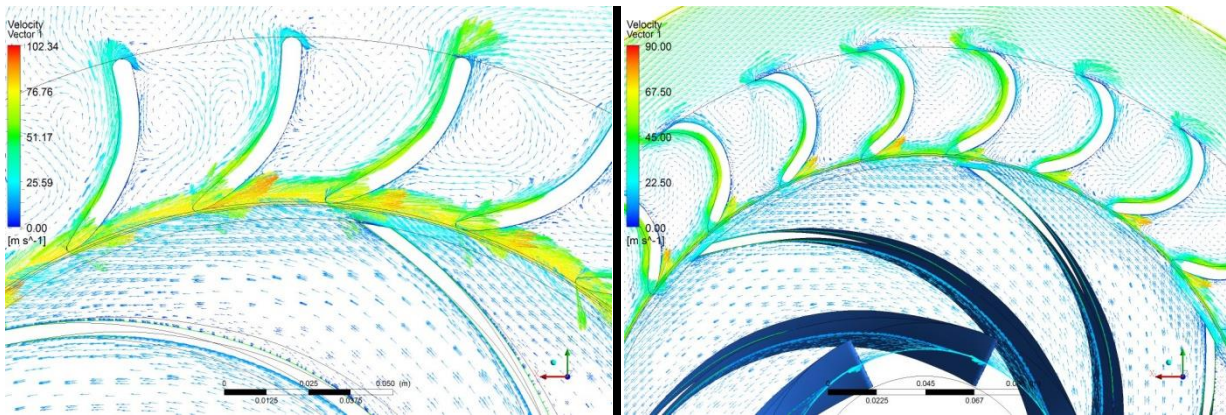


а

б



в



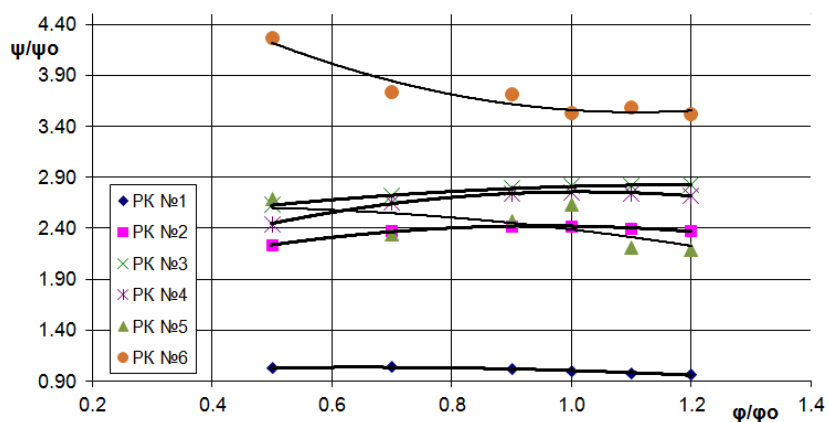
г

д

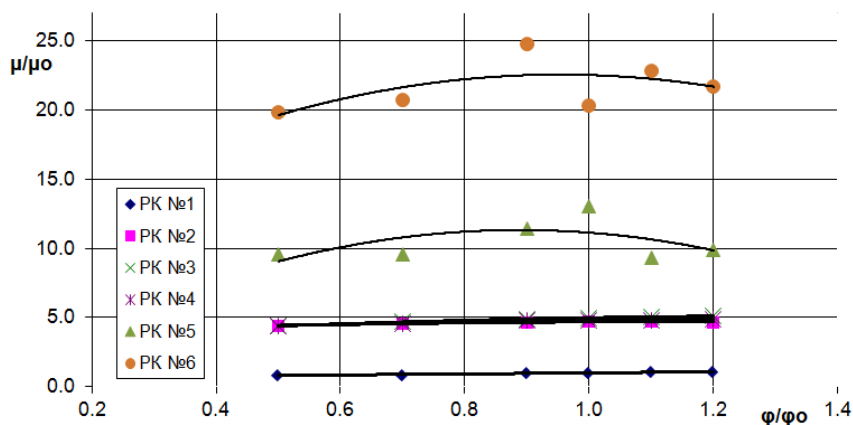
Рисунок 5.21 – Розподіл відносних швидкостей

Отже, можна відзначити про те, що відповідає за падіння ККД інший процес, ймовірно за все, безпосередньо пов'язаний із підвищенням напору системи. Можна припустити, що в зоні переходу від ротора до контрротора наявний інтенсивний вихор, відповідальний за суттєве підвищення напору, і одночасно відчутне падіння ККД. Варто зазначити, що такі вихори обумовлюють робочий процес цілої низки інших насосів –

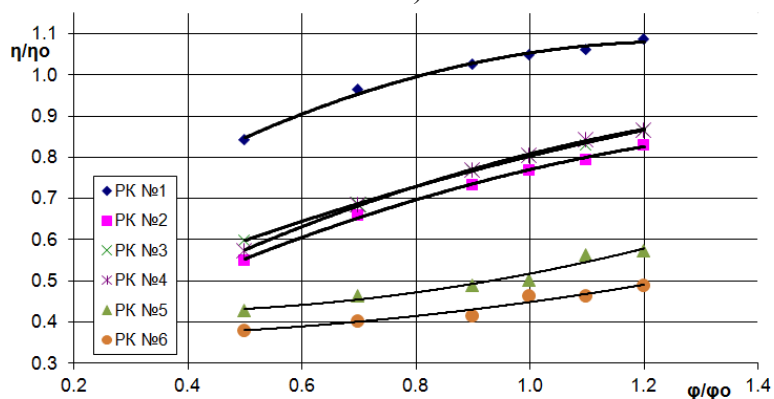
вільновихрових, роторно-вихрових, лабіринтно-вихрових²⁰⁶. Цей факт можна пояснити закономірністю розвитку технічних систем, що полягає в тому, що чим складніше робочий процес машини, тим нижче її ККД. Водночас контрроторні системи, зважаючи на особливості своєї роботи, природно вимагають збільшення приводної потужності.



а)



б)



в)

Рисунок 5.22 – Напірна (а), потужнісна (б) і характеристика ККД (в) у досліджуваних схемах

²⁰⁶ Голубев А. И. Лабиринтно-винтовые насосы и уплотнения для агрессивных сред / А. И. Голубев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1981. – 112 с.

Підтвердженням цих припущень є результати дослідження схем РК № 5 і особливо РК № 6. Під час використання контрротора з лопатями С-подібної форми вдалося досягти найвищого ступеня інтенсифікації енергопередачі (див. табл. 5.1). Однак вихрові структури в цьому разі заповнили практично всю його проточну частину (див. рис 5.21 д), знизивши ККД системи більш ніж на 50 % порівняно з еталонним робочим колесом.

Загалом отримані результати дозволяють відзначити перспективність дослідження контрроторних відцентрових лопатевих систем у плані удосконалення лопатевої системи контрротора, а також з урахуванням об'ємних втрат і в комплексі з відвідними пристроями.

5.4.1 Уточнення теоретичної моделі відцентрової контрроторної системи

На основі даних, отриманих за допомогою чисельного моделювання, уточнимо теоретичну модель контрроторного ступеня, описаного в пункті 5.3. Для цього розглянемо особливості руху потоку в міжроторному просторі (рис. 5.23).

Вище було висунуто припущення, що відповідає як за значне зростання напору, так і за відчутне зниження ККД контрроторної системи порівняно з окремим робочим колесом система вихорів, наявних у дуже тонкій порівняно з розмірами ротора і контрротора кільцевій міжроторній зоні.

Відзначимо, що через особливості сполучення розрахункових областей в ANSYS CFX ми не маємо можливості візуалізувати ці вихори. Водночас непрямі дані, наявні на графіках розподілу відносних швидкостей у відцентровій контрроторній системі, свідчать про їхню наявність.

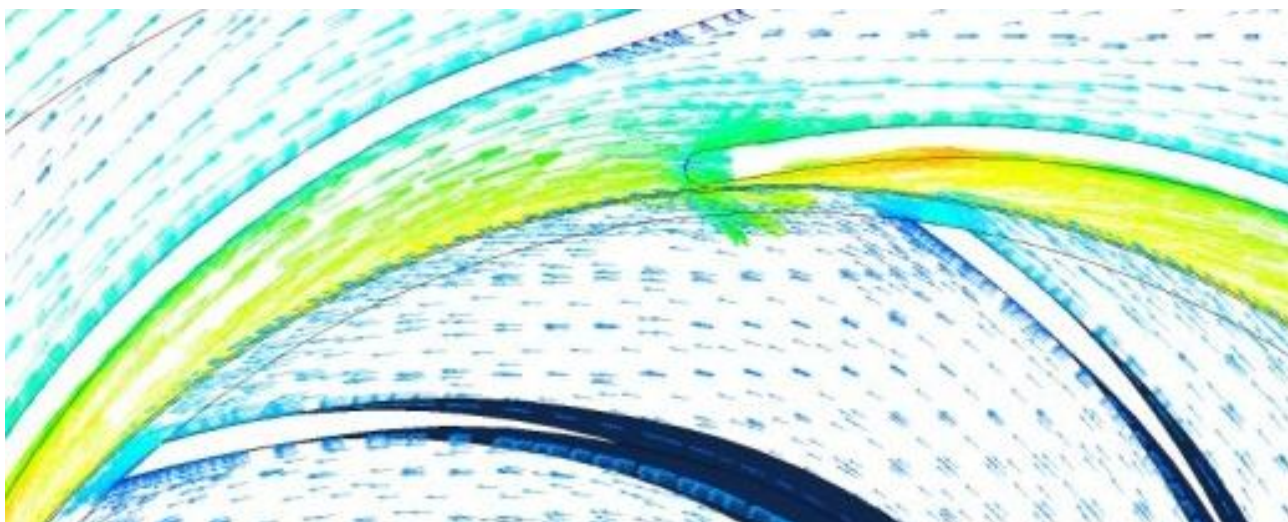


Рисунок 5.23 – До розгляду особливості руху потоку в міжроторному просторі

Розглянемо рух рідкої частинки щодо лопатевих систем ротора і контрротора. Частка виходить із робочого колеса з відносною швидкістю \overline{w}_2 , спрямованою на його лопаті, і входить у контрротор зі швидкістю \overline{w}_3 , спрямованою по лопаті контрротора відповідно. Водночас на підставі рисунка 5.23 швидкість \overline{w}_3 за модулем істотно більша, ніж \overline{w}_2 ($w_3 \approx 4w_2$). Отже, рідка частка в міжроторному просторі зазнає різкої зміни напрямку руху і приросту швидкості. З огляду на те, що ротор і контрротор рухаються з однаковими за модулем кутовими швидкостями, у міжроторному просторі повинен бути наявним механізм

такого зростання швидкості, а отже, і кінетичної енергії, що і забезпечує дуже високий напір відцентрової контрроторної системи порівняно з одним робочим колесом.

На основі напрацьованого досвіду вивчення вихрових машин²⁰⁷ можна відзначити, що саме ці насосні системи забезпечують створюваними вихровими структурами у своїх проточних частинах високу інтенсивність енергопередачі і, як наслідок, високі напори. Крім того, природність вихрового характеру руху рідини в міжроторному просторі пов'язана з необхідністю зміни напрямку руху рідких частинок. Тобто вихори в міжроторному просторі відцентрової контрроторної насосної системи забезпечують спрямованість руху частинки і зростання її енергії. Водночас частина рідини буде постійно перебувати у вихорі, на підтримку якого і витрачатиметься енергія. Отже, саме з цим пов'язано помітне падіння ККД контрроторної системи порівняно з одиночним робочим колесом.

Відзначимо, що оскільки міжроторний простір замалий по ширині, тому що ротор і контрротор передбачається встановлювати співвісно з невеликим проміжком, надалі зону вихороутворення будемо називати системою мікрОВихорів. До того ж можна припустити, що забезпечення саме мінімально можливої ширини міжроторного простору є оптимальною для відцентрових контрроторних систем, оскільки це зумовить мінімальні розміри кожного вихору і відповідно максимальну їхню кількість у міжроторній зоні. А з огляду на те, що спостерігається збільшення w_3 порівняно з w_2 , констатуємо, що мікрОВихор буде обертатися значно швидше, ніж швидкість обертання кожного ротора (беручи ці швидкості однаковими). Все це в сумі, на нашу думку, і лежить в основі істотного зростання інтенсивності енергопередачі відцентрової контрроторної системи.

Судячи з усього, правильне розуміння особливостей руху рідкої частинки в міжроторному просторі через зону мікрОВихорів є ключовим під час розв'язання завдання оптимального профілювання вхідної ділянки лопатевої системи контрротора. Цей мікрОВихор можна умовно уявити у вигляді квазітвердого циліндра, що обертається, і захоплює рідку частку. Сама ж частка, вийшовши з робочого колеса, почне здійснювати в міжроторному просторі рух за складною траєкторією, про яку буде сказано нижче, поки не буде підхоплена вхідною кромкою контрроторної лопаті.

Резонно зазначити, що цей, певною мірою ідеалізовано репрезентований процес, буде здійснюватися оптимально з найвищим ККД за умови узгодження напрямку вектора швидкості $\overline{w_3}$ і кута установки контрроторної лопаті β_3 для забезпечення, якщо можливо, безударного входу потоку на лопать.

Отже, загалом необхідно пов'язати кути β_2 і β_3 з урахуванням виявленої внаслідок чисельного дослідження залежності $w_3 \approx 4w_2$, запропонувавши відповідну можливу форму траєкторії руху частки в міжроторному просторі на підставі припущення про наявність там мікрОВихрової структури.

Отже, рідкі частинки, виходячи з робочого колеса (першого ротора), спрямовуються до зони мікрОВихорів, які обертаються зі значно більш високими швидкостями, ніж швидкості роторів. Зазвичай можна припустити, що ці мікрОВихори розташовуються посередині міжроторної зони, і саме від них частинки рідини отримують чотириразовий приріст відносної швидкості, прямуючи далі на вхід у контрротор.

²⁰⁷ Байбаков О. В. Вихровые гидравлические машины / О. В. Байбаков. – Москва : Машиностроение, 1981. – 197 с.

Траєкторія руху рідкої частинки, судячи з усього, буде являти собою складну криву, що складається з дуги еліпса і гілки параболи в зонах до і після зони мікротрорів відповідно (рис. 5.24). Саме така траєкторія, на наш погляд, буде найбільш точно відображати наявність у міжротторному просторі прискорення частки. А загалом такий характер її руху уявляється подібним руху одного небесного тіла в полі тяжіння іншого, набагато більш масивного.²⁰⁸

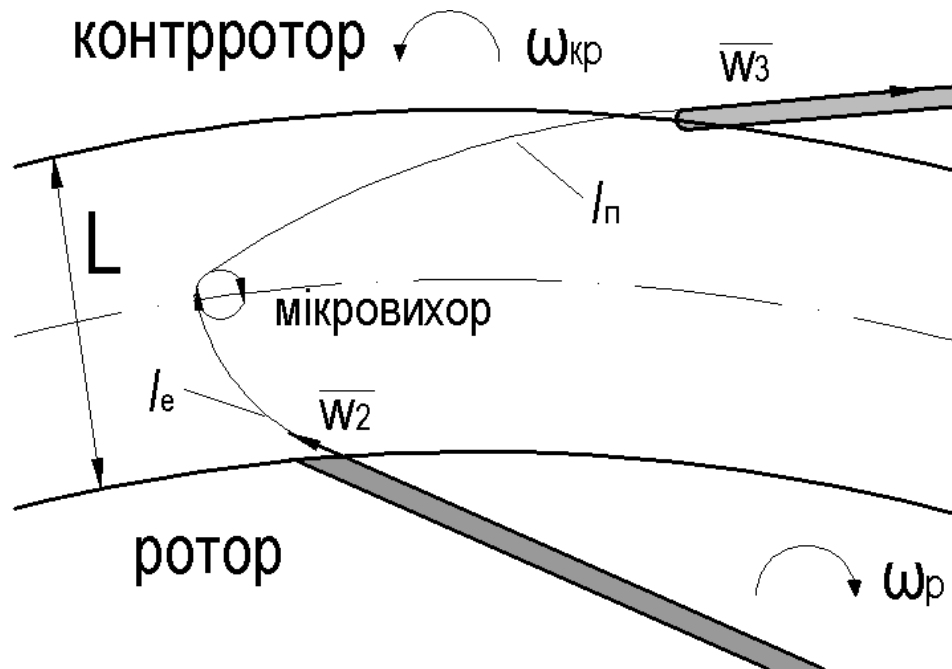


Рисунок 5.24 – Схематична траєкторія руху рідкої частинки в міжротторному просторі відцентрового контрротторного комплексу

Аналіз складових траєкторії еліптичної дуги (l_e) і параболи (l_n) з урахуванням вищевказаних особливостей, які спостерігаються, дозволив отримати такі залежності: $l_n = 4 l_e$ і $\beta_2 = 4\beta_3$, що і відображає шукану стосовно інтегральних параметрів напору і ККД залежність відповідних кутів установки лопатей ротора (на виході) і контрроттора (на вході). Відзначимо, що результати чисельного дослідження відцентрової контрротторної системи якраз і були отримані під час практичного виконання отриманого вище співвідношення кутів. Водночас проведені дослідження з кутами β_3 як більше, так і менше, ніж приблизне значення $0,25\beta_2$, не виявили можливостей зростання як напору, так і ККД.

Варто зазначити, що зі збільшенням міжротторної відстані позначилося різке падіння напору контрротторного комплексу. На підставі цього можемо говорити про наявність певних підтверджень і відповідної справедливості висунутих припущень і отриманих співвідношень щодо принципу й особливостей робочого процесу відцентрового контрротторного комплексу. У підсумку відзначимо, що розміри мікротрору (d) і ширини міжротторного простору (L) будуть співвідноситися так: $d < 0,25L$.

²⁰⁸ Мирер С. А. Механика космического полёта. Орбитальное движение / С. А. Мирер. – Москва : Изд-во МГТУ, 2013. – 106 с.

5.5 Від’ємна циркуляція швидкості на вході в робоче колесо насоса як контрроторний ефект

Насосні лопатеві системи сьогодні відповідно до чинних рекомендацій проектуються з умови наявності перед робочим колесом впорядкованої структури потоку рідини (віссиметричний потік із рівномірним розподілом швидкостей по всьому перетину) і нульовим значенням циркуляції швидкості ($\Gamma_l = 0$)^{209, 210, 211, 212, 213}.

Прикладів використання додатної циркуляції на вході в робоче колесо небагато, і всі вони застосовуються переважно для зменшення гідравлічних втрат, що виникають під час обтікання перекачуваним середовищем прохідного вала, зокрема, у насосах типу «Д» або для поліпшення масогабаритних параметрів насоса. Водночас в теорії і практиці вітчизняного насособудування не була належно оцінена можливість корисного використання значного за величиною від’ємного моменту швидкості потоку перед робочим колесом, який може створюватися різними способами. У доступній для широкого кола фахівців літературі відсутні однозначні докази того, що наявність від’ємного моменту швидкості потоку перед робочим колесом погіршує його напірні й енергетичні характеристики.^{214, 215} Водночас створення від’ємної закрутки на вході як до осьового, так і до відцентрового робочих коліс можна розглядати як контрроторний ефект.

Сприятливий вплив невеликої від’ємної закрутки потоку на вході в робоче колесо відзначено для насосів середньої швидкохідності ($n_s = 200$). Під час експериментального дослідження ступенів насоса ЕПН-8 завдяки деякій від’ємній закрутці потоку, що створюється зворотними каналами відведення, вдалося не лише збільшити напір проміжного ступеня, а й збільшити ККД на 1,5–2 %²¹⁶.

Експериментальне дослідження впливу закручування вхідного потоку на характеристики відцентрових насосів²¹⁷ виявили залежність закрутки на вході в робоче колесо на величини колової та радіальної складових швидкості, напору і потужності привода. Закручування потоку здійснювалося в напрямку обертання на 27, 43 і 50° і проти напрямку обертання на –25, –43 і –51°. Водночас величини напору і витраченої потужності визначалися за об’ємних витрат 0–160 м³/год і порівнювалися за відносних витрат 0,7; 1,0 і 1,3. Попередньо були оцінені гідравлічні опори вхідної маточини (обтічника) і всіх закручувальних вхідних апаратів. Дослідження дозволили визначити абсолютні і відносні зміни

²⁰⁹ Боровский Б. И. Энергетические параметры и характеристики высокооборотных лопастных насосов / Б. И. Боровский. – Москва : Машиностроение, 1989. – 184 с.

²¹⁰ Ломакин А. А. Центробежные и осевые насосы / А. А. Ломакин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва – Ленинград : Машиностроение, 1966. – 364 с.

²¹¹ Лопастные насосы : справочник / под общ. ред.: В. А. Зимницкого, В. А. Умова. – Ленинград : Машиностроение, 1986. – 334 с.

²¹² Малюшенко В. В. Расчет и профилирование осевого насоса / В. В. Малюшенко. – Харьков : ХПИ, 1982. – 51 с.

²¹³ Папир А. Н. Методика проектирования лопастных систем осевых насосов : в кн.: Лопастные насосы / под. ред.: Л. П. Грянка и А. Н. Папира. – Ленинград : Машиностроение, 1975. – С. 70–77.

²¹⁴ Евтушенко А. А. Стандартизация выбора параметров вновь создаваемых насосов общепромышленного назначения / А. А. Евтушенко // Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты: теория, расчет, конструирование : тем. сб. науч. трудов / отв. ред. И. А. Ковалев. – Киев : ИСДО, 1994. – С. 20–28.

²¹⁵ Евтушенко А. А. Задача создания средств ведения расчетного эксперимента в насосостроении / А. А. Евтушенко // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці : праці II Української науково-технічної конференції, 27–30 травня 1997 року. – Черкаси : ЧІТІ, 1998. – С. 45–50.

²¹⁶ Горгиджян С. А. Погружные насосы для водоснабжения и водопонижения / С. А. Горгиджян, А. И. Дягилев. – Ленинград : Машиностроение, 1968. – 112 с.

²¹⁷ Veränderung: Untersuchungen der Vordralleinflüsse auf Kennlinien von Kreiselpumpen Schröder Valentin // Maschinenmarkt. – 1994. – 100, № 27. – P. 34–37.

характеристик вхідного ступеня відцентрового насоса, пов'язані з цілеспрямованим (використання поворотних лопаток) або ненавмисним закручуванням потоку. До того ж були виявлені деякі особливості, що не підпадають під обґрунтування в межах сучасної теорії гідромашин.

Ще раз зазначимо, що на підставі цього можна зробити важливий висновок про наявність у відцентрових контрроторних турбомашинах деяких нових фізичних явищ, які явно впливають на їхній робочий процес. Передбачається, що в так званій міжроторній зоні між ротором і контрротором (зоні взаємодії потоку, що виходить із ротора з лопатевою решіткою набігаючого контрротора) виникає квазістаціонарна вихрова структура. Це припущення було докладно описано в попередньому пункті.

У СумДУ П. М. Калиніченком були проведені експериментальні дослідження впливу від'ємної закрутки на вході в лопатеву систему робочого колеса заглибного моноблочного насоса ОПВ 3600-8. З характеристики цього насоса, побудованої в координатах «коефіцієнт напору K_H – коефіцієнт подачі K_Q » ($K_H = \frac{H}{n^2 D_2^2}$; $K_Q = \frac{Q}{n D_2^3}$) з використанням параметра коефіцієнта моменту швидкості ($m = \frac{(rv_u)_{cp} D_{пр}}{Q}$), випливає, що введення від'ємної закрутки позитивно позначається на економічності проточної частини насоса загалом (рис. 5.25)²¹⁸.

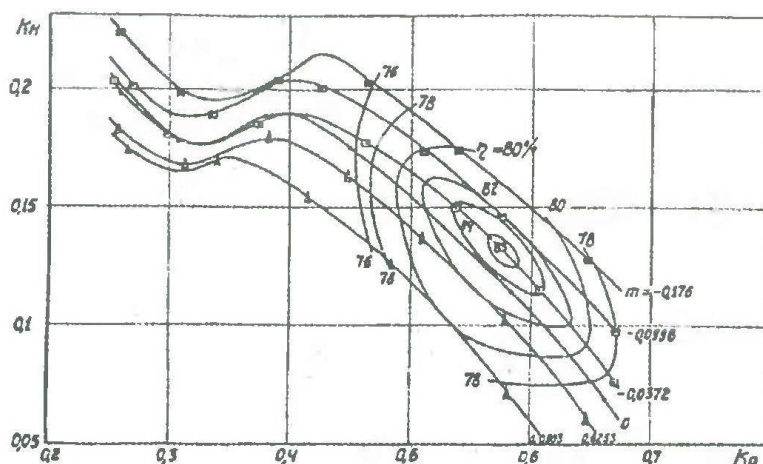


Рисунок 5.25 – Характеристика насоса ОПВ 3600-8

На кафедрі прикладної гідроаеромеханіки Сумського державного університету проводилися дослідження закрутки потоку на напірну й енергетичну характеристики осьового насоса ОПМ 2500-5 з лопатевою системою типу «напрямний апарат – робоче колесо»^{219, 220, 221}. Щодо застосування негативної циркуляції вдалося домогтися підвищення напору, енергетичні та антикавітаційні якості насоса також були на високому рівні.

²¹⁸ Калиніченко П. М. Некоторые уточнения уравнений гидромеханики и теории лопастных насосов / П. М. Калиніченко. – Киев : ИСМО, 1999. – 240 с.

²¹⁹ Бурлака В. Б. Влияние момента скорости потока перед рабочим колесом на местоположение оптимального режима работы лопастного насоса / В. Б. Бурлака, А. Г. Гусак, А. А. Евтушенко // Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Машиностроение. – 2000. – № 38, Т. 2. – С. 243–248.

²²⁰ Гусак А. Г. К вопросу о влиянии момента скорости потока перед р.к. на напорную и энергетическую характеристики осевого насоса / А. Г. Гусак, В. Б. Бурлака // Материалы научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов инженерного факультета. – Сумы : СумГУ, 2000. – С. 102–104.

Відзначимо водночас, що для осьових турбомашин загалом і насосів цього типу зокрема створити негативну циркуляцію конструктивно значно простіше, ніж для відцентрових, хоча для останніх ефективність застосування контрроторного ефекту (для підвищення напору, наприклад) на вході в лопатеву систему вважається набагато більш високою.

Отже, усі розглянуті вище дані досліджень дозволяють зауважити про доцільність проведення подальшого вивчення і застосування на практиці від'ємної циркуляції швидкості (закрутки) на вході в робоче колесо насоса як контрроторного ефекту.

5.5.1 Дослідження вхідної циркуляції на параметри відцентрового ступеня

Доволі перспективною є можливість дослідження впливу від'ємної циркуляції в багатоступінчастих насосах, наприклад ЦНС. Для того, щоб мати змогу певним способом порівняти отримані результати, дослідження велися на базі проміжного ступеня насоса ЦНС 180-1900, як і для відцентрового контрроторного комплексу (див. п. 5.4). Від'ємна циркуляція моделювалася у проточній частині за схемою «робоче колесо – напрямний апарат – робоче колесо» за допомогою зміни лопаток зворотного каналу напрямного апарата. Одночасно з цим було запропоновано перейти до безлопатевої схеми перевідного пристрою, спроектованого на основі базового НА проміжного ступеня насоса ЦНС 180-1900.

Отже, дослідження велись у два етапи: вибір оптимальної з погляду втрат конструкції безлопатевого відводу та вибір оптимальної з погляду підвищення напірності конструкції лопаток зворотного каналу. Обґрунтованість переходу до безлопатевої схеми буде наведена нижче. Конфігурація безлопатевого кільцевого дифузора на основі габаритних розмірів базового ступеня подана на рисунку 5.26. Водночас порівняно з базовим НА (див. рис. 5.19 б) $b_3 = b_{3\text{баз}}$, $b_3 = b_4$, $(b_5 = b_{5\text{баз}}) > b_4$.

Дослідження велися з використанням програмного продукту ANSYS CFX за методикою, висвітленою у пункті 5.4 на робочому режимі. Унаслідок чисельного експерименту було визначено втрати напору в таких перерізах:

від 1-1 до 2-2 – $\Delta h_1 = 3,65$ м (безлопатевого кільцевого дифузора, далі – зона 1);

від 2-2 до 3-3 – $\Delta h_2 = 6,93$ м (перевідний канал із поворотом на 180° , далі – зона 2);

від 3-3 до 4-4 – $\Delta h_3 = 42,21$ м (зворотний безлопатевого канал, далі – зона 3).

Зазначимо, що на підставі результатів чисельного дослідження продемонстровано, що найзначніші втрати спостерігаються в зоні 3-3–4-4. У попередніх зонах, де в базовому напрямному апараті є система лопаток, дослідження безлопатевого апарата продемонструвало низькі втрати. Саме це, на нашу думку, дозволяє спробувати перейти до безлопатевої схеми, усунувши спіральну ділянку і дифузори канал в напрямному апараті. Водночас безвідносно до ідеї створити від'ємну циркуляцію на вході до наступного РК лопатками зворотного каналу, їхнє проектування необхідне з погляду впорядкування потоку на цій ділянці та зниження втрат.

З метою зменшення цих втрат на основі розглянутої конструкції було розроблено і досліджено низку інших варіантів конструктивного виконання безлопатевого напрямного

²²¹ Гусак А. Г. Влияние момента скорости перед рабочим колесом лопатного насоса высокой быстроходности на форму его рабочей характеристики / А. Г. Гусак, В. А. Панченко // Материалы научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов инженерного факультета / отв. за вып. Л. И. Ганнич. – Сумы : СумГУ, 2002. – Вып. 4. – С. 136.

апарата, наведених у таблиці 5.2. Унаслідок цього встановлено значення втрат напору в перерізах напрямного апарата, наведених у таблиці 5.3 і діаграмі зміни втрат напору в безлопатевому напрямному апараті залежно від варіанта конструкції (рис. 5.27).

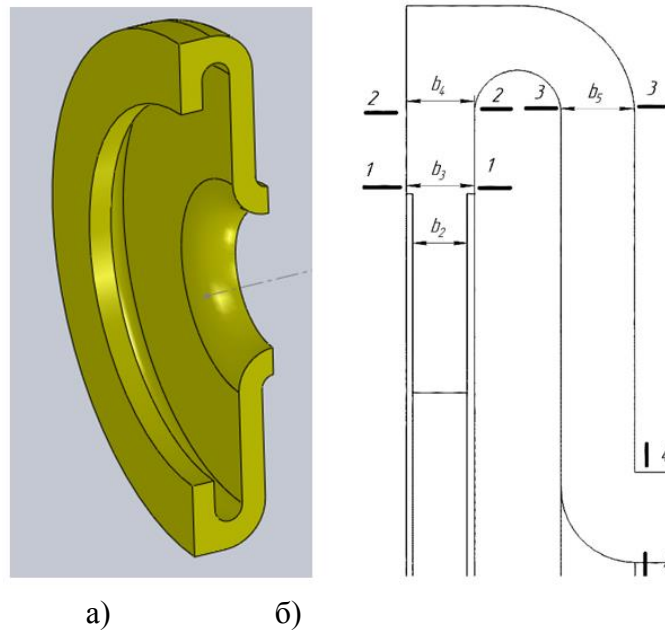
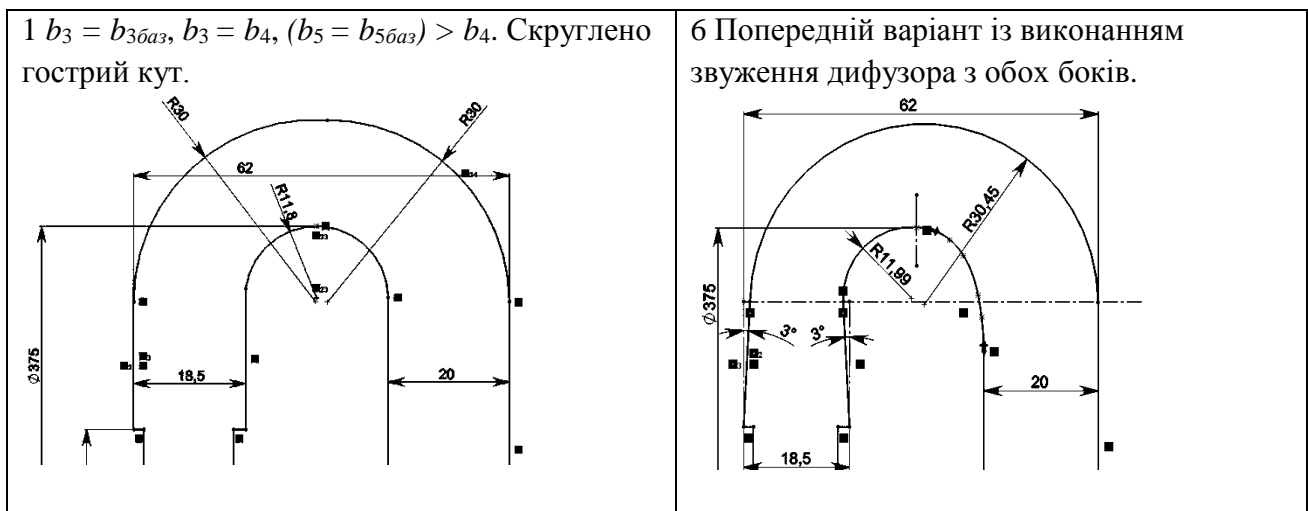


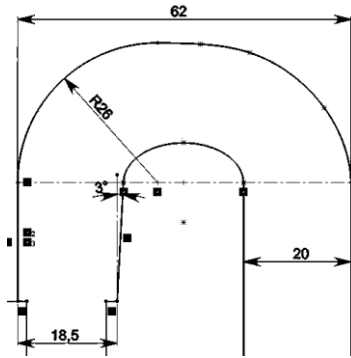
Рисунок 5.26 – Безлопатевий кільцевий напрямний апарат із поворотом течії на 180°:
а) рідинна модель; б) досліджувані перерізи

Серед 11 варіантів (1 базовий і 10 експериментальних) було вибрано як оптимальний, із погляду менших втрат напору в зоні 1 та 2 – варіант № 7. У зоні 3 та загалом сумарні втрати напору в зонах 1–3 – варіант № 9. На рисунку 5.28 наведено графіки зміни площ меридіанного перерізу досліджуваних конструкцій безлопатевого напрямного апарата. Звертає на себе увагу плавна форма графіка оптимального варіанта № 9. Зауважимо, що такої залежності зміни площ меридіанного перерізу рекомендують дотримуватися під час проектування усіх елементів проточної частини. А це, зі свого боку, опосередковано підтверджує правильність обрання варіанта № 9 як оптимального з погляду мінімуму втрат енергії.

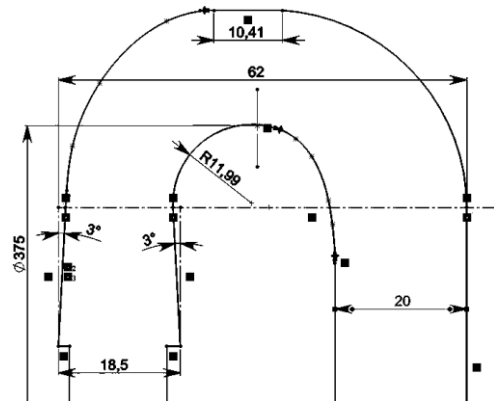
Таблиця 5.2



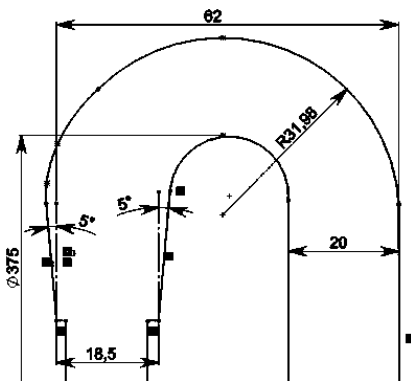
2 $b_3 = b_{36a3}$, $b_3 < b_4$, ($b_5 = b_{56a3}$) $> b_4$
 Виконано розширення дифузора з одного боку. Внутрішня стінка, що забезпечує поворот на 90° , є еліпсоїдною. Змінено радіус кривизни зовнішніх стінок потоку для збільшення площі поперечного перерізу.



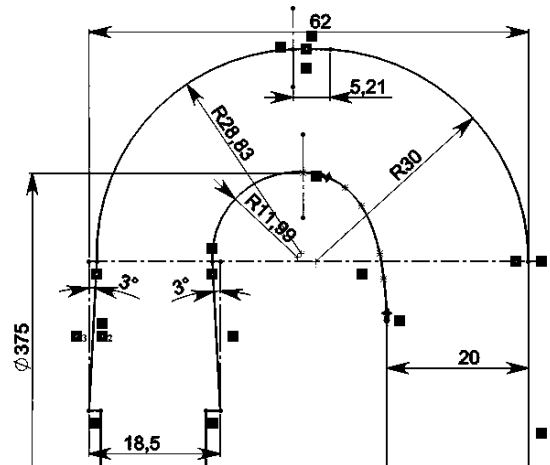
7 Попередній варіант із виконанням лінійної ділянки на повороті каналу на 90° із зовнішнього боку каналу.



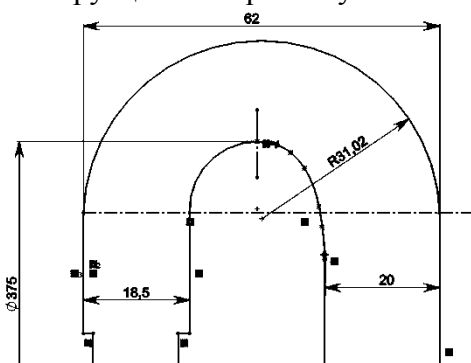
3 $b_3 = b_{36a3}$, $b_3 < b_4$, ($b_5 = b_{56a3}$) $> b_4$
 Виконано розширення дифузора з обох боків. Радіус кривизни внутрішніх і зовнішніх стінок постійний.



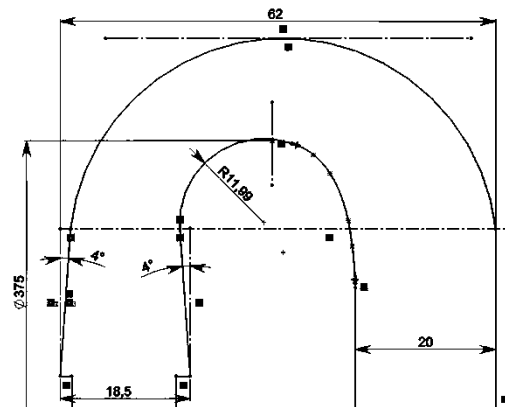
8 Попередній варіант – лінійна ділянка зменшена вдвічі.



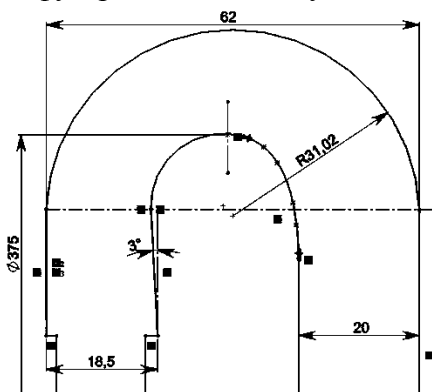
4 $b_3 = b_{36a3}$, $b_3 = b_4$, ($b_5 > b_{56a3}$) $> b_4$
 Після повороту каналу на 90° стінки каналу спрофільовані для поступового збільшення площі перерізу. (У всіх подальших конструкціях використовується такий варіант).



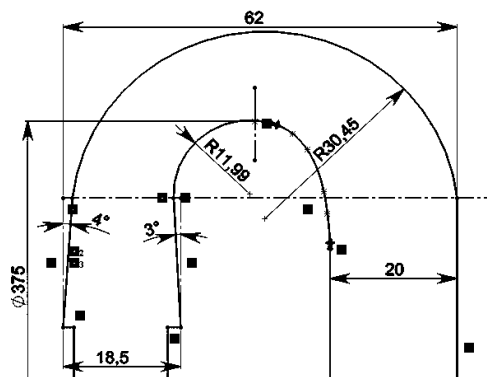
9 Кривизна внутрішніх і зовнішніх стінок повороту постійна, виконано збільшене звуження дифузора.



5 Попередній варіант із виконанням звуження дифузора з одного боку.



10 Попередній варіант, але з виконанням зменшеного звуження з одного боку дифузора.



Таблиця 5.3 – Порівняння втрат напору в досліджуваних перерізах

№ пор.	Δh_1 , м	Δh_2 , м	Δh_3 , м
1	3,65	6,93	42,21
2	2,76	6,18	40,82
3	3,78	4,57	47,16
4	5,14	3,22	45,38
5	3,09	4,78	47
6	3,16	4,47	45,95
7	2,46	5,44	46,83
8	2,6	6	44,92
9	2,55	6,35	40,69
10	4,39	4,4	44,09
11	4,09	4,28	45,23

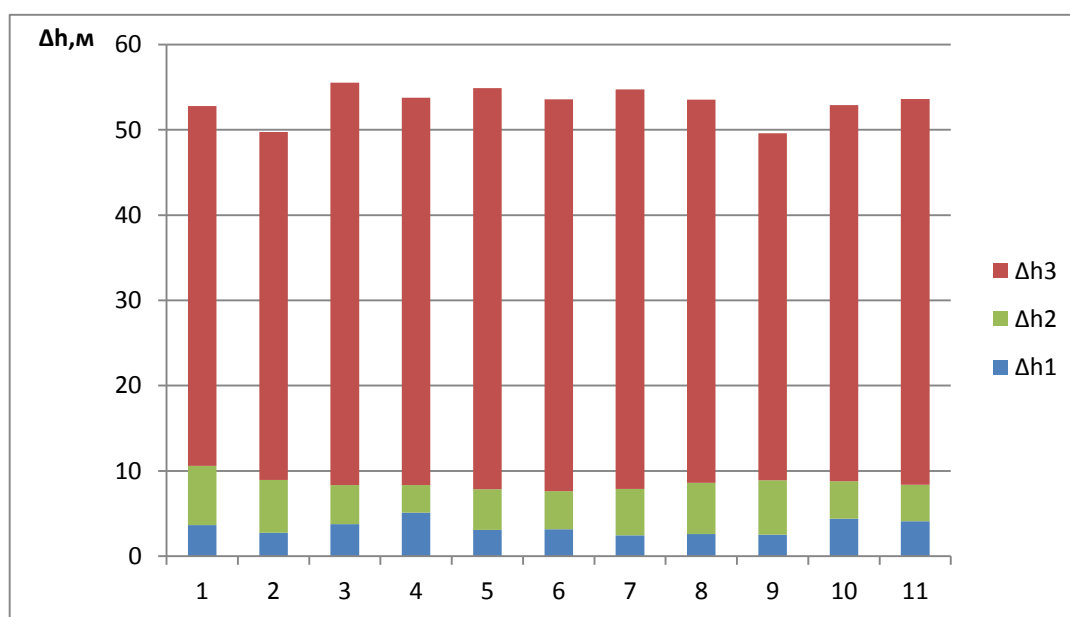


Рисунок 5.27 – Втрати напору в безлопатевому дифузорному апараті

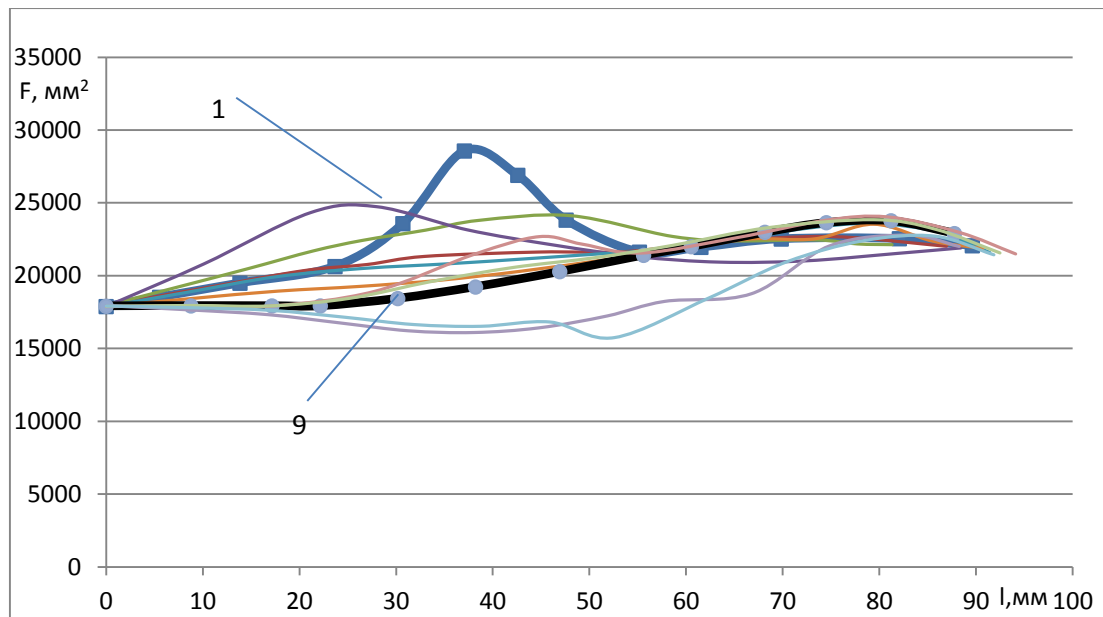


Рисунок 5.28 – Графік зміни площ меридіанного перерізу безлопатевого НА

Далі для обраного оптимального варіанта № 9 було проведено низку експериментів для отримання характеристики втрат від режиму роботи. Дослідження проводилося в діапазоні подач 0,7–1,2 від оптимального режиму. Результати досліджень наведені в таблиці 5.4 та на рисунку 5.29.

Для відображення графіка було застосовані такі безрозмірні коефіцієнти:

$$\bar{Q} = \frac{Q_i}{Q_o}; \quad \Delta \bar{h} = \frac{\Delta h_i}{\Delta h_o}, \quad (5.12)$$

де Q_o – подача на оптимальному режимі, м³/год;
 Δh_o – втрати напору на оптимальному режимі, м;
 Q_i – подача на розрахунковому режимі, м³/год;
 Δh_i – втрати напору на розрахунковому режимі, м.

Таблиця 5.4 – Втрати напору залежно від режиму роботи

Q , м ³ /год	Δh_{1-3} , м	Δh_{1-2} , м
130,9	51,68	5,95
149,6	54,71	9,83
187	54,73	7,91
205,7	54,03	7,04
224,4	50,33	6,34

На основі обраної оптимальної конструкції безлопатевого напрямного апарата за допомогою дослідження впливу установки різних варіантів лопаток зворотного каналу моделювалася від’ємна циркуляція на вході до робочого колеса наступного ступеня.

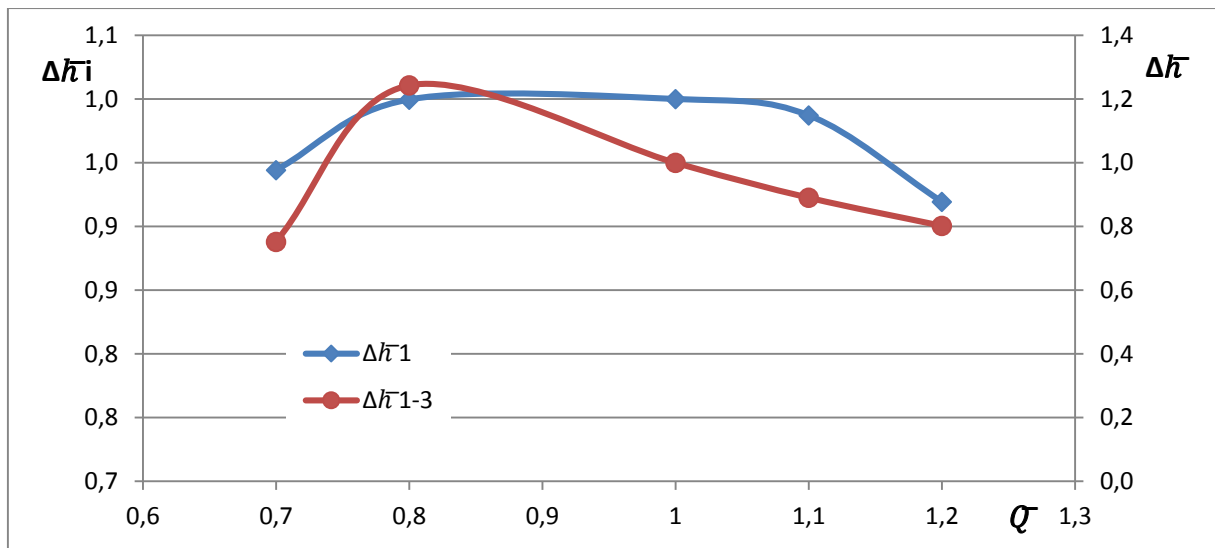


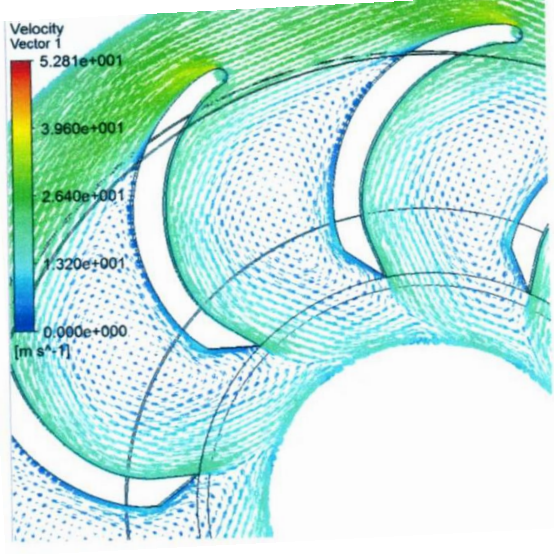
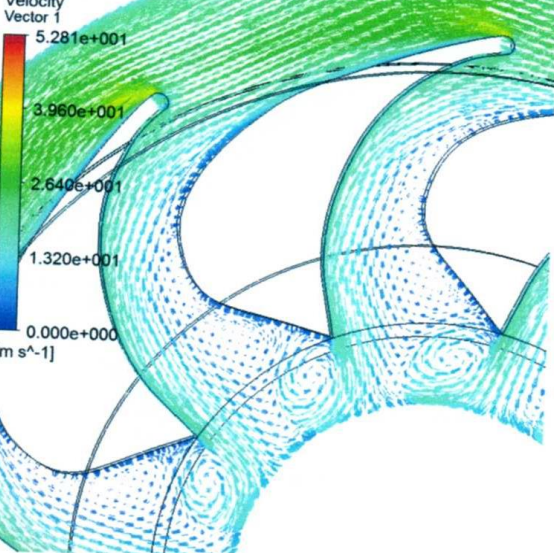
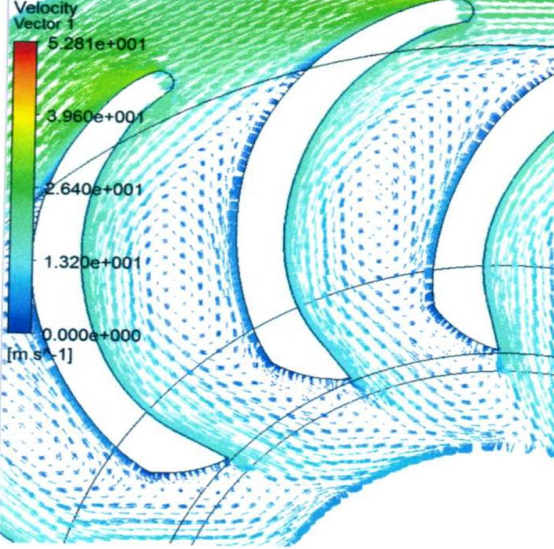
Рисунок 5.29 – Втрати напору залежно від режиму роботи

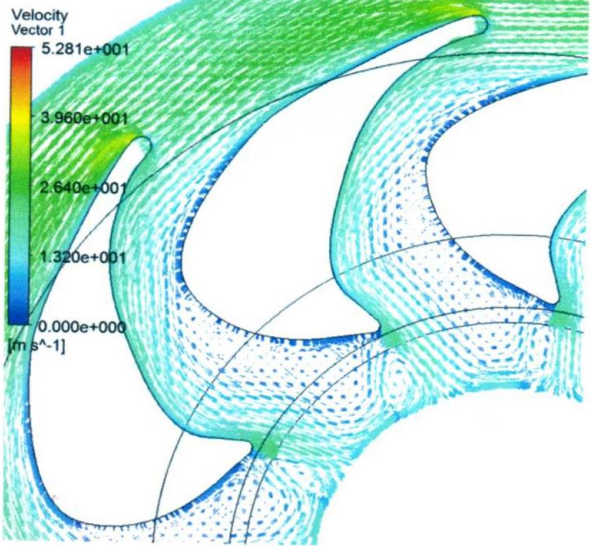
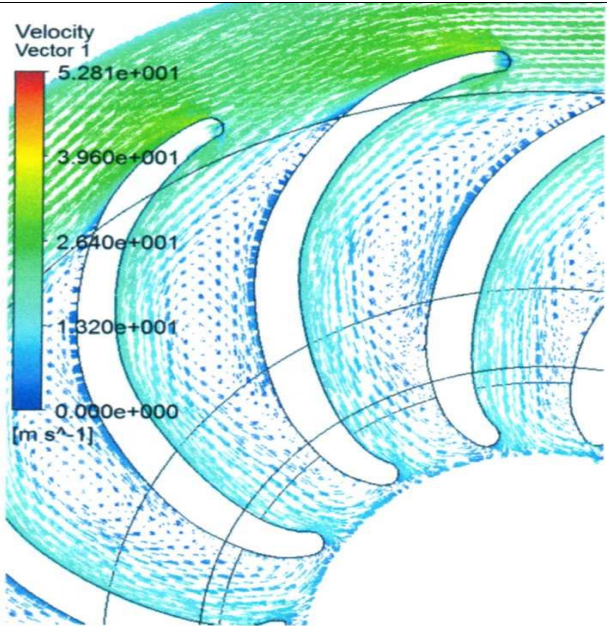
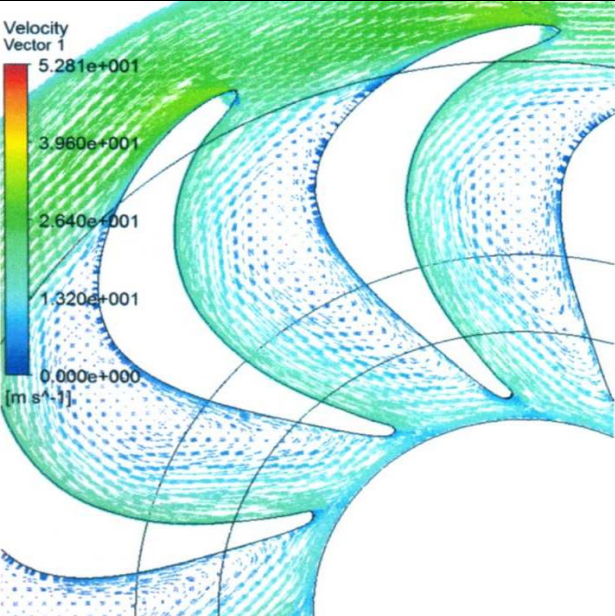
Насамперед були спроектовані і досліджені лопатки з базового напрямного апарата (рис. 5.30). Втрати енергії в такому апараті становили 25,7 м. У зворотних каналах, спостерігається велика нерівномірність течії в напрямку від робочого до тильного боку. Це явище і призводить до таких втрат. Спостерігається відхилення течії від радіального напрямку в бік позитивної циркуляції ($v_{ur} = 0,1 \text{ м}^2/\text{с}$). На основі цього напрямного апарата були розроблені декілька видів лопаток зворотного каналу, які забезпечують від'ємну циркуляцію на вході в робоче колесо і найменші втрати. Результати чисельних експериментів наведено в таблиці 5.5.

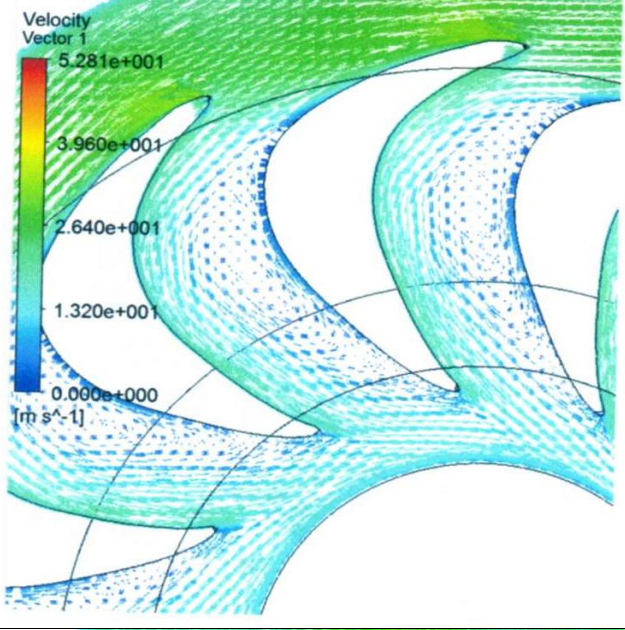
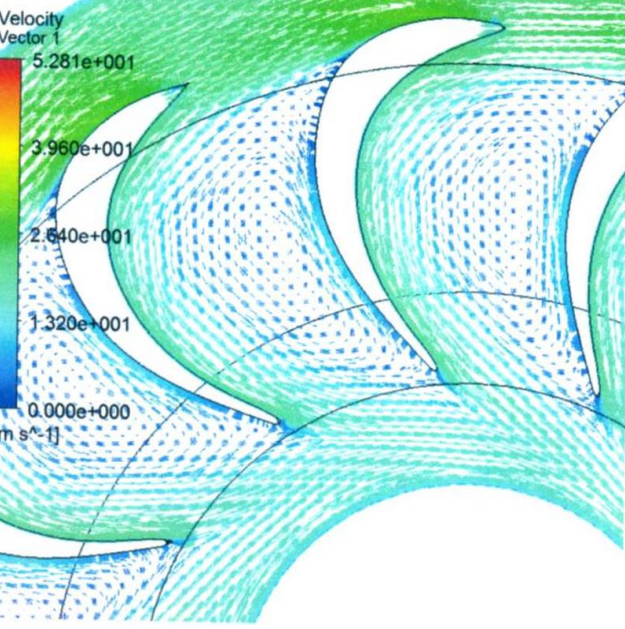
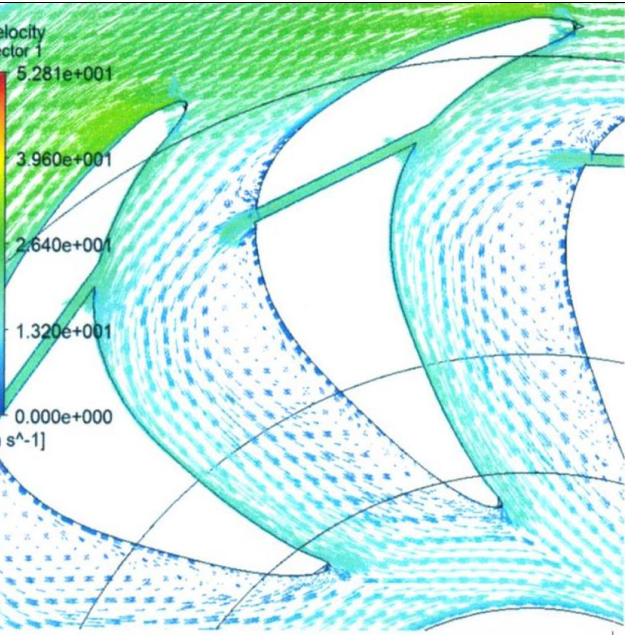


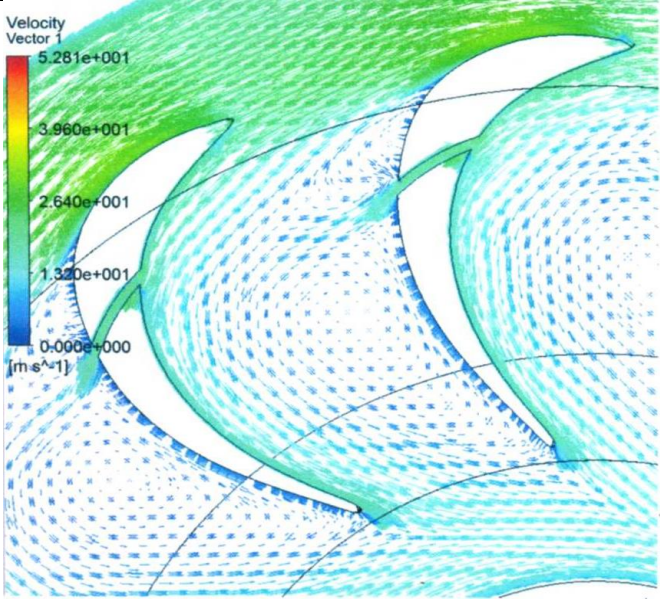
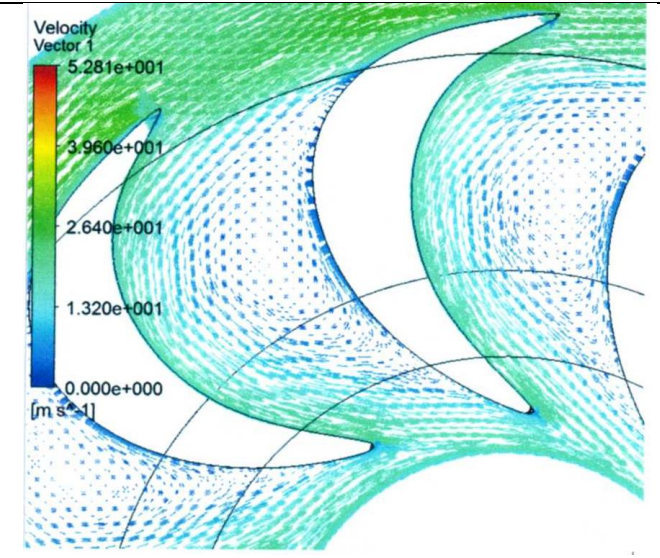
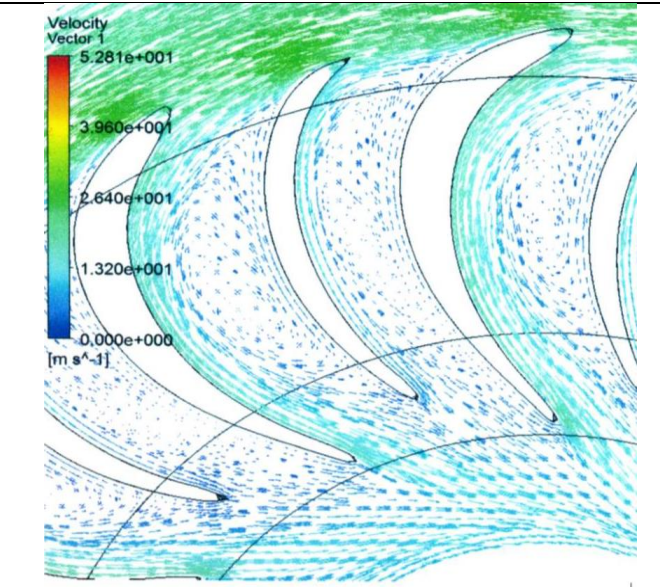
Рисунок 5.30 – Базові лопатки

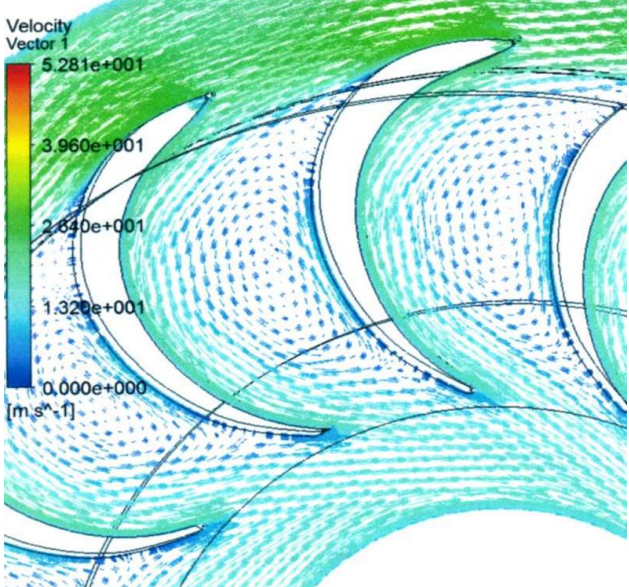
Таблиця 5.5

№	Лопатки зворотного каналу	Втрати енергії, м	v_{ur} на виході з апарата, м ² /с
1		27,74	-0,432
2		27,42	0,041
3		28,33	-0,243

4		27,61	-0,236
5		27,84	-0,055
6		25,97	-0,419

7		27,84	-0,512
8		24,4	-0,678
9		27,78	-0,477

10		27,8	-0,611
11		24,74	-0,674
12		29,32	-0,451

13		25,52	-0,82
----	---	-------	-------

Під час проектування лопатей зворотного каналу були використані різні методи зменшення втрат енергії у зворотних каналах. У першому варіанті була збільшена товщина лопаток і також було змінено напрямок течії з радіального на напрямок від'ємної циркуляції. Для зменшення зони вихору була розроблена конструкція лопаток зі збільшеною товщиною і змінено кут виходу (№ 2). Ця конструкція також не відповідає нашим вимогам. Оскільки порівняно з першим варіантом втрати енергії зменшилися на незначну величину, але водночас ця решітка не створює від'ємної циркуляції. У третьому варіанті було збільшено кількість і дещо змінено форму лопаток порівняно з першим. До того ж втрати енергії збільшилися, і зменшилося значення циркуляції. У четвертому варіанті порівняно з другим було змінено кут лопатей на виході, що призвело до зміни позитивної циркуляції на від'ємну. У п'ятому варіанті лопатева решітка була згущена, збільшена довжина лопаток і змінена форма на виході порівняно з третім варіантом. Це призвело до незначного зменшення втрат і до значного зменшення циркуляції.

Для шостого варіанта решітка була повністю змінена. Для зменшення зони вихору лопатки були потовщені і простягнулися на всю довжину зворотного каналу. Такі зміни сприяли зменшенню втрат. На виході створюється від'ємна циркуляція. У сьомому варіанті порівняно з шостим була зменшена довжина лопатей і змінена їхня товщина. Це призвело до збільшення втрат, але водночас значення циркуляції збільшилося. У восьмому варіанті повністю була змінена форма лопаток. Це призвело до зменшення втрат і до збільшення вихідної циркуляції порівняно з попередніми варіантами.

Дев'ятий і десятий варіанти – це модифікації сьомого і восьмого варіантів відповідно. У дев'ятому варіанті втрати зменшилися на незначну величину і циркуляція також зменшилася. У десятому варіанті втрати зросли, а вихідна циркуляція зменшилася. Ці результати свідчать про те, що дев'ятий і десятий варіанти потребують доопрацювання.

Для проектування одинадцятого варіанта за основу був взятий сьомий варіант. Було змінено форму лопатей, їхню кількість і кут на виході. Також збільшена довжина лопаті і збільшений кут атаки на вході в канал. За такої зміни конструкції втрати зменшилися, а циркуляція на виході збільшилась.

Під час проектування дванадцятого варіанта була змінена форма лопатей і додана допоміжна лопать, яка розміщується між двома основними. Вона має дещо менші розміри

порівняно з основними. Ці зміни призвели до зростання втрат і зменшення циркуляції на виході. Такі результати свідчать проте, що ця конструкція також потребує доопрацювання.

Під час проектування тринадцятого варіанта було змінено восьмий варіант: збільшено кут атаки на вході. За такої зміни втрати збільшилися. Циркуляція на виході збільшилася на значну величину.

На підставі отриманих результатів – найкраща форма лопатей зворотного каналу у восьмому варіанті. Така лопатева решітка забезпечує найменші втрати і створює значну циркуляцію на виході з напрямного апарата.

Після цього були проведені дослідження впливу вхідної циркуляції на параметри робочого колеса, які проводилися за робочого режиму. Результати подані на рисунку 5.31 і виражені у відсотках порівняно з базовим варіантом.

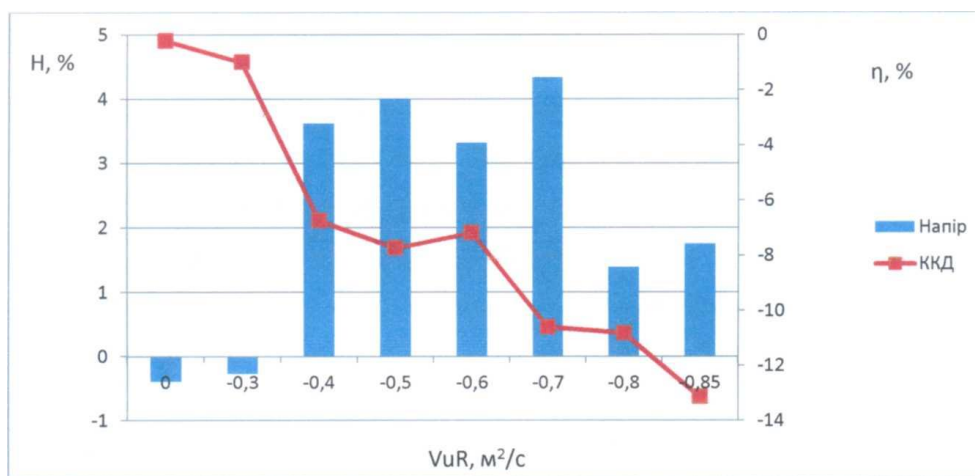


Рисунок 5.31 – Залежність напору і ККД робочого колеса від вхідної циркуляції

З від’ємної циркуляції спостерігається незначне збільшення напору робочого колеса 3–4 %. Водночас ККД робочого колеса зменшується на 6–12 %. Таке зменшення ККД пов’язане зі збільшенням взаємодії потоку рідини з лопатями робочого колеса.

З цього дослідження можна зробити певні висновки. Маємо лопатеву решітку для зворотного каналу безлопатевого напрямного апарата, яка забезпечує найменші втрати і створює на виході від’ємну циркуляцію. Циркуляція на виході із напрямного апарата залежить від кута лопатей. Значні втрати енергії в безлопатевому напрямному апараті виникають внаслідок того, що витратна швидкість набагато менша за колову. Це ми можемо спостерігати на всіх картинах течії у зворотному каналі.

Оптимальні значення інтегральних характеристик ступеня отримані за значень вхідної циркуляції $v_{ur} = -0,4-0,6 \text{ м}^2/\text{с}$. За таких значень отримано приріст напору і незначне падіння ККД робочого колеса. Водночас потрібно зазначити, що дослідження проводилися за незмінної геометрії робочого колеса. Припускаємо, що, змінивши геометрію лопатей робочого колеса під від’ємну циркуляцію, ми зможемо отримати більш прийнятні результати.

Загалом, на нашу думку, дослідження в цьому напрямку щодо покращання параметрів напору і ККД під час застосування від’ємної циркуляції на вході до РК мають потенціал і повинні бути продовжені.

5.6 Резюме розділу V

Можливість застосування принципу контрроторності в насособудуванні ґрунтується на ідеї використання від'ємної закрутки на вході до робочого органа. За результатами чисельних досліджень як осьова, так і відцентрова контрроторні системи забезпечують істотний приріст напору за неминучого падіння ККД. Причому в останньому разі напір можна збільшити до 182 % порівняно з одиночним робочим колесом. Водночас конструкція і система привода осьового контрроторного насоса уявляється істотно простішою, ніж відцентрового, і опрацьована вже до конкретних конструктивних пропозицій.

Ідея відцентрового контрроторного комплексу, без сумніву, через привабливість і перспективність, потребує глибокого конструктивного опрацювання у зв'язку з передбачуваним високим рівнем втрат у ступені (насамперед об'ємних). Як пояснення причин безпрецедентного зростання напору в цій системі пропонуємо ідею про наявність у просторі між ротором і контрротором вихрової зони.

ВИСНОВКИ

Очікувана в недалекому майбутньому зміна технологічних укладів змушує представників багатьох галузей, зокрема і насособудування, вести пошук принципово нових можливостей їхнього розвитку. Поданий аналіз і результати досліджень продемонстрували, що галузь промисловості, що розробляє і виробляє технічні системи, які передають енергію рідині (насамперед воді), має у своєму розпорядженні достатню кількість нових потенційних принципів реалізації насосного ефекту. Багато в чому це ті принципи, які здійснюються в навколишньому природному середовищі на мікрорівні. Такий підхід відображає особливості нового VI технологічного укладу.

Заглядаючи у віддалене (на сьогодні, зокрема і технологічний погляд) майбутнє, не можна не задаватися питанням про те, якими будуть сфери промислового виробництва, побутового обслуговування, інфраструктури тощо у зв'язку з неминучим переходом до нанотехнологій і широким освоєнням і впровадженням енергетичних комплексів на поновлюваних джерелах енергії. Роблячи висновок із багатьох тенденцій, які окреслюються вже сьогодні, ці зміни повинні бути принциповими і фундаментальними. Однак поки запасів традиційних (невідновлюваних) енергоресурсів буде достатньо для задоволення потреб і нинішнього способу буття людства, такі зміни матимуть поступовий і локальний характер. Це означає, що звичні нам сьогодні технічні системи також потребуватимуть нових можливостей своєї модернізації та розвитку, пошуку і впровадження нових робочих процесів з урахуванням філософії VI технологічного укладу.

Усе це зумовило діалектику побудови і відповідного наповнення цієї роботи, досить актуальну і своєчасну, на думку автора. Звісно, у межах однієї книги неможливо розкрити всі аспекти поставлених питань і запропонованих рішень. На цьому етапі основним є завдання імпульсу для нових пошуків, пропозицій і досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. А. с. № 214725. Осевой многоступенчатый вентилятор / Г. М. Водяник, П. С. Карас-тан, В. С. Крутиков. – БИ, 1968. – № 12.
2. Алексеев Г. Н. Энергия и энтропия / Г. Н. Алексеев. – Москва : Знание, 1978. – 192 с.
3. Алексеев Г. Н. Прогнозное ориентирование развития энергоустановок / Г. Н. Алексеев. – Москва : Наука, 1978. – 200 с.
4. Алексеев Г. Н. Энергоэнтропика / Г. Н. Алексеев. – Москва : Знание, 1983. – 196 с.
5. Алексенко О. В. Розробка методів розрахунку та дослідження робочого процесу лопатевих насосів : дисертація на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук / О. В. Алексенко. – Суми : СумДУ, 2005. – 156 с.
6. Альтшуллер Г. С. Творчество как точная наука / Г. С. Альтшуллер. – 2 изд., доп. – Петрозаводск : Скандинавия, 2004.
7. Анфимов М. И. Редукторы. Конструкции и расчет : альбом / М. И. Анфимов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1993. – 284 с.
8. Артюшков Л. С. Судовые движители : учебник / Л. С. Артюшков, А. Ш. Ачкинадзе, А. А. Русецкий. – Ленинград : Судостроение, 1988. – 296 с.
9. Базаров И. П. Термодинамика / И. П. Базаров. – Москва : Высшая школа, 1991. – 376 с.
10. Байбаков О. В. Вихревые гидравлические машины / О. В. Байбаков. – Москва : Машиностроение, 1981. – 197 с.
11. Башта Т. М. Гидроприводы и гидропневмоавтоматика / Т. М. Башта. – Москва : Машиностроение, 1972. – 320 с.
12. Белл Д. Грядущее постиндустриальное общество. Опыт социального прогнозирования / Д. Белл. – Москва : Академия, 1999.
13. Бережной А. С. Анализ возможности утилизации потенциальной энергии давления сжатых газов и паров / А. С. Бережной, С. М. Ванеев // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів інженерного факультету : конференція, присвячена Дню науки України та 60-річчю СумДУ. – Суми : СумДУ, 2008. – Ч. I. – С. 49.
14. Бережной А. С. Совершенствование рабочих характеристик струйно-реактивного пневмоагрегата на основе уточнения модели рабочего процесса : диссертация на получение научной степени канд. техн. наук / А. С. Бережной ; науч. рук. С. М. Ванеев. – Сумы : СумГУ, 2014. – 157 с.
15. Больцман Л. Э. Избранные труды / под. ред. редактор Л. С. Шлак. – Москва : Наука, 1984. – 586 с.
16. Большая советская энциклопедия (БСЭ) : в 30 т. – Москва : Сов. энциклопедия, 1970–1978.
17. Борисенко А. А. Природа информации : монография / А. А. Борисенко. – Сумы : СумГУ, 2006. – 212 с.
18. Борисенко А. А. Теория систем. Информационный подход : монография / А. А. Борисенко. – Сумы : СумГУ, 2010. – 210 с.
19. Боровский Б. И. Энергетические параметры и характеристики высокооборотных лопатных насосов / Б. И. Боровский. – Москва : Машиностроение, 1989. – 184 с.

20. Бриллюэн Л. Наука и теория информации / под ред. В. Д. Козлова. – Ленинград : Гос. изд-во физ-мат. литературы, 1960. – 391 с.
21. Бродянский В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
22. Брусиловский И. В. Некоторые особенности вентиляторов встречного вращения / И. В. Брусиловский, В. И. Егоров // Вентиляторы общепромышленного назначения. – Москва : Изд. Московского дома научно-технической пропаганды, 1965. – С. 146–154.
23. Брусиловский И. В. Осевой вентилятор встречного вращения / И. В. Брусиловский, И. В. Клепапов, Е. М. Левин // В сб.: Промышленная аэродинамика. – Москва : Машиностроение. – 1973. – Вып. 29. – С. 112–122.
24. Брусиловский И. В. Аэродинамика осевых вентиляторов / И. В. Брусиловский. – Москва : Машиностроение, 1984. – 240 с.
25. Брусиловский И. В. Аэродинамические схемы и характеристики осевых вентиляторов ЦАГИ : справочное пособие / И. В. Брусиловский. – Москва : Недра, 1978. – 198 с.
26. Брусиловский И. В. Аэродинамический расчет осевых вентиляторов / И. В. Брусиловский. – Москва : Машиностроение, 1986. – 288 с.
27. Бурдаков А. А. Центробежные насосы / А. А. Бурдаков. – Ленинград : Госмашметиздат, 1932. – 196 с.
28. Бурлака В. Б. Влияние момента скорости потока перед рабочим колесом на местоположение оптимального режима работы лопастного насоса / В. Б. Бурлака, А. Г. Гусак, А. А. Евтушенко // Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Машиностроение. – 2000. – № 38, Т. 2. – С. 243–248.
29. Бутиков Е. И. Физика в примерах и задачах / Е. И. Бутиков, А. А. Быков, А. С. Кондратьев. – Москва : Наука, 1989. – 464 с.
30. Ванеев С. М. Турбодетандерный агрегат на базе вихревой турбины для утилизации энергии давления топливного газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов / С. М. Ванеев, М. А. Волошин, А. А. Яценко // Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів фак-ту технічних систем та енергоефективних технологій, м. Суми, 23–26 квітня 2013 р. : у 2 ч. / ред. кол.: О. Г. Гусак, В. Г. Євтухов. – Суми : СумДУ, 2013. – Ч. 2. – С. 46.
31. Васютинский Н. А. Золотая пропорция / Н. А. Васютинский. – Москва : Молодая гвардия, 1990. – 238 с.
32. Вернадский В. И. Научная мысль как планетное явление / В. И. Вернадский. – Москва : Наука, 1991. – 271 с.
33. Ветроэнергетика / под ред. Д. де Рензо : пер. с англ. ; под ред. Я. И. Шефтера. – Москва : Энергоатомиздат, 1982. – 272 с.
34. Водяник Г. М. Разработка и исследование трехступенчатых вентиляторов встречного вращения для проветривания длинных тупиковых выработок / Г. М. Водяник, В. С. Крутиков, Л. С. Нарастай // В сб.: Совершенствование проветривания шахт. – Новочеркасск : Изд. НПИ, 1972. – С. 136–137.
35. Воеводская Е. Н. Вопросы проектирования и эффективность использования соосных гребных винтов на крупнотоннажных судах / Е. Н. Воеводская // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. – 1975. – № 285. – С. 112–122.
36. Волков Н. И. Аэродинамика ортогональных ветродвигателей / Н. И. Волков. – Сумы : Мрія-1, 1996. – 198 с.

37. Герман, В. Ф. Свободновихревые насосы : учеб. пособие / В. Ф. Герман, И. А. Ковалев, А. И. Котенко ; под общ. ред. А. Г. Гусака. – 2-е изд., доп. и перераб. – Сумы : СумГУ, 2013. – 159 с.
38. Гетало В. В. Совершенствование систем редуцирования давления путем применения струйно-реактивных пневмоагрегатов : диссертация на соискание науч. степени канд. техн. наук / В. В. Гетало ; науч. рук. С. М. Ванеев. – Сумы : СумГУ, 2014. – 150 с.
39. Голубев А. И. Лабиринтно-винтовые насосы и уплотнения для агрессивных сред / А. И. Голубев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1981. – 112 с.
40. Горгиджаниян С. А. Погружные насосы для водоснабжения и водопонижения / С. А. Горгиджаниян, А. И. Дягилев. – Ленинград : Машиностроение, 1968. – 112 с.
41. ГОСТ 17398-72 Насосы. Термины и определения. – Москва : Гос. ком. СССР по стандартам, 1978. – 36 с.
42. Гравитационные волны обнаружены! // Вселенная, пространство, время. – 2016. – № 2 (139).
43. Гусак А. Г. Влияние момента скорости перед рабочим колесом лопастного насоса высокой быстроходности на форму его рабочей характеристики / А. Г. Гусак, В. А. Панченко // Материалы научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов инженерного факультета / отв. за вып. Л. И. Ганнич. – Сумы : СумГУ, 2002. – Вип. 4. – С. 136.
44. Гусак А. Г. К вопросу о влиянии момента скорости потока перед р.к. на напорную и энергетическую характеристики осевого насоса / А. Г. Гусак, В. Б. Бурлака // Материалы научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов инженерного факультета. – Сумы : СумГУ, 2000. – С. 102–104.
45. Двигатель для наносубмарины // Наука и жизнь. – 2016. – № 5. – С. 11.
46. Дерягин Б. В. Поверхностные силы / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев, В. М. Муллер. – Москва : Наука, 1985. – 398 с.
47. Детали машин : учебник / Л. А. Андриенко, Б. А. Байков, И. К. Ганулич и др. ; под ред. Ряховского. – Москва : Московский государственный технический ун-т им. Баумана, 2002. – 544 с.
48. Дзидзигури А. А. Исследование некоторых вопросов аэродинамики осевых двухступенчатых вентиляторов встречного вращения / А. А. Дзидзигури, С. В. Мачарашвили // Труды института горной механики, разработки месторождений полезных ископаемых и физики взрыва. АН Груз. ССР. – Тбилиси, 1964. – Т. IV – С. 483–492.
49. Диксон С. Л. Механика жидкостей и газов. Термодинамика турбомашин / С. Л. Диксон ; ред. З. М. Рябкова. – Москва : Машиностроение, 1981. – 213 с.
50. ДСТУ 3063-95 Насоси. Класифікація. Терміни та визначення. – Київ : Держстандарт України 1995.
51. Духин С. С. Электрофорез / С. С. Духин, Б. В. Дерягин. – Москва : Наука, 1976.
52. Дьяконов И. М. Пути истории. От древнего человека до наших дней / И. М. Дьяконов – Москва : Восточная литература, 1995.
53. Евтушенко, А. А. Задача создания средств ведения расчетного эксперимента в насосостроении / А. А. Евтушенко // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці : праці II Української науково-технічної конференції, 27–30 травня 1997 року. – Черкаси : ЧІТІ, 1998. – С. 45–50.

54. Евтушенко А. А. Развитие теории рабочего процесса, практики конструирования и применения динамических насосов : монографія / А. А. Евтушенко. – Сумы : СумГУ, 2013. – 515 с.
55. Евтушенко А. А. Стандартизация выбора параметров вновь создаваемых насосов общепромышленного назначения / А. А. Евтушенко // Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты: теория, расчет, конструирование : тем. сб. науч. трудов / отв. ред. И. А. Ковалев. – Киев : ИСДО, 1994. – С. 20–28.
56. Ёкота Ю. Субмарины-самоубийцы. Секретное оружие Императорского флота Японии. 1944–1947 гг. / Ю. Ёкота ; пер. В. Д. Кайдалова. – Москва: Центрполиграф, 2005. – 317 с.
57. Євтушенко А. О. Гідродинамічні машини і передачі : навчальний посібник / А. О. Євтушенко. – Суми : СумДУ, 2005. – 255 с.
58. Злотин Б. Л. Законы развития и прогнозирование технических систем : методические рекомендации / Б. Л. Злотин, А. В. Зусман. – Кишинев : Картя Молдовеняскэ; Прогресс, 1989. – 114 с.
59. Иванов В. В. Инновационная парадигма XXI / В. В. Иванов. – Москва : Наука, 2015.
60. Иванов В. В. Перспективный ТУ: возможности, риски, угрозы // Экономические стратегии. – 2013. – № 4. – С. 2–5.
61. Иванов В. В. Стратегия прорыва: технологии, образование, наука / В. В. Иванов, Г. Г. Малинецкий. – Москва : URSS-ЛЕНАНД, 2016. – 300 с.
62. Иванов О. П. Аэродинамика и вентиляторы : учебник / О. П. Иванов, В. О. Мамченко. – Ленинград : Машиностроение, 1986. – 280 с.
63. Казанджан П. К. Теория авиационных двигателей. Теория лопаточных машин : учебник / П. К. Казанджан, Н. Д. Тихонов, А. К. Янко ; под ред. П. К. Казанджана. – Москва : Машиностроение, 1983. – 217 с.
64. Казнієнко Д. В. Комбінований відцентрово-доцентровий ступінь динамічного насоса лопатевого типу : дисертація... канд. техн. наук / Д. В. Казнієнко ; наук. кер. І. О. Ковальов. – Суми : СумДУ, 2014. – 131 с.
65. Калиниченко П. М. Некоторые уточнения уравнений гидромеханики и теории лопастных насосов / П. М. Калиниченко. – Киев : ИСМО, 1999. – 240 с.
66. Каминер А. А. Гидромеханика в инженерной практике / А. А. Каминер, О. М. Яхно. – Киев : Техника, 1962. – 296 с.
67. Капица С. П. Феноменологическая теория роста населения Земли // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166. – С. 63–80.
68. Кириллин В. А. Страницы истории науки и техники / В. А. Кириллин. – Москва : Наука, 1986. – 512 с.
69. Климонтович Ю. Л. Турбулентное движение и структура хаоса: Новый подход к статистической теории открытых систем / Ю. Л. Климонтович. – 4-е изд. – Москва : URSS, 2014. – 328 с.
70. Климонтович Ю. Л. Турбулентное движение и структура хаоса. Новый подход к статической теории открытых систем / Ю. Л. Климонтович. – Москва : Наука, 1990. – 320 с.
71. Клочков В. В. Управление развитием «зеленых» технологий: экономические аспекты : монография / В. В. Клочков, С. В. Ратнер // Ин-т проблем упр. им. В. А. Трапезникова ; Рос. акад. наук. – Москва : ИПУ РАН, 2013. – 292 с.

72. Ковалев И. А. Теоретическое описание работы контрроторной лопастной системы центробежного насоса / И. А. Ковалев, А. В. Ратушный, Н. В. Семёнова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія Математичне моделювання в техніці та технологіях. – 2016. – № 16 (1188). – С. 122–127.
73. Ковалёв И. А. Исследование путей повышения экономичности ступени центробежного насоса низкой удельной быстроходности : диссертация на соискание научной степени канд. технических наук / И. А. Ковалёв ; науч. рук. Д. Я. Алексапольский. – Харьков : ХПИ, 1970. – 195 с.
74. Ковалев И. А. О возможности изменения энергии жидкости на микроуровне / И. А. Ковалев // Тезисы докладов научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов. – Сумы : СумГУ, 1996. – С. 5.
75. Ковалев И. А. Постановка задачи изменения энергии жидкости путем энергопередачи на микроуровне / И. А. Ковалев // Гидромеханика в инженерной практике : научно-техническая конференция. – Киев, 1996.
76. Ковалев И. А. Теория кинетической самоорганизации структурированной жидкости / И. А. Ковалев, А. И. Олемской, А. В. Хоменко // Вісник Сумського державного університету. – 1995. – № 3. – С. 3–7.
77. Ковалёв И. А. Исследование путей повышения экономичности ступени центробежного насоса низкой быстроходности ($n_s = 40$) : автореферат... канд. техн. наук, спец.: 05.193 – гидравлические машины / И. А. Ковалёв. – Харьков : ХПИ им. В. И. Ленина, 1970. – 22 с.
78. Ковальов І. О. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи : навч. посіб. / І. О. Ковальов, О. В. Ратушний. – Суми : СумДУ, 2016. – 250 с.
79. Ковальов І. О. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії України : навч. посіб. / І. О. Ковальов, О. В. Ратушний. – Суми : СумДУ, 2016. – 201 с.
80. Ковалев Н. Н. Гидротурбины : конструкции и вопросы проектирования / Н. Н. Ковалев. – 2-е изд., доп. и перераб. – Ленинград : Машиностроение, 1971. – 584 с.
81. Ковальчук А. І. Електромеханічна система автономної безконтактної контрроторної вітроелектроустановки з вертикальною віссю обертання : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / А. І. Ковальчук ; НТУ «Львівська політехніка». – Львів, 2015. – 20 с.
82. Ковальчук А. І. Трансформатор для контрроторної вітроустановки з вертикальною віссю обертання / А. І. Ковальчук // Електроенергетичні та електромеханічні системи. – Львів : Вид-во Націон. ун-ту «Львівська політехніка», 2012. – Вип. 736. – С. 59–63.
83. Кожаева Ю. П. Плазма как сурфактант: новый капиллярный эффект и новый эффект смачивания, индуцированные электроразрядной плазмой / Ю. П. Кожаева, А. Е. Дубинов, В. А. Любимцева, В. Д. Селемир // Материалы 16-й Научно-технической конференции «Молодёжь в науке», 25–27 октября 2017 года. – Саров : РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2018.
84. Коробков В. А. Преобразование энергии океана / В. А. Коробков. – Ленинград : Судостроение, 1986. – 280 с.
85. Крутиков В. С. Исследование аэродинамической схемы трехступенчатого вентилятора встречного вращения : диссертация на соискание научной степени канд. технических наук / В. С. Крутиков. – Новочеркасск, 1970. – 135 с.
86. Культурология : учебник / под ред.: Ю. Н. Солонина, М. С. Карга. – Москва : Юрайт-Издат, 2005. – 566 с.
87. Курдюмов С. П. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем / С. П. Курдюмов, Е. Н. Князева. – Москва : Наука, 1994. – 236 с.

88. Лаврентьев, В. М. Расчет парных соосных винтов / В. М. Лаврентьев // Труды ЦНИИморфлота. – 1968. – № 89. – С. 22–48.
89. Лалетин К. Н. Практическая аэродинамика вертолета Ка-26 / К. Л. Лалетин. – Москва : Транспорт, 1974. – 192 с.
90. Лаплас П. С. Изложение системы мира / под. ред. В. М. Васильева и А. А. Михайлова. – Москва : Наука, 1982. – 376 с.
91. Лібець О. С. Проектування осевого контрроторного ступеня : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра / О. С. Лібець ; наук. керівник О. А. Матвієнко. – Суми : СумДУ; ф-т ТеСЕТ, 2015. – 102 с.
92. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа : учебн. для вузов – 7-е изд. / Л. Г. Лойцянский. – Москва : Дрофа, 2003. – 840 с.
93. Ломакин А. А. Центробежные и осевые насосы / А. А. Ломакин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва – Ленинград : Машиностроение, 1966. – 364 с.
94. Ломанович В. А. Химотроника / В. А. Ломанович. – Москва : Знание, 1965. – 34 с.
95. Лопастные насосы : справочник / под общ. ред.: В. А. Зимницкого, В. А. Умова. – Ленинград : Машиностроение, 1986. – 334 с.
96. Малюшенко В. В. Расчет и профилирование осевого насоса / В. В. Малюшенко. – Харьков : ХПИ, 1982. – 51 с.
97. Максимов Н. А. Двигатели самолетов и вертолетов: основы устройства и летной эксплуатации / Н. А. Максимов, В. А. Секистов. – Москва : Воениздат, 1977. – 343 с.
98. Малинецкий Г. Г. Синергетика и прогнозы будущего наука / Г. Г. Малинецкий, С. П. Курдюмов, С. П. Капица. – Москва : УРСС, 2003. – 288 с.
99. Малышев Н. А. Ветроэнергетические станции большой мощности / Н. А. Малышев, В. М. Лятхер // Гидротехническое строительство. – 1983. – № 12. – С. 38–44.
100. Мамедов Б. Ш. Единая теория движителей на непрерывных потоках: краткая теория контрвращающихся гребных винтов / Б. Ш. Мамедов. // Резервы производства. – 2013. – № 3/2 (11). – С. 30–38.
101. Матвієнко О. А. Малогабаритний осевий ступінь свердловинного насоса з підвищеною енергетичною ефективністю : дисертація на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук / О. А. Матвієнко ; наук. кер. О. Г. Гусак. – Суми : СумДУ, 2013. – 148 с.
102. Математический энциклопедический словарь / гл. ред. Ю. В. Прохоров. – Москва : Сов. энциклопедия, 1988. – 847 с.
103. Мельник Л. Г. Теория развития систем : монографія / Л. Г. Мельник. – Суми : Университет. кн., 2017. – 416 с.
104. Мирер С. А. Механика космического полёта. Орбитальное движение / С. А. Мирер. – Москва : Изд-во МГТУ, 2013. – 106 с.
105. Михайлов А. К. Лопастные насосы. Теория, расчет и конструирование / А. К. Михайлов, В. В. Малюшенко. – Москва : Машиностроение, 1977. – 288 с.
106. Назаретян А. П. Цивилизационные кризисы в контексте универсальной истории / А. П. Назаретян. – Москва : ПЕР СЭ, 2001.
107. Наноботы спешат на помощь // Открытия и гипотезы. – 2015. – № 2. – С. 20.
108. Николис Д. Динамика иерархических систем. Эволюционное представление / Дж. Николис. – Москва : Мир, 1989. – 488 с.
109. Нобелевские премии 2016 // Открытия и гипотезы. – 2016. – № 11. – С. 2–5.

110. ОАО Сумський завод «Насосенергомаш». 60 років. – Суми : Слобожанщина, 2009. – 187 с.
111. Общая химия / Н. Л. Глинка ; под ред.: В. А. Попкова, А. В. Бабкова. – 18-е изд., перераб. и доп. – Москва : Юрайт, 2013. – 898 с.
112. Овсепян В. М. Гидравлический таран и таранные установки: теория, расчет и конструкции / В. М. Овсепян ; ред. М. Н. Журавлева. – Москва : Машиностроение, 1968. – 124 с.
113. Овсянников Б. В. К вопросу о передаче энергии в центробежных и осецентрированных насосах циркуляционными и кориолисовыми силами / Б. В. Овсянников, Б. И. Боровский // Известия вузов. Авиационная техника. – 1966. – № 4. – С. 107–113.
114. Ольштынський П. Л. Учет особенностей рабочего процесса направляющего аппарата для повышения технического уровня центробежного насоса : диссертация на соискание научной степени канд. техн. наук / П. Л. Ольштынський ; науч. рук. И. Б. Твердохлеб. – Сумы : СумГУ, 2016. – 166 с.
115. Панов А. Д. Кризис планетарного цикла Универсальной истории // Вселенная, пространство, время. – 2004. – № 2 (3). – С. 28–34.
116. Папир А. Н. Методика проектирования лопастных систем осевых насосов : в кн.: Лопастные насосы / под. ред. Л. П. Грянюк и А. Н. Папира. – Ленинград : Машиностроение, 1975. – С. 70–77.
117. Папченко А. А. Спеціальні гідромашини : навч. посіб. / А. А. Папченко, В. О. Панченко. – Суми : СумДУ, 2015. – 221 с.
118. Пат. 134101 ПНР. Центробежный проточный компрессор / J. Traczyk, J. Brejnak, K. Kawales. – № 232056; заявл. 06.07.81; опубл. 31.10.86.
119. Патент на винахід UA 76872: Здвоєний прямотечийний гідроагрегат / О. В. Потенко, С. М. Ковальов. – Опубл. 15.09.2006. – Бюл. № 9.
120. Патон Б. Е. Наука. Техника. Прогресс / Б. Е. Патон. – Москва : Наука, 1987. – 415 с.
121. Поздеев В. А. Прикладная гидродинамика электрического разряда в жидкости / В. А. Поздеев. – Киев : Наук. думка, 1980. – 192 с.
122. Покровский Г. И. Гидродинамические механизмы / Г. И. Покровский. – Москва : Знание, 1972. – 48 с.
123. Полищук В. П. Магнитодинамические насосы для жидких металлов / В. П. Полищук, М. Р. Цин, Р. К. Горн и др. ; отв. ред. В. А. Ефимов ; АН УССР. Ин-т проблем литья. – Киев : Наукова думка, 1989. – 256 с.
124. Поляхова Е. Н. Введение в теорию солнечного паруса: Космоплавание под солнечным парусом – фантастика или реальность перспектив недалекого будущего? – Изд. 2, испр. и доп. / Е. Н. Поляхова. – Москва : URSS, 2011. – 112 с.
125. Приходько О. А. Технічна аерогідромеханіка / О. А. Приходько, Д. О. Сьомін. – Луганськ : Вид-во Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2002. – 170 с.
126. Прохоренко, П. П. Ультразвуковой капиллярный эффект / П. П. Прохоренко, Н. В. Дежунов, Г. Е. Коновалов ; под ред. В. В. Клубовича. – Минск : Наука и техника, 1981. – 135 с.
127. Пфлейдерер К. Лопаточные машины для жидкостей и газов. Водяные насосы, вентиляторы, турбовоздуходувки, турбокомпрессоры / К. Пфлейдерер. – 4-е изд., перераб. –

Москва : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1960. – 685 с.

128. Ратушный А. В. Исследование перспективных способов повышения напорности центробежного насосного колеса / А. В. Ратушный // Герметичность, вибронадежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования. Гервикон + насосы – 2014 : сборник докладов участников XIV Международной научно-технической конференции. – Сумы : Папирус, 2014. – С. 139–141.

129. Ратушный А. В. Концепция капиллярного насоса / А. В. Ратушный, А. А. Дрофа, Д. Р. Васильченко // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ» (за галузями знань «Технічні науки»). – 2018. – № 63. – С. 189–195.

130. Ратушный О. В. Методика визначення оптимальних параметрів капілярного насоса / О. В. Ратушный // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ» (за галузями знань «Технічні науки»). – 2018. – № 64. – С. 174–178.

131. Ратушный О. В. Підвищення напірності ступеня відцентрового насоса способом удосконалення лопатевої ґратки робочого колеса : автореферат канд. техн. наук, спец.: 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати / О. В. Ратушний. – Суми : СумДУ, 2015. – 20 с.

132. Ратушный, А. В. Перспективы совместного применения некоторых нетрадиционных способов повышения напорности (часть II) / А. В. Ратушный // Вісник Сумського державного університету. Серія «Технічні науки». – 2013. – № 4. – С. 47–51.

133. Ратушный А. В. Повышение напорности ступени центробежного насоса путем усовершенствования лопастной решетки рабочего колеса : диссертация на соискание научной степени канд. технических наук / А. В. Ратушный ; науч. рук. И. А. Ковалев. – Сумы : СумГУ, 2015. – 154 с.

134. Ратушный А. В. Пути уменьшения энергопотребления насосным оборудованием / И. А. Ковалев, А. В. Ратушный // Вісник Сумського державного університету. Серія «Технічні науки». – 2010. – № 3, Т. 1. – С. 86–97.

135. Ратушный А. В. Путь к новой парадигме развития: особенности перехода к VI технологическому укладу и постиндустриальному обществу / А. В. Ратушный, А. А. Дрофа // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ» (за галузями знань «Технічні науки»). – 2017. – № 60 – С. 199–205.

136. Ратушный А. В. Энергоэнтропийные принципы развития технической системы «гидрораспределитель» / А. В. Ратушный, Н. В. Семёнова, С. П. Кулинич // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2016. – № 10. – С. 158–162.

137. Ржебаева Н. К. Расчет и конструирование центробежных насосов : учеб. пос. / Н. К. Ржебаева, Э. Е. Ржебаев. – Сумы : СумГУ, 2009. – 220 с.

138. Роки творення. Историчний нарис. – Сумы : Слобожанщина, 1999. – 292 с.

139. Савинский Ю. Э. Наследники инженера да Винчи. Новеллы о вертолетах и людях <http://ysavinskiy.ru/books/>.

140. Самайлович Г. С. Гидроаэромеханика / Г. С. Самайлович. – Москва : Машиностроение, 1980. – 280 с.

141. Сапожников С. В. Створення та вдосконалення технічних систем : конспект лекцій для студ. спец. 131 «Прикладна механіка» усіх форм навчання / С. В. Сапожников. – Сумы : СумДУ, 2019. – 148 с.

142. Седов Е. А. Одна формула и весь мир. Книга об энтропии / Е. А. Седов. – Москва : Знание, 1982. – 176 с.
143. Семенов В. В. Прямоточные гидротурбоагрегаты высокой и сверхвысокой быстроходности / В. В. Семенов. – Москва – Ленинград : Машгиз, 1959.
144. СИНТ'09 : материалы V международной конференции. – Воронеж : Научная книга, 2009. – 356 с.
145. Советский энциклопедический словарь / ред. А. М. Прохоров. – 4-е изд., испр. и доп. – Москва : Сов. энциклопедия, 1989. – 1632 с.
146. Соколов Ю. Н. Дутьевой вентилятор встречного вращения для котлов малой мощности / Ю. Н. Соколов, И. Ю. Соколова // Теплоэнергетика. – 1974. – № 6. – С. 40–43.
147. Солёный киловатт // Популярная механика. – 2011. – № 1 (99).
148. Соренсен Б. Преобразование, передача и аккумулирование энергии : учебно-справочное руководство / Б. Соренсен. – Долгопрудный : Интеллект, 2011. – 296 с.
149. Спицнадель В. Н. Основы системного анализа / В. Н. Спицнадель. – Санкт-Петербург : Бизнес-пресса, 2000. – 321 с.
150. Справочник по малотоннажному судостроению / составитель Б. Г. Мордвинов. Ленинград : Судостроение, 1988. – 576 с.
151. Степанов Ю. С. Семиотика / Ю. С. Степанов. – Москва : Наука, 1971. – 146 с.
152. Сумм Б. Д. Основы коллоидной химии : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Б. Д. Сумм. – 2-е изд., стер. – Москва : Академия, 2007. – 240 с.
153. Твайделл Дж. Возобновляемые источники энергии / Дж. Твайделл, А. Уэйр. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
154. Теория и расчет воздушнореактивных двигателей : учеб. пос. / под ред. С. М. Шляхтенко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1987. – 568 с.
155. Тітко Р. Відновлювальні джерела енергії / Р. Тітко, В. Калініченко. – Варшава – Краків – Полтава, 2010. – 534 с.
156. Ушаков К. А. Аэродинамика осевых вентиляторов и элементы их конструкций / К. А. Ушаков, И. В. Брусиловский, А. Р. Бушель. – Москва : Гостехиздат, 1960. – 422 с.
157. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике. Ч. 1; Ч. 2 : Современная наука о природе. Законы механики; Пространство, Время. Движение / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс ; под ред. Я. А. Смородинского. – 3-е изд. – Москва : Мир, 1976. – 439 с.
158. Физиология растений / под ред. И. П. Ермакова – Москва : Академия, 2005.
159. Филосовский словарь / под ред. И. Т. Фролова. – 7-е изд. – Москва : Республика, 2001. – 719 с.
160. Фролов К. В. Наука о машинах – основа машиностроения / К. В. Фролов, А. А. Пархоменко, М. К. Усков. – Москва : Наука, 1987. – 360 с.
161. Хлопенков П. Р. Крутится все / П. Р. Хлопенков // Изобретатель и Рационализатор. – 2003. – № 5 (641).
162. Хованський С. О. Підвищення ефективності експлуатації відцентрових насосів у системі водопостачання житлово-комунального господарства : дис. ... канд. техн. наук / С. О. Хованський ; наук. кер. В. Г. Неня. – Суми : СумДУ, 2010. – 191 с.
163. Хоменко А. В. Использование синергетических моделей в теории фазовых переходов конденсированной среды : диссертация на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук / А. В. Хоменко ; науч. рук. А. И. Олемской, В. Ф. Клепников. – Сумы : СумГУ, 1996. – 161 с.

164. Хоменко А. В. Самоорганизация и формирование низкоразмерных систем при удалении от равновесия : диссертация на соискание ученой степени д-ра физ.-мат. наук / А. В. Хоменко. – Сумы : СумГУ, 2009. – 319 с.
165. Хубка В. Теория технических систем / В. Хубка ; под. ред. К. А. Люшинского ; пер. В. В. Ачкасов, Н. И. Зук, Е. Б. Матвеева. – Москва : Мир, 1987. – 208 с.
166. Черняк В. Г. На шаг опережая время. К 110-й годовщине со дня основания ОАО «Сумское МНПО им. М. В. Фрунзе»: Краткий исторический очерк / В. Г. Черняк, О. Ф. Нестеренко, Л. Г. Старовойтова. – Сумы : Мрія-1, 2006. – 280 с.
167. Чугаев Р. Р. Гидравлика / Р. Р. Чугаев. – Москва : Энергия, 1982. – 672 с.
168. Чус А. В. Основы технического творчества : учеб. пос. / А. В. Чус, В. Н. Данченко. – Киев : Вища школа, 1983.
169. Шаубергер В. Энергия воды / В. Шаубергер. – Москва : Яуза, Эксмо, 2007. – 320 с.
170. Янтовский Е. И. Потоки энергии и эксергии / Е. И. Янтовский. – Москва : Наука, 1988. – 144 с.
171. Яхно О. М. Гідравліка неньютонівських рідин : навч. посіб. / О. М. Яхно, В. И. Желяк. – Київ : Вища шк., 1995. – 199 с. + Гриф МОН.
172. ANSYS CFX 13.0 Solver Theory. Release 13.0, 2010. – 261 p. – Режим доступа : <http://www.ansys.com>.
173. Becht W. Aerodynamik und Anwendbarkeit gegenläufiger Axialventilatoren / W. Becht // Heiz. – Luft. – Haustechnik. – 1960. – Bd. II, № 3.
174. Есоруп.ру'2009 : тезисы докладов международной научно-технической конференции. – Москва : Из-во РАПН, 2009. – 458 с.
175. Europump Variable Speed Pumping: guide to successful applications. – Brussels : Hydraulic Institute and Europump, 2004. – 172 p.
176. Grim O. Propeller and vane wheel / O. Grim // Journal of ship research. – 1980. – № 24. – P. 203–226.
177. Режим доступа : <http://energygeckkd.blogspot.com/2013/02/contra-rotating-marine-current-turbine.html>.
178. Режим доступа : <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1243/09576509JPE296>.
179. Режим доступа : <http://www.ngpedia.ru/id253057p1.html>.
180. Режим доступа : http://www.sivatherium.narod.ru/library/Tomilin/gl_07.htm.
181. Режим доступа : <https://geektimes.ru/post/281314/>.
182. Режим доступа : <https://ria.ru/science/20171008/1506408577.html>.
183. Режим доступа : <https://vertoletrussia.jimdo.com/>.
184. Huang B. Development of a model counter-rotating type horizontal-axis tidal turbine / B. Huang, K. Yoshida, T. Kanamoto // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 129 (2016).
185. Kearton W. J. Steam turbine theory and practice (6th edn.) Pitman, 1951.
186. Louis J. F. Axial Flow Contra-Rotating Turbines / J. F. Louis // ASME 1985 International Gas Turbine Conference and Exhibit Volume 1: Aircraft Engine; Marine; Turbomachinery; Microturbines and Small Turbomachinery, Houston, Texas, USA, March 18–21, 1985.
187. Momosaki S. Numerical simulation of internal flow in a contra-rotating axial flow pump / S. Momosaki, S. Usami, S. Watanabe, A. Furukawa // 25th JANR symposium of hydraulic machinery and system. – 2010. – P. 114–119.

188. Ordonez-Sanchez S. Contra Rotating Marine Turbines Tank Tests to Analyse System Dynamic Response / S. Ordonez-Sanchez, A. Grant and C. Johnstone // 3-rd International Conference on Ocean Energy, Bilbao.
189. Patent EP 1467093 A1 Generator for water current turbine with counter-rotating rotors / Svein Henriksen. – printed. 13.10.2004.
190. Patent EP 1644243 B1 Impeller drive for a water jet propulsion unit / Paul Mark Paterson, Barry John Davies – printed. 08.09.2010.
191. Patent EP 2508760 A2 Counter-rotating axial flow fan / Atsushi Yanagisawa, Honami Oosawa – printed. 10.10.2012.
192. Patent US 6278197 B1: Contra-rotating wind turbine system / Kari Appa. – printed. 21.08.2001.
193. Patent US 6504260 B1: Wind turbine with counter rotating rotors / Yves Debleser. – printed. 07.01.2003.
194. Pump Life Cycle Costs: A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems. Executive Summary // Hydraulic Institute and Europump. Published by Elsevier Ltd., 2005.
195. Shepherd D. G. Principles of turbomachinery / D. G. Shepherd. – Macmillan, 1956.
196. Shigemitsu T. Flow measurement with LDV in a contra-rotating axial flow pump / T. Shigemitsu, A. Furukawa, S. Watanabe, K. Okuma // 23th JANR symposium of hydraulic machinery and system. – 2007. – P. 51–56.
197. Veränderung: Untersuchungen der Vordralleinflüsse auf Kennlinien von Kreiselpumpen Schröder Valentin // Maschinenmarkt. – 1994. – 100, № 27. – P. 34–37.
198. Watanabe S. Internal flow structure in real rotor of contra-rotation axial flow pump at partial flow rates / S. Watanabe, A. Furukawa, S. Usami // Materials of 9th Int. Symp. on exp. and computational aerothermodynamics of internal flow. – 2009. – P. 70–76.

Наукове видання

Ратушний Олександр Валерійович

**VI ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УКЛАД:
ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СИСТЕМ,
ЯКІ ПЕРЕДАЮТЬ ЕНЕРГІЮ РІДИНИ**

Монографія

Художнє оформлення обкладинки О. В. Ратушного

Редактор І. О. Кругляк

Комп'ютерне верстання О. В. Ратушного

Формат 60×84/8. Ум. друк. арк. 24,65. Обл.-вид. арк. 20,05. Тираж 300 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач

Сумський державний університет,

вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.