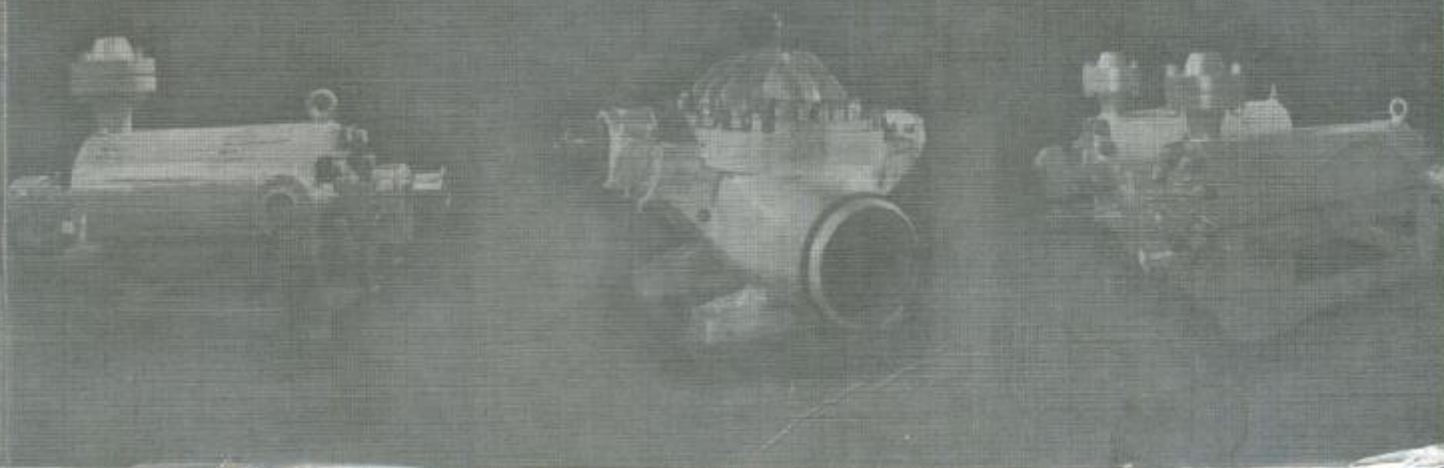


**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА
НАСОСО- И
КОМПРЕССОРОСТРОЕНИЯ**



Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины
Сумский государственный университет

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА НАСОСО- И КОМПРЕССОРОСТРОЕНИЯ

Монография

Под редакцией
д-ра техн. наук, проф. В. А. Марцинковского,
канд. техн. наук, доц. И. Б. Твердохлеба,
канд. техн. наук, доц. Е. Н. Савченко

Сумы
Сумский государственный университет
2011

УДК 621.671; 621.5
ББК 31.762
Т 30

Рецензенты:

- А. Р. Якуба* – доктор технических наук, профессор
(Сумский национальный аграрный университет);
И. Б. Каринцев – кандидат технических наук, профессор
(Сумский государственный университет)

*Рекомендовано к печати ученым советом
Сумского государственного университета
(протокол № 1 от 01.09.2011)*

**Теория и практика насосо- и компрессоростроения: монография / под ред.
Т 30 В. А. Марцинковского, И. Б. Твердохлеба, Е. Н. Савченко. – Сумы: Сумский
государственный университет, 2011. – 412 с.
ISBN 978-966-657-384-4**

Книга посвящена вопросам повышения экономичности и надежности насосного и компрессорного оборудования в энергетике, химической, нефтехимической, пищевой и других отраслях промышленности. Представлены работы по общим вопросам повышения энергоэффективности оборудования за счет совершенствования проточных частей и оптимизации рабочих режимов, приводятся результаты экспериментальных и расчетных исследований течений жидкостей и газов в каналах проточных частей, рассматриваются новые конструкции, а также опыт эксплуатации насосов и компрессоров в различных условиях и предложения по модернизации их основных узлов.

Рассчитана на специалистов, занимающихся разработкой, производством и эксплуатацией насосного и компрессорного оборудования для различных отраслей промышленности, а также на студентов машиностроительных специальностей вузов.

УДК 621.671; 621.5
ББК 31.762

© Марцинковский В. А., Твердохлеб И. Б., Савченко Е. Н., 2011
ISBN 978-966-657-384-4 © Сумский государственный университет, 2011

Содержание

	С.
Предисловие.....	9
1. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ..	10
1.1. Подходы к рациональному решению задачи создания нового насосного оборудования в практике группы «Гидравлические машины и системы» (<i>Ямбуренко Н.Н., Твердохлеб И.Б., Визенков Г.В.</i>)	11
1.2. Пути повышения энергоэффективности насосных систем (<i>Костюк А.В., Диброва О.В., Соколов С.А., Шилов Р.Н.</i>).....	23
1.2.1. Причины избыточного энергопотребления.....	23
1.2.2. Основные пути повышения энергоэффективности.....	24
1.2.3. Проведение технического аудита насосных систем.....	25
1.3. Повышение энергоэффективности систем путем применения частотно-регулируемого привода насоса (<i>Афанасьев А.В., Беккер Л.М., Твердохлеб И.Б.</i>).....	27
1.3.1. Регулирование подачи насоса.....	27
1.3.2. Способы регулирования частоты вращения насоса.....	28
1.3.3. Преимущества использования частотно-регулируемого привода на примере насосного оборудования для трубопроводного транспорта нефти.....	29
1.3.4. Возможные проблемы при использовании преобразователя частоты.....	31
1.3.5. Частотно-регулируемый высоковольтный привод.....	32
1.3.6. Типы высоковольтных преобразователей частоты.....	33
1.4. Создание новой высокоэффективной проточной части питательного насоса для тепловой энергетики (<i>Косяненко А.С., Руденко А.А., Твердохлеб И.Б.</i>).....	36
1.5. Пути повышения энергоэффективности центробежных насосов системы поддержания пластового давления (<i>Багманов А.А., Бажайкин С.Г., Кулешов К.В.</i>).....	40
1.5.1. Повышение КПД и напора насосов ЦНС путем снижения объемных потерь в проточной части.....	40
1.5.2. Обоснование возможности расширения рабочей зоны характеристик насосов ЦНС, применяемых в системе ППД.....	43
1.5.3. Разработка эффективного способа изменения напора насоса.....	46
1.5.4. Оценка жизненного цикла системы ППД.....	48
1.6. Пути повышения надежности насосного оборудования нефтеперерабатывающих производств (<i>Швиндин А.И., Берестовский В.А.</i>)....	50
1.7. Опыт использования насосов с гидротурбинным приводом на энергоблоках АЭС (<i>Шлемензон К.Т., Павлов П.Г.</i>).....	58
1.8. Влияние модернизационной пригодности и технологичности на стоимость жизненного цикла крупных насосов АЭС (<i>Пирогов А.Д.</i>)...	65
1.8.1. Показатели при определении цен.....	65
1.8.2. Подготовка к выделению показателей МП и МТ.....	68
1.8.3. Анализ основных типов насосов АЭС.....	72

1.9. Сравнительный анализ работы питательных насосов парового котла с регулированием частоты вращения с помощью гидравлической муфты и высоковольтного преобразователя частоты (Comparative analysis of operation of feed pumps steam boiler with speed regulation by means of a fluid clutch and a medium-voltage frequency converter. <i>Marek Skowroński, Przemysław Szulc</i>).....	85
1.9.1. Wprowadzanie.....	85
1.9.2. Model pracy bloku energetycznego.....	86
1.9.3. Charakterystyki regulacyjne bloków.....	87
1.9.4. Krzywe regulacyjne wydajności pomp zasilających.....	88
1.9.5. Charakterystyka układu pompowego.....	88
1.9.6. Temperatura wody.....	88
1.9.7. Charakterystyki pomp, sprzęgieł i przemienników.....	89
1.9.8. Obliczanie układów pompowych.....	90
1.9.9. Wyniki obliczeń.....	91
1.10. Исследование конструкции центробежного насоса для механической поддержки работы человеческого сердца (<i>Алтынцев Е., Корчак А., Кустош Р.</i>).....	93
1.10.1. Методы исследования течения в насосе.....	97
1.10.2. Определение характеристик проточной части насоса.....	98
1.10.3. Анализ результатов расчетов гидродинамических сил.....	99
1.10.4. Сдвиговые напряжения в перекачиваемой жидкости.....	100
1.10.5. Измерение основных характеристик новой проточной части насоса.....	102
Перечень ссылок.....	104
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТОКА В ЭЛЕМЕНТАХ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ НАСОСВ И КОМПРЕССОРОВ.....	109
2.1. Аэродинамическое и аэроупругое взаимодействие лопаточных венцов осевого компрессора (<i>Гнесин В.И., Колодяжная Л.В.</i>).....	109
2.1.1. Аэроупругая модель.....	109
2.1.2. Численный анализ.....	113
2.2. Расчетно-экспериментальная оценка и прогнозирование границы устойчивости к дозвуковому флаттеру упругих систем (<i>Зиньковский А.П., Цимбалюк В.А., Стельмах А.Л.</i>).....	119
2.2.1. Основные положения методик и средства определения нестационарных аэродинамических нагрузок.....	120
2.2.2. Расчет границы динамической устойчивости.....	124
2.2.3. Методика прогнозирования границы динамической устойчивости лопаточного венца.....	125
2.2.4. Пример определения границы динамической устойчивости лопаточного венца.....	126
2.3. Выбор геометрии проточной части центробежного компрессора в составе ГПА с газотурбинным приводом (<i>Парафейник В.П., Евдокимов В.Е., Тертыйный И.Н., Нефедов А.Н.</i>)...	127

2.4. Расчет течения вязкой жидкости в неподвижных и вращающихся решетках (Жарковский А.А., Поспелов А.Ю., Пугачёв П.В.).....	140
2.5. Расчетное исследование течения и потерь в насосе ЦНС 63-1400 (Жарковский А.А., Алексенский В.А., Пугачёв П.В.).....	148
2.6. Расчетная оценка кавитационных качеств центробежных насосов (Жарковский А.А., Алексенский В.А., Пугачёв П.В.)	154
2.7. Численное моделирование гидродинамических процессов в проточной части центробежного нефтяного насоса с использованием нейросетевых алгоритмов (Валухов С.Г., Булыгин Ю.А., Кретинин А.В., Бучнев Р.Н.)	161
2.7.1. Краткое описание нейросетевой вычислительной архитектуры.....	161
2.7.2. Моделирование гидродинамических процессов.....	163
2.7.3. Моделирование 2d турбулентного течения несжимаемой жидкости во вращающемся кольце с прилегающей областью.....	164
2.7.4. 2d моделирование гидродинамических процессов в проточной части насоса.....	166
2.7.5. Нейросетевые 3d профили лопастей рабочих колес.....	167
2.8. Решение для исходной геометрии центробежного рабочего колеса в 3D постановке (Prime geometry solution of a centrifugal impeller within 3d setting. Peter Hlbočan, Michal Varchola).....	170
2.8.1. The geometry design.....	170
2.8.2. The meridional cut design.....	172
2.8.3. The blade cuts design.....	173
2.8.4. The impeller's solution in a 3d environment.....	175
2.9. Конструирование геометрии диагонального насоса с использованием экспериментальных результатов внутреннего течения в рабочем колесе (Geometry design of a mixed flow pump using experimental results of on internal impeller flow. Michal Varchola, Peter Hlbočan).....	177
2.9.1. Pressure distribution in the chanel of an impeller.....	177
2.9.2. The procedure of a hydraulic projection of the blade.....	181
2.10. Насос турбины Френсиса со стохастическими лопатками (The francis pump turbine with stochastic blades. František Pochylý, Miloslav Haluza, Jindřich Veselý)	184
2.10.1. Retuning of the runner by splitter blades.....	184
2.10.2. The runner with non-uniform blade cascade.....	188
2.11. Повышение эффективности проточной части насосов «ЭЦВ» диагонального типа (Надточий А.С, Солодченков В.Ф.).....	192
2.12. Компьютерное проектирование проточной части центробежных насосов (Косторной С.Д., Чаплыгин А.А., Косторной А.С.).....	199
2.12.1. Исходные уравнения двухпараметрических потоков в ПЧ ..	
2.12.2. Общие дифференциальные уравнения двух параметрических потоков идеальной жидкости.....	202
2.12.3. Профилирование лопасти рабочего колеса.....	206

2.13. Исследование структуры течения в боковых подводах гидромашин и некоторые рекомендации по их проектированию (Каранузова М.В., Луговая С.О., Твердохлеб И.Б.)	209
2.13.1. Обоснование возможности проведения численного исследования гидравлических качеств подводов.....	209
2.13.2. Описание объектов и методики проведения численного исследования.....	210
2.13.3. Анализ результатов численного исследования.....	211
2.14. Дослідження робочого процесу комбінованого відцентрово-доцентрового ступеню шляхом проведення чисельного та фізичного експериментів (Казнієнко Д. В.)	218
2.15. Влияние зазора между рабочим колесом и корпусом на характеристики струйно – реактивной турбины (Ванеев С.М., Бережной А.С.).....	224
2.15.1. Экспериментальные исследования.....	224
2.15.2. Обработка экспериментальных данных.....	227
2.16. Антипомпажный регулирующий клапан центробежного нагнетателя на базе шарового крана (Савченко Е.Н., Сидорец А.И., Сидорец И.И.).....	232
2.16.1. Постановка задачи.....	233
2.16.2. Краткий обзор существующих конструкций антипомпажных клапанов и выбор базовой конструкции.....	233
2.16.3. Моделирование и численный расчет антипомпажного клапана на базе конструкции шарового крана.....	235
2.17. Течение жидкости в тройнике. Сравнение численного моделирования и результатов визуализации потока (The fluid flow in the t-junction. The comparison of the numerical modeling and piv measurement. Jaroslav Štigler, Roman Klas, Michal Kotek, Václav Kopecký).....	240
2.17.1. Numerical model description.....	241
2.17.2. Experiment description.....	242
2.17.3. Results comparison and discusion	243
2.18. Математическая модель кавитации и моделирование течения жидкости в диффузоре (Mathematical model of cavitation and modelling of fluid flow in cone. Milada Kozubková, Jana Rautová, Marian Bojko)	248
2.18.1. Mmathematical model.....	248
2.18.2. Geometry	252
2.18.3. Numerical parameters.....	252
2.18.4. Rresults of the numerical solution.....	255
2.19. Влияние отдельных структурных параметров на энергетические свойства радиального лабиринтного насоса (The influence of chosen structural parameters on energetic properties of a radial labyrinth pump. Przemysław Szulc, Janusz Plutecki).....	258
2.19.1. Pompa modelowa.....	260
2.19.2. Stanowisko pomiarowe.....	261
2.19.3. Badania rzeczywiste, ich wyniki i analiza.....	262
Перечень ссылок.....	267

3. НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ И МОДЕРНИЗАЦИЯ НАСОСНОГО И КОМПРЕССОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	274
3.1. К вопросу о создании проточной части многоступенчатого насоса с минимальными радиальными размерами (Твердохлеб И.Б., Князева Е.Г., Бирюков А.И., Луговая С.О.)	274
3.2. Проектирование направляющего аппарата промежуточной ступени центробежного насоса (Луговая С.О., Ольштынский П.Л., Руденко А.А., Твердохлеб И.Б.).....	281
3.2.1 Обзор существующих методов проектирования направляющих аппаратов промежуточных ступеней.....	281
3.2.2. Анализ структуры течения в направляющих аппаратах.....	286
3.3. К вопросу о создании сменных проточных частей для магистральных нефтяных насосов (Иванюшин А.А., Колесник Е.С., Руденко А.А., Твердохлеб И.Б.)	289
3.4. Новые насосы для систем ППД, насосы для перекачки мультифазных сред с объемным содержанием газа до 95% (Федцов Ф.В.)...	
3.5. Применение малогабаритных осевых ступеней низкой быстроходности в скважинных насосах для водоснабжения (Гусак А.Г., Демченко О.А., Каплун И.П.).....	300
3.5.1. Постановка проблемы.....	300
3.5.2. Анализ предыдущих исследований.....	303
3.5.3. Основные результаты.....	304
3.6. Перспективы использования оседиагональных рабочих органов для улучшения кавитационных качеств промышленных центробежных насосов (Давиденко А.К., Елин А.В., Елин В.К., Руденко А.А.).....	309
3.7. Изменение напора центробежного рабочего колеса путем запиловки выходных кромок лопастей (Богун В.С., Пугачёв П.В., Шумилин С.А., Жарковский А.А.)	317
3.8. О возможности унификации входных крышек центробежных многоступенчатых насосов (Евтушенко А.А., Каратузова М.В.).....	324
3.9. Повышение технологичности при изготовлении и модернизации штампосварных рабочих колес крупных насосов АЭС (Пирогов А.Д.).....	331
3.10. Особенности рабочего процесса и характеристик безроторных центробежных насосов (Сёмин Д.А., Роговой А.С.).....	340
3.10.1. Постановка задачи.....	340
3.10.2. Результаты исследований.....	341
3.11. Використання багатofункціонального теплогенеруючого агрегату-гомогенізатора для харчових технологій (Папченко А.А., Ковальов С.Ф., Овчаренко М.С.).....	347
3.12. Гидроструйные вакуумные насосы: состояние и перспективы развития (Спиридонов Е.К.).....	352

3.13. Теплонасосная установка на базе струйной термокомпрессии с использованием водоаммиачного раствора (Арсеньев В.М., Ванев С.М., Проценко М.И., Гулый А.Н.).....	358
3.13.1. Выбор схемно-циклового решения.....	359
3.13.2. Моделирование рабочего процесса.....	362
3.14. Температурный феномен в потоке теплоносителя энергетической установки (Кревсун Э.П.).....	365
3.14.1. Краткий экскурс в историю вопроса.....	365
3.14.2. Два определения для термина «температура».....	367
3.14.3. Неоднозначная связь теплоемкости и температуры вещества.....	368
3.14.4. О теплоемкости воды.....	369
3.14.5. Средние значения скоростей поступательного и вращательного движения молекул воды.....	371
3.14.6. Термохаос. физическая модель.....	374
3.14.7. Пример устройства, в котором может быть использовано явление «термохаос».....	376
3.15. Оценка сохранения потенциальной энергии в системах сжатого воздуха (Estimating potential energy savings in compressed air systems. Ryszard Dindorf)	378
3.15.1. Potential energy saving in compressed air system.....	378
3.15.2. Methods to calculate the cost of compressed air.....	381
3.16. Технологии электроэрозионного легирования и обработки для компрессорного и насосного оборудования (Марцинковский В.С., Тарельник В.Б.).....	386
3.16.1. Восстановление вкладышей подшипников.....	386
3.16.2. Упрочнение и ремонт ПШ роторов.....	392
3.16.3. Упрочнение деталей типа «вал» на примере подшипниковых шеек валов.....	395
3.16.4. Насосные втулки.....	396
3.16.5. Обеспечение прирабатываемости ВП.....	399
3.16.6. Компенсация погрешностей при изготовлении подшипников скольжения.....	402
Перечень ссылок.....	404

2.14. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ КОМБІНОВАНОГО ВІДЦЕНТРОВО-ДОЦЕНТРОВОГО СТУПЕНЮ ШЛЯХОМ ПРОВЕДЕННЯ ЧИСЕЛЬНОГО ТА ФІЗИЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Казнієнко Д. В.

Підвищення енергоємності серійного проміжного ступеню насосу типу ЦНС, без зміни його монтажно-габаритних розмірів, дає змогу досягнути покращення масогабаритних показників насосу в цілому.

Організація комбінованого процесу енергопередачі, а саме, відцентрово-доцентрового, у конструкції багатоступеневого насосу, є принципово новим способом вирішення даної проблеми. Цей спосіб передбачає розміщення у конструкції відцентрового насосного ступеню додаткового робочого органу – доцентрової лопатевої решітки а також ряду направляючих та відвідних лопатей (рис. 2.91).

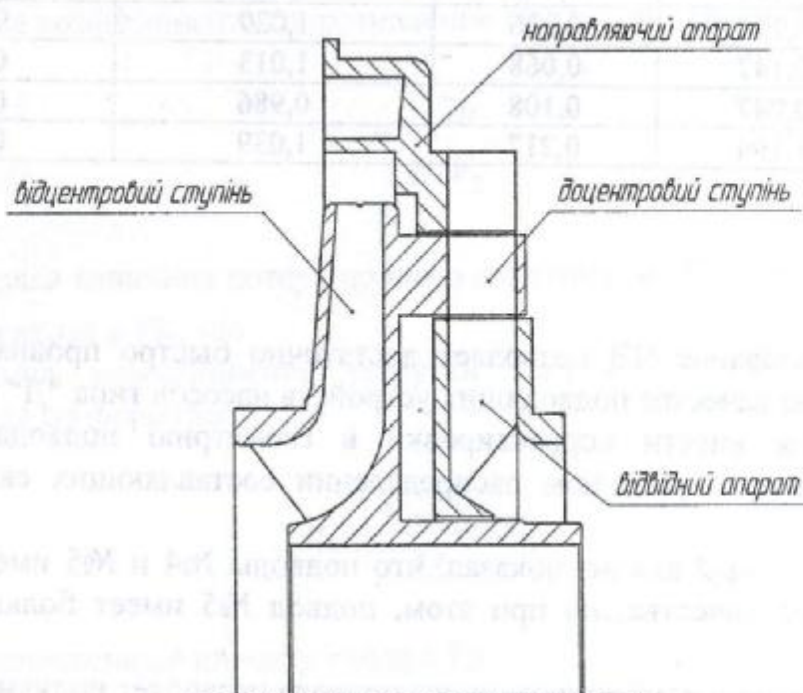


Рисунок 2.91- Переріз проточної частини комбінованого ступеню

Проектування та чисельний аналіз робочих характеристик дослідного зразка доцентрового насосного ступеню дали змогу визначити більшість геометричних параметрів доцентрової лопатевої решітки, а також ряду направляючих та відвідних лопатей [70 -74].

Основною метою проведення досліджень було створення доцентрового насосного ступеню з максимально можливим значенням створюваного напору та енергоефективності. При цьому, моделювання течії у межах проточної частини доцентрового ступеню проводилося окремо для його елементів.

На даному етапі дослідження проведено чисельний експеримент по визначенню енергетичних параметрів доцентрового насосного ступеню на розрахунковому режимі по подачі – $180 \text{ м}^3/\text{год}$. та частоті обертання робочого колеса – 3000 об/хв .

Методика і порядок проведення експерименту не відрізнялися від описаних у роботі [70].

Розрахункова сітка була створена у компоненті програмного комплексу ANSYS університетської версії і нараховувала 1701884 призматичних комірок. Для належного опису пограничних шарів поблизу твердих стінок густину сітки було збільшено (рис. 2.92).

Величина змінної Y^+ знаходилась в межах від 10 до 100 одиниць, що відповідає рекомендаціям, приведеним у посібнику користувача [75].

За результатами розрахунку визначено основні енергетичні параметри доцентрового насосного ступеню. Так на подачі $180 \text{ м}^3/\text{год}$. при частоті обертання 3000 об/хв . Досліджений ступінь створює $42,8 \text{ м}$ напору та споживає $54,3 \text{ кВт}$ потужності. При цьому кдд його складає $0,39$.

На базі серійного проміжного ступеню насосу ЦНС 180-1900, та дослідженого, шляхом чисельного експерименту, доцентрового, створено комбіноване відцентрово-доцентрове робоче колесо а також направляючий та відвідний апарати.

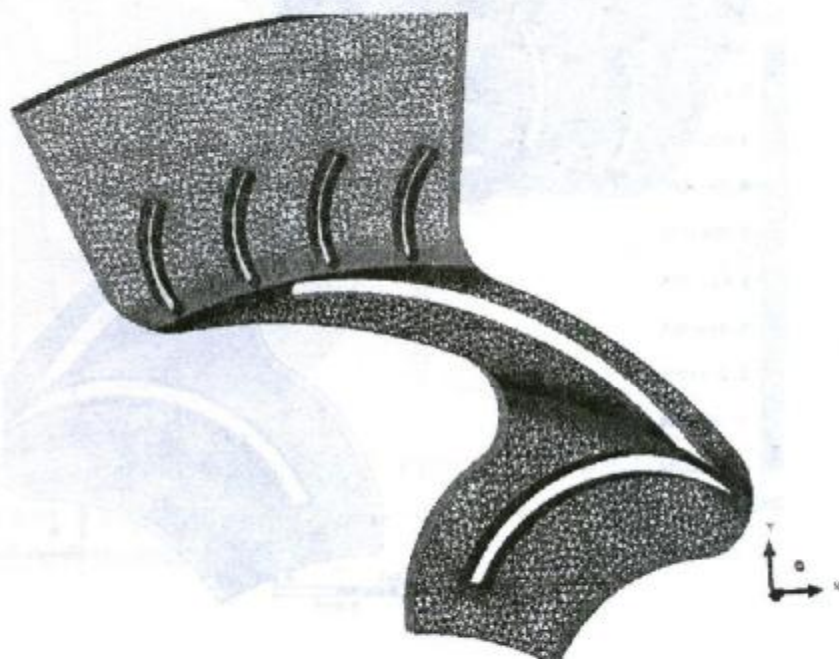


Рисунок 2.92 – Розрахункова сітка доцентрового ступеню

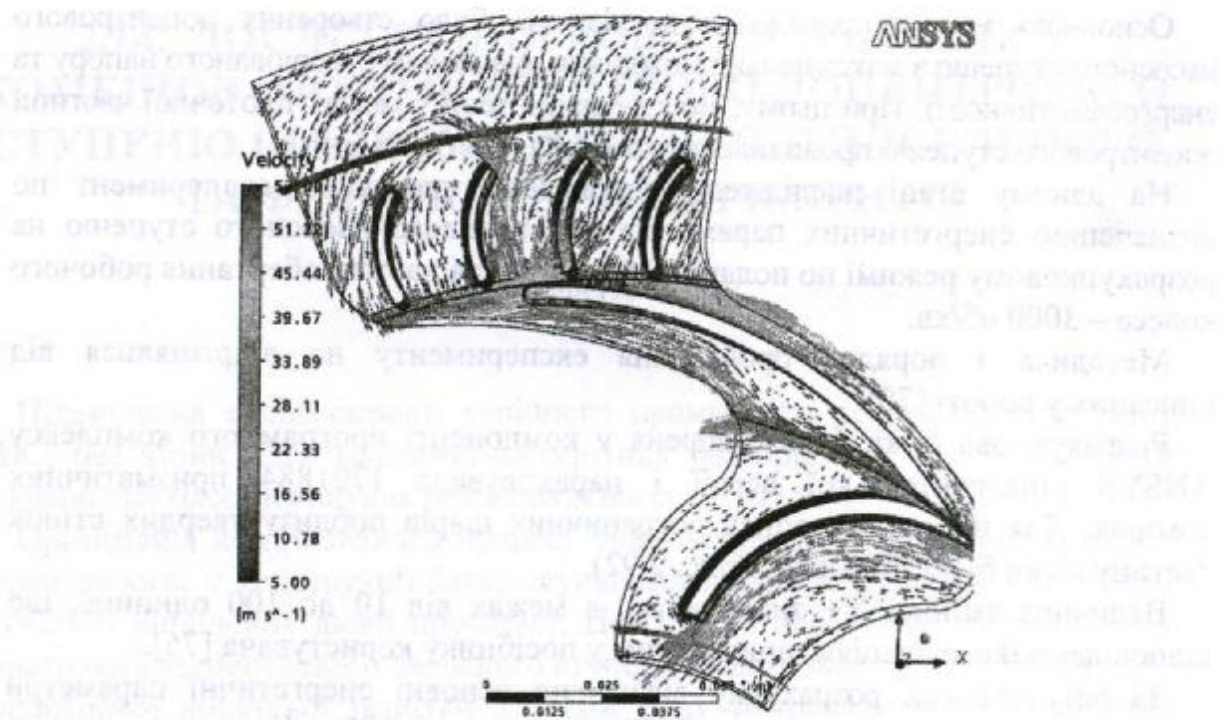


Рисунок 2.93 – Вектори абсолютної швидкості у проточній частині доцентрового ступеню

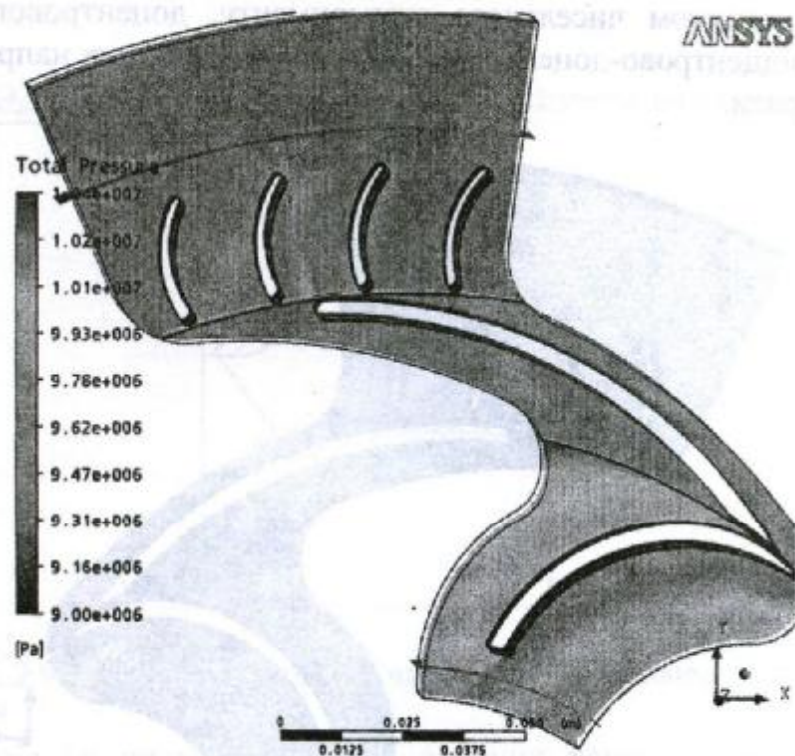


Рисунок 2.94 – Розподіл тиску у проточній частині доцентрового ступеню

Фізичний експеримент по визначенню енергетичних параметрів серійного проміжного ступеню насосу ЦНС 180-1900, а також комбінованого відцентрово-доцентрового насосного ступеню проведено на кафедрі Прикладної гідроаеромеханіки СумДУ.

Переріз робочої частини експериментального стенду при випробуванні серійного та комбінованого ступенів представлено на рисунках 2.95 та 2.96 відповідно. На рисунках зображено схему відбору тиску p_1 та p_2 при визначенні напірної характеристики ступенів, при цьому подача визначалася за допомогою витрати мірної шайби та дифманометра. Споживана ступенем потужність визначалася за схемою мотор-вагів. Випробування проводилися при частоті обертання привідного двигуна 1500 об/хв. За результатами випробувань виконано перерахунок робочих характеристик ступенів на частоту обертання 3000 об/хв.

На рисунках 2.97 – 2.99 представлено порівняльні характеристики серійного проміжного ступеню насосу ЦНС 180-1900 та створеного на його базі комбінованого відцентрово-доцентрового.

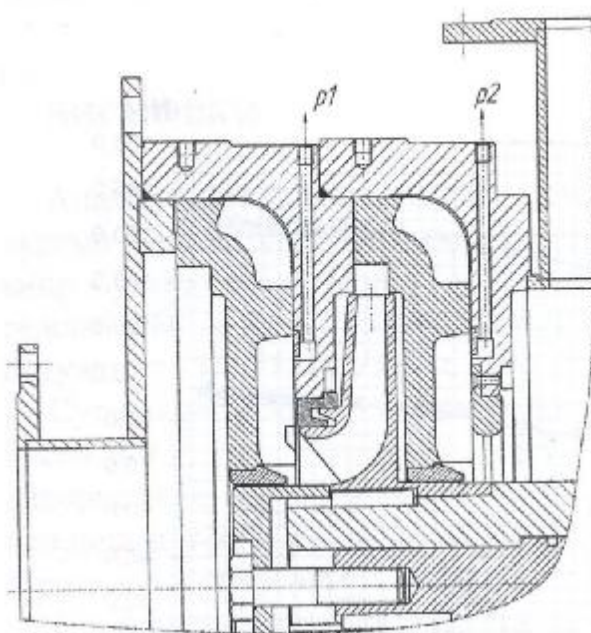


Рисунок 2.95 – Переріз робочої частини стенду з серійним проміжним ступенем

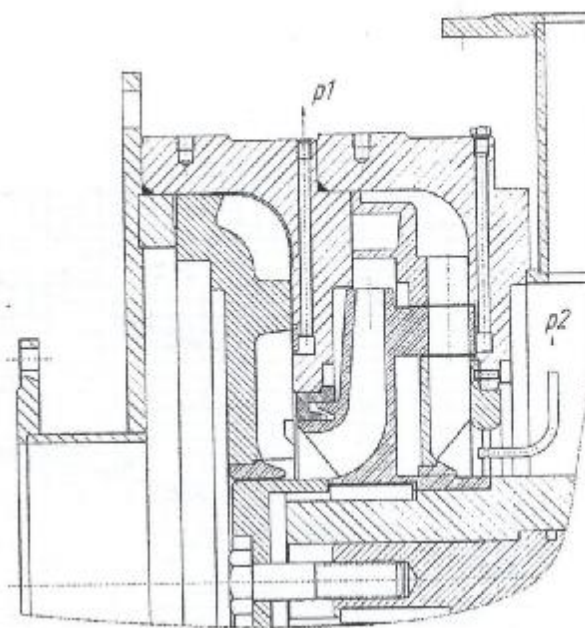


Рисунок 2.96 – Переріз робочої частини стенду з комбінованим ступенем

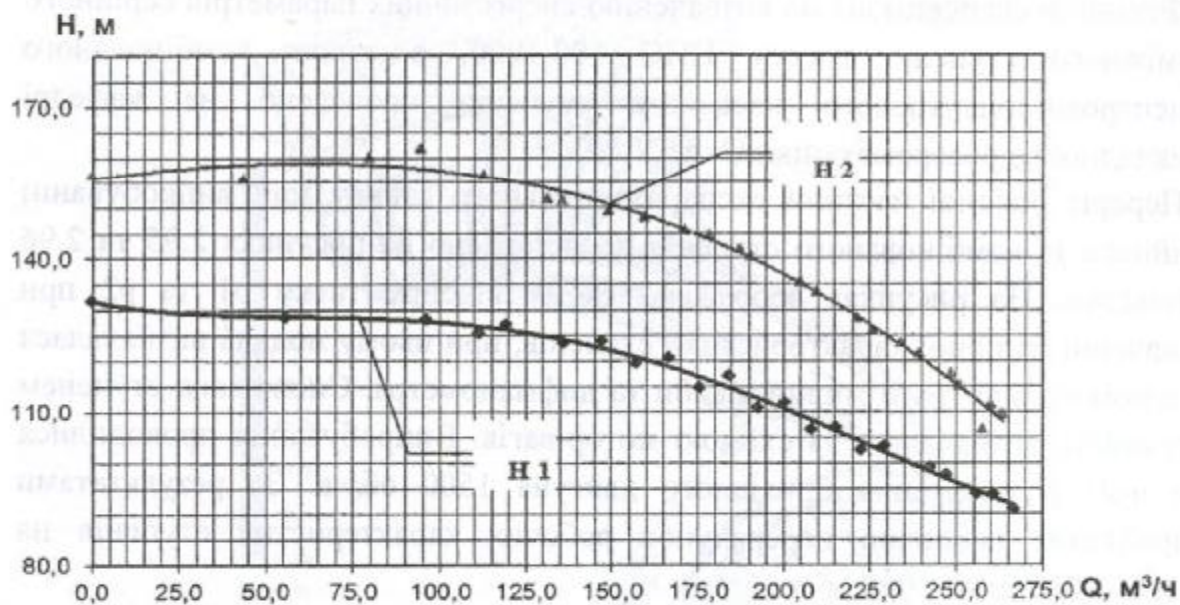


Рисунок 2.97 – Порівняння напірних характеристик серійного – 1 та комбінованого - 2 ступенів

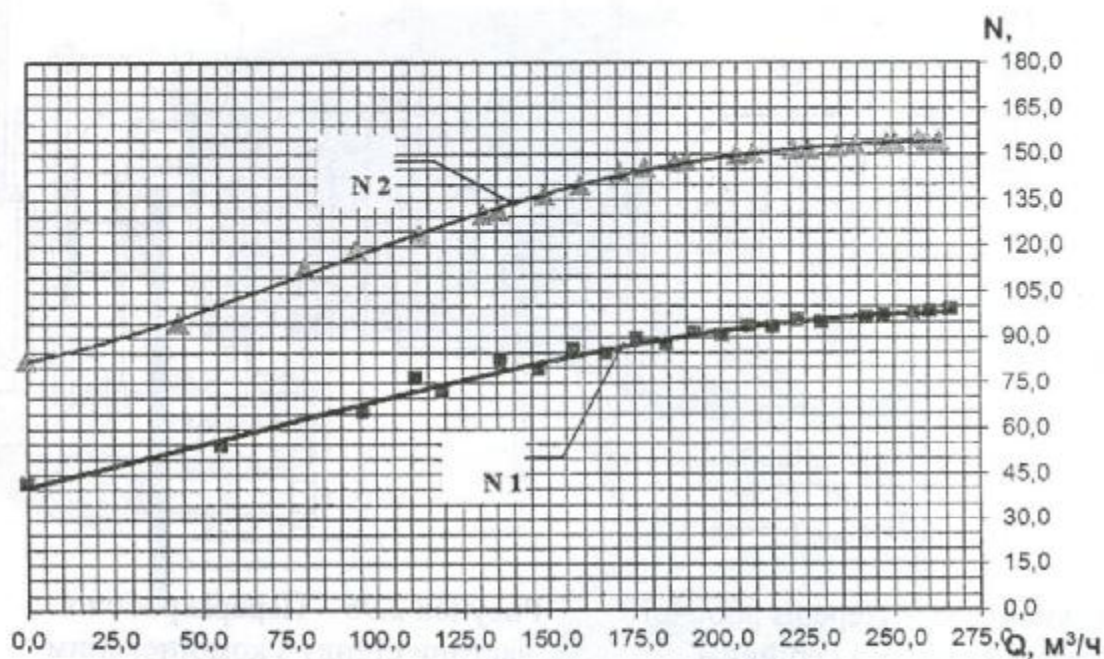


Рисунок 2.98 – Порівняння характеристик по потужності серійного – 1, та комбінованого - 2 ступенів

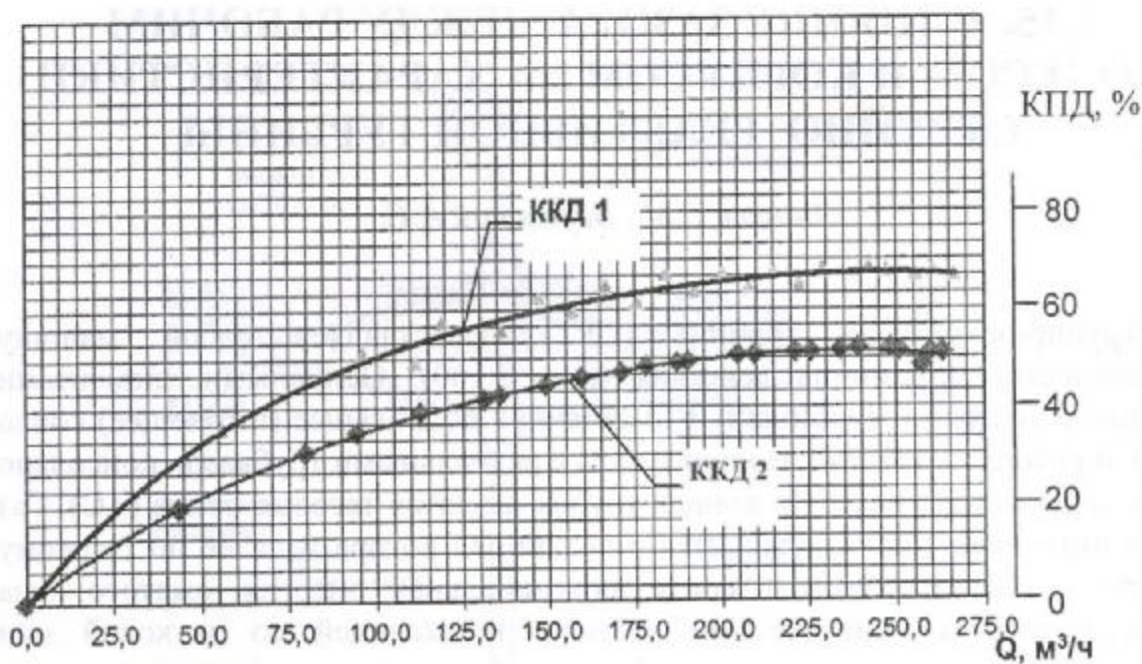


Рисунок 2.99 – Порівняння характеристик по ккд серійного – 1, та комбінованого -2 ступенів

ВИСНОВКИ

Аналізуючи характеристику комбінованого ступеню можна визначити окремо параметри доцентрової його частини. Так за результатами проведених випробувань доцентровий насосний ступінь у складі комбінованого на режимі 180 м³/год створює додатково 27,5 м напору та споживає 55 кВт потужності. При цьому к.к.д. його становить 0,25.

Суттєві розбіжності у визначенні напору доцентрового ступеню шляхом чисельного та фізичного експериментів, викликані, перш за все, використанням спрощеної схеми проведення чисельного моделювання. Так, наприклад, при проведенні чисельного експерименту не враховуються об'ємні втрати у доцентровому ступені.

Програмою подальших досліджень робочих характеристик комбінованого відцентрово-доцентрового ступеню заплановано створення робочої методики проведення поглибленого чисельного експерименту. Врахування конструктивних особливостей комбінованого ступеню при проведенні чисельного моделювання дасть змогу досягнути більш точних результатів визначення його енергетичних параметрів. Це дозволить створити методику проектування комбінованого відцентрово-доцентрового ступеню на різні параметри, уникаючи обов'язкового проведення фізичного експерименту, як досить дорогого у організації.