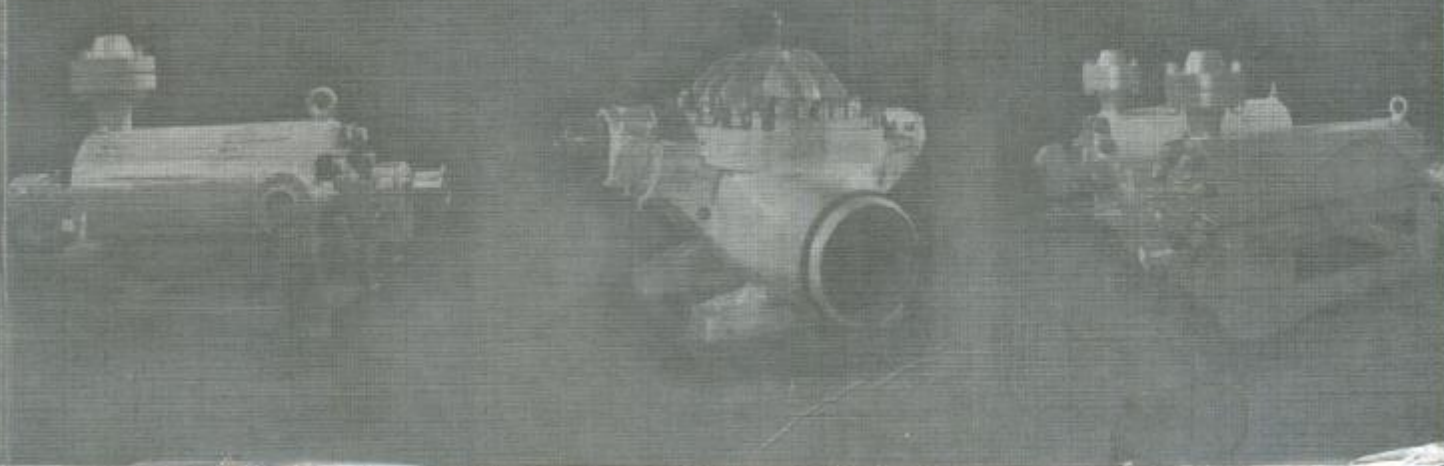


**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА
НАСОСО- И
КОМПРЕССОРОСТРОЕНИЯ**



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» (Ямбуренко Н.Н, Твердохлеб И.Б., Визенков Г.В.).	11
1.2. Пути повышения энергоэффективности насосных систем (Костюк А.В., Диброва О.В., Соколов С.А., Шилов Р.Н.).....	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 (Афанасьев А.В., Беккер Л.М., Твердохлеб И.Б.).....	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 (Косяненко А.С., Руденко А.А., Твердохлеб И.Б.).....	36
1.5. Пути повышения энергоэффективности центробежных насосов системы поддержания пластового давления (Багманов А.А., Бажайкин С.Г., Кулешов К.В.).....	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 (Швиндин А.И., Берестовский В.А.)....	50
1.7. Опыт использования насосов с гидротурбинным приводом на энергоблоках АЭС (Шлемензон К.Т., Павлов П.Г.).....	58
1.8. Влияние модернизационной пригодности и технологичности на стоимость жизненного цикла крупных насосов АЭС (Пирогов А.Д.)...	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

3.11. ВИКОРИСТАННЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОГО ТЕПЛОГЕНЕРУЮЧОГО АГРЕГАТУ- ГОМОГЕНІЗАТОРА ДЛЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Папченко А.А., Ковальов С.Ф., Овчаренко М.С.

В умовах підвищення цін на енергоносії забезпечення конкурентоспроможності продукції потребує ґрунтовного аналізу енергоспоживання та впровадження енергозберігаючих заходів. Одним із процесів, що реалізується для більшості технологічних процесів харчових технологій, є процес гомогенізації продукту. Він реалізується для таких продуктів, як молоко, кетчупи, пасти, майонези, соки, йогурти тощо і в значній мірі впливає на якісні характеристики продукту та його стійкість.

Більшість діючих виробництв реалізують вказаний процес за допомогою плунжерних гомогенізаторів (рис. 3.58). Вказані пристрої являють собою трьохплунжерний насос та регульоване голчате сопло. За рахунок створення певного тиску, що залежить від типу робочого середовища та його характеристик, та наступним його дроселюванням на соплі відбувається гомогенізація. Головною перевагою таких агрегатів є простота робочого процесу та можливість легкого регулювання (згідно напрацьованих рекомендацій) в залежності від характеристик робочого середовища. Недоліками плунжерних гомогенізаторів є високі масогабаритні характеристики та енерговитрати, а також неможливість регулювання подачі. Одним із можливих шляхів усунення вказаних недоліків є використання роторно-динамічних гомогенізаторів (рис. 3.59). Вказані агрегати являють собою машину динамічного принципу дії, в якій гомогенізація робочого середовища відбувається за рахунок багаторазового поетапного проходження робочого середовища через зазори між статорними елементами та робочим колесом, що обертається з частотою 3000 об/хв.

Відомо, що при наявності статичного дисбалансу вал здійснює прецесію навколо положення рівноваги, швидкість якої дорівнює швидкості обертання вала навколо своєї осі. Під час такого руху одна частина поверхні вала завжди буде знаходитись на меншій відстані від втулки, ніж діаметрально протилежна.

Конструктивно робоче колесо являє собою диск з коаксіальними циліндричними виступами, що входять у прорізи статорних елементів. На статорах виконані радіальні прорізи для більш активної гомогенізації потоку. Робоче колесо має подібні похилі пази, що унеможлиблює повне відкриття каналу та прохід негомогенізованого продукту (рис. 3.60).

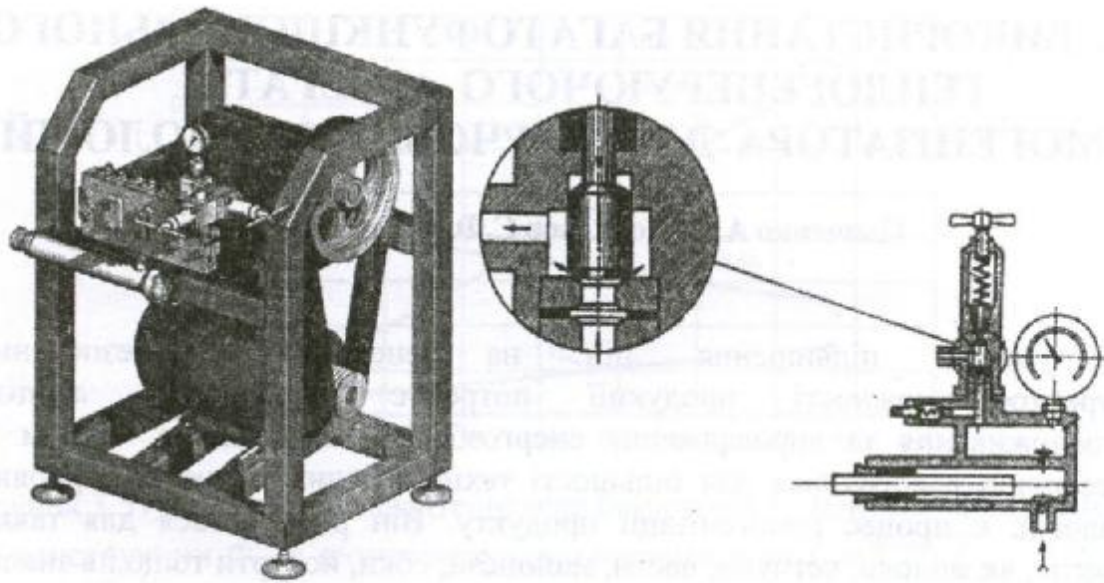


Рисунок 3.58 – Плу́нжерний гомогенізатор та гомогенізуюча головка

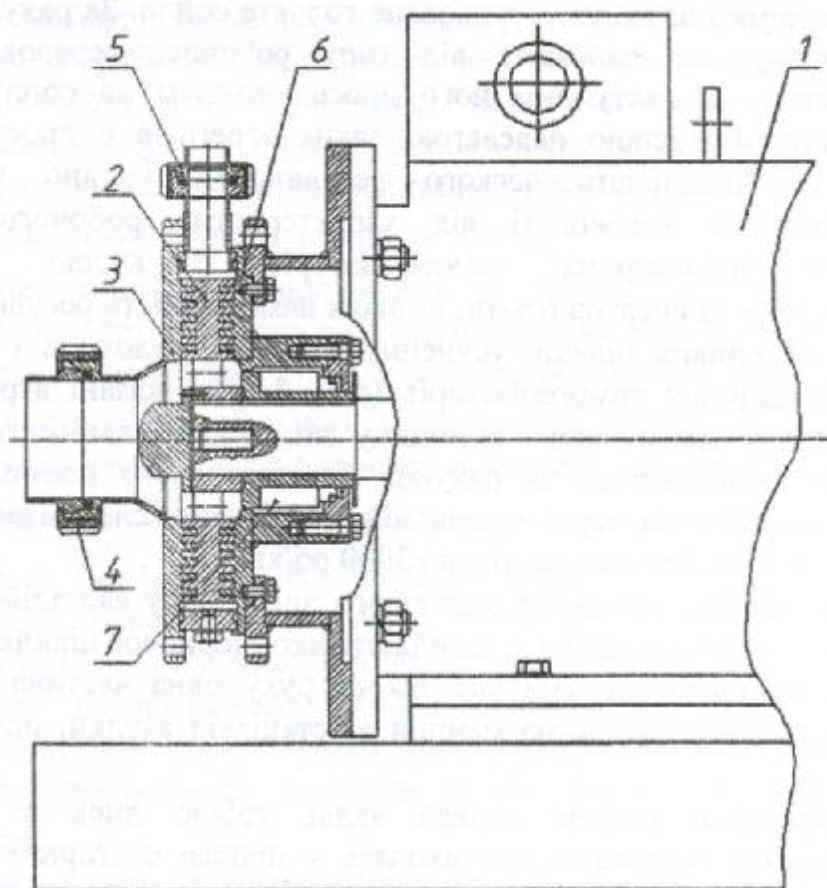


Рисунок 3.59 – Роторно-динамічний гомогенізатор

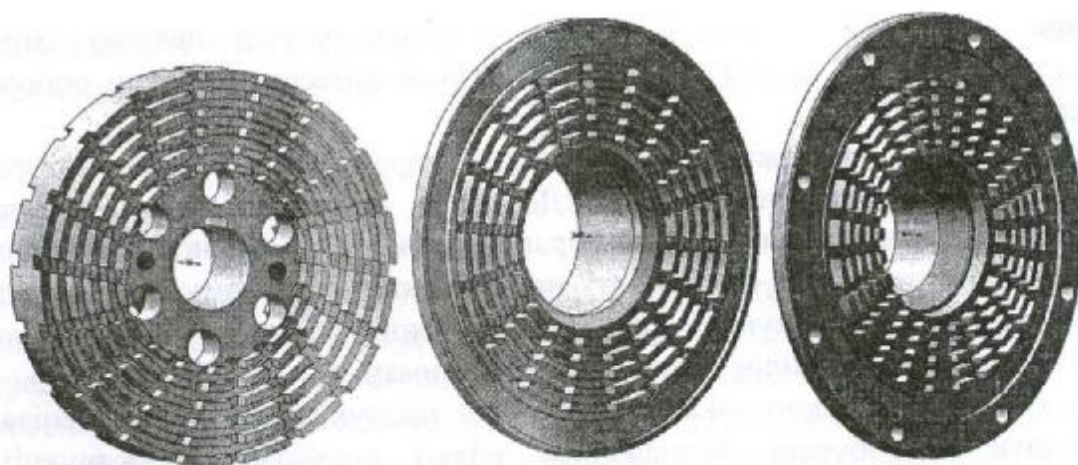


Рисунок 3.60 – Робоче колесо, передній та задній статори

Таким чином потік підводиться у осьовому напрямку до робочого колеса, де розділяється на два. Поетапно проходячи між роторними та статорними елементами відбувається гомогенізація продукту у зазорах агрегату. Враховуючи те, що робоче колесо є двопоточним, для спрощення агрегат виконано моноблочної конструкції.

Дослідження насосної характеристики агрегату виконувалося на базі кафедри прикладної гідроаеромеханіки. Експериментальна частина передбачала два етапи випробувань: з шириною пазів 5 мм та 8 мм, (відповідно нижні та верхні характеристики на рис 3.61).

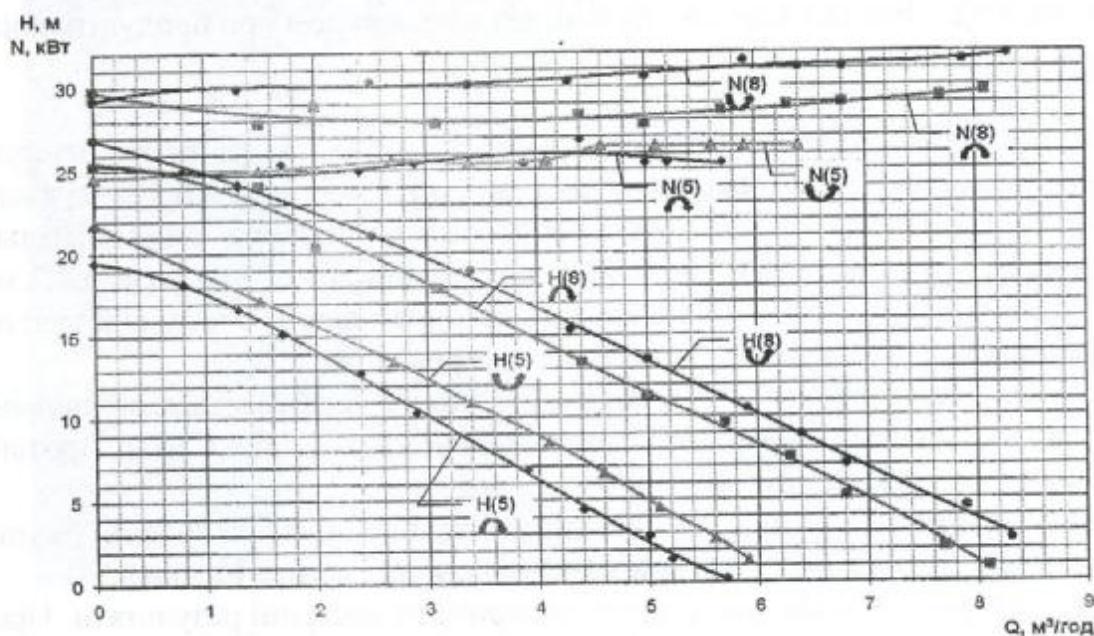


Рисунок 3.61 – Експериментальні характеристики роторно-динамічного гомогенізатора

Зміна напрямку обертання ротора супроводжується певною зміною параметрів агрегату (до 10%), що пояснюється похилими пазами робочого колеса.

Другий етап дослідження передбачав випробування гомогенізатора в умовах діючого виробництва ТОВ «Добряна», м.Суми. У якості робочого середовища для випробувань було обрано молоко 2.7% жирності. Основною задачею гомогенізатора при роботі на вказаному робочому середовищі є подрібнення жирових кульок з метою зниження розшарування молока. Випробування проводилися на різних режимах (2, 5, 9 м³/годину). На кожному режимі виконувався забір проб продукту після гомогенізації. Результати випробувань визначалися згідно нормативної інструкції в лабораторії ТОВ «Добряна» та додатково аналізувалися за допомогою мікроскопа з кратністю збільшення 480 разів (рис 3.62).

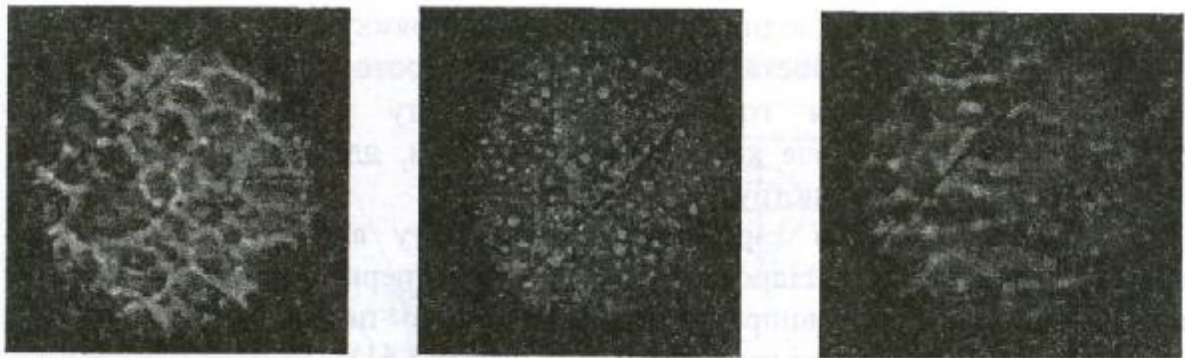


Рисунок 3.62 – Вигляд жирових кульок під мікроскопом при продуктивності: 2, 5, 9 м³/год

Огляд проб за допомогою мікроскопу дозволив зробити наступні висновки. Молоко, що надходить до гомогенізатора має жирові кульки з розміром близько 20 мкм. При роботі гомогенізатора на мінімальній продуктивності (2 м³/годину) жирові кульки мають домінуючі розміри 4,2 мкм при максимальному розмірі 8,4 мкм. Але протягом певного часу відбувається групування жирових кульок з утворенням жирових смуг.

При продуктивності гомогенізатора 5 м³/годину відбувається подрібнення жирових кульок до 5,4 мкм при їх максимальному розмірі 9,6 мкм. Протягом часу спостерігається стійкість робочого середовища.

При продуктивності 9 м³/годину подрібнення жирових кульок відбувається до розміру 9 мкм при максимальному розмірі 12 мкм.

Лабораторні дослідження дозволили отримати наступні результати. Проба отримана при продуктивності 2 м³/годину має підвищене розшарування та не відповідає нормативним вимогам. При продуктивності 5 та 9 м³/годину результати повністю відповідають нормативним вимогам (6,9% при регламентованому показнику 7%). Незадовільність результатів на низькій

продуктивності агрегату можна пояснити тим, що при тонкому подрібненні жирових кульок відбувається їх наступне групування.

ВИСНОВКИ

Проведені випробування підтвердили можливість використання роторно-динамічного гомогенізатора для деяких харчових технологій. Питанням, що потребує подальшого вивчення, є визначення механізму регулювання роботи гомогенізатора в залежності від характеристик робочого середовища.

У порівнянні з плунжерними гомогенізаторами роторно-динамічний має значно менші габаритні розміри та значно меншу потужність (рис.3.63).

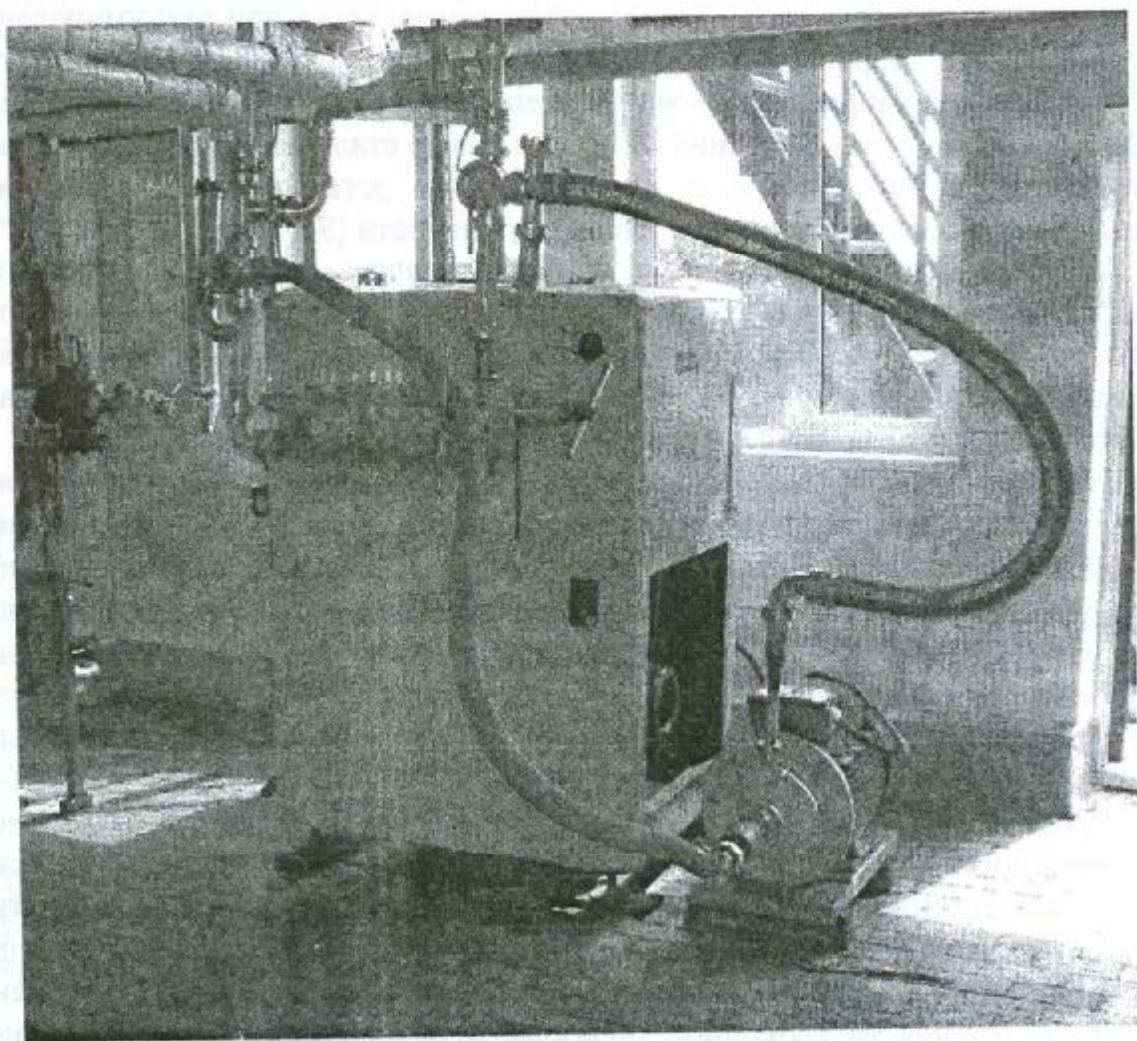


Рисунок 3.63 – Роторно-динамічний та плунжерний гомогенізатори в умовах ТОВ "Добряна", м. Суми