



КГУ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

На правах рукописи

ШАКИРОВ РУСЛАН АЙВАРОВИЧ

**ОПТИМАЛЬНЫЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПОВЕРХНОСТНЫХ ИНТЕНСИФИКАТОРОВ ТЕПЛООБМЕНА**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор, К.Х. Гильфанов

Казань 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. Анализ исследований поверхностной интенсификации теплообменного оборудования вихрегенераторами различной формы	15
1.1. Сферические выемки	16
1.2. Полусферические выступы	26
1.3. Кольцевые выступы	30
1.4. Цилиндрические выемки	34
1.5. Спиральные выступы и спиральные проволочные вставки	38
1.6. V–образные углубления.....	42
1.7. Эллиптические выемки.....	43
1.8. Подковообразные выемки	45
1.9. Выводы по 1 главе и постановка задач исследования.....	49
ГЛАВА 2. Разработка метода исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров поверхностных теплообменных устройств	52
2.1. Методика обобщения результатов исследований поверхностной интенсификации теплообмена	52
2.2. Объект исследования. Фазификация режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена по энергоэффективности теплообменного оборудования	55
2.3. Методика формирования базы данных экспериментальных исследований интенсификации трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств.....	55
2.3.1. Нормализация параметров базы данных	61
2.3.2. Устранение аномалий, связанных с погрешностью измерения или интерпретации экспериментальных данных	62
2.4. Построение исходной нейросетевой модели поверхностной интенсификации теплообмена	65
2.4.1. Методика построения нейросетевой модели	65

2.4.2. Структура и математическая модель нейронной сети	66
2.4.3. Разработка исходной модели ИНС и оценка ее ошибки.....	67
2.4.4. Поиск оптимальной точки отсечения классов решений нейросетевой модели поверхностной интенсификации теплообмена	69
2.4.5. Экспериментальная оценка ошибки и точности нейросетевой модели	Ошибка! Закладка не определена.
2.5. Оптимизация структуры нейросетевой модели	76
2.6. Разработка инструментального программного обеспечения, реализующего предложенный метод исследования.....	83
2.6.1. Средства разработки	85
2.6.2. Структура и описание исходного кода инструментального программного обеспечения.....	88
2.6.3. Функционирование инструментального программного обеспечения.....	91
2.7. Выводы по 2 главе.....	94
ГЛАВА 3. Программное обеспечение реализующий метод, результаты исследования и анализ согласования с экспериментальными значениями...	99
3.1. Прикладное программное обеспечение исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы	99
3.1.1. Тепловая эффективность, гидравлическое сопротивление и теплогидравлическая эффективность	100
3.1.2. Режимные и геометрические характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена	107
3.1.3. Оптимизация поверхностной интенсификации теплообмена	108
3.2. Тестирование и верификация результатов исследований в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена	111
3.2.1. Тепловая эффективность	111

3.2.2. Гидравлическое сопротивление.....	114
3.2.3. Теплогидравлическая эффективность.....	117
3.2.4. Режимные и геометрические характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена.....	120
3.3. Согласование установленных оптимальных характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена с результатами экспериментальных исследований.....	123
3.4. Выводы по 3 главе.....	128
ГЛАВА 4. Энергоэффективность теплообменных устройств с трубчатыми и пластинчатыми теплообменными поверхностями и способ их интенсификации.....	130
4.1. Методика оценки энергоэффективности поверхностных теплообменных устройств.....	130
4.2. Энергоэффективность теплообменного оборудования с трубчатыми теплообменными поверхностями.....	132
4.3. Энергоэффективность теплообменного оборудования с пластинчатыми поверхностями теплообмена.....	135
4.4. Анализ установленных взаимосвязей между режимными и геометрическими характеристиками поверхностных интенсификаторов теплообмена.....	138
4.5. Способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования.....	144
4.6. Интенсификация теплообменного устройства охлаждения природного газа	151
4.7. Выводы по 4 главе.....	161
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	164
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	167
Приложение 1.....	187
Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.....	187
Приложение 2.....	190
Справка об использовании результатов диссертационной работы.....	190
Приложение 3.....	191

Оптимальные параметры геометрических и режимных характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена	191
---	-----

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Энергоэффективность технологических процессов – одна из центральных проблем многих отраслей отечественной промышленности. Технологические процессы любого производства связаны с многократным преобразованием энергии в различных теплообменных устройствах. Поэтому энергоэффективность всего производства напрямую зависит от их эффективности. Стремление к повышению энергоэффективности теплообменного оборудования обуславливает использование различных форм поверхностных пассивных интенсификаторов теплообмена. Интерес к такому типу интенсификаторов продолжает увеличиваться в связи с их уникальными тепловыми и гидравлическими характеристиками. Они позволяют снизить массогабаритные характеристики и значительно повысить эффективность теплообменных устройств.

Степень научной разработанности проблемы. Существует обширная база данных в научно-технической литературе по интенсификации теплообменного оборудования, составляющая около девяти тысяч источников. Исследованиями в области интенсификации трубчатых и пластинчатых теплообменных поверхностей занимались российские и зарубежные ученые, область интересов которых **сферические, V-образные, эллиптические, цилиндрические и подковообразные выемки, полусферические, кольцевые и спиральные выступы, спиральные проволочные вставки:** Щелчков А.В., Попов И.А., Исаев С.А., Кикнадзе Г.И., Гачечиладзе И.А., Федоров И.Г., Афанасьев В.Н., Chyu M.K., Терехов В.И., Шукин А.В., Шукин В.К., Гортышов Ю.Ф., Ligrani P.M., Хабибуллин И.И., Кесарев В.С., Presser K.H., Mahmood G.I., Нагога Г.П., Леонтьев А.И., Туркин А.В., Мунябин К.Л., Готовский М.А., Burgess N.K., Hwang S.D., Moon H.K., Zhou F., Халатов А.А., Шанин Ю.И., Bunker R.S., Дрейцер Г.А., Калинин Э.К., Мигай В.К., Koch R., Hwang S.D., Миронов О.Н., Легкий В.М., Закиров С.Г., Nunner W., Олимпиев В.В., Bunker R.S., Скрыпник А.Н., Назмеев Ю.Г., Цынаева А.А. и др. Исследованиями охвачены различные режимы и теплофизические свойства

обтекающего потока и стенки с весьма широким спектром опытных и расчетных методов.

Несмотря на большое количество исследований, полученные результаты весьма противоречивы. Существующие результаты обобщения исследований не позволяют проектировать теплообменное оборудование с интенсифицированными теплообменными поверхностями. Разнообразие геометрических характеристик пассивных поверхностных интенсификаторов теплообмена, а также сложность гидромеханических и тепловых процессов не позволяют обобщить результаты исследований общепринятыми уравнениями сохранения. По результатам некоторых исследований получены обобщающие эмпирические формулы в форме зависимости чисел Нуссельта от чисел Рейнольдса в диапазоне параметров проведенных экспериментов.

Целью работы ставилось разработка метода исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы, с обеспечением достоверности работы с параметрами за пределами диапазонов экспериментальных исследований, а также способа интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками.

Задачи исследования, решаемые для достижения поставленной цели:

1. Определение геометрических и теплофизических факторов поверхностной интенсификации теплообмена, влияющих на тепловые и гидромеханические характеристики теплообменного оборудования. Фашификация объекта исследования.

2. Создание базы данных по характеристикам пассивных интенсификаторов трубчатых и пластинчатых теплообменных поверхностей с учетом конкретных теплофизических и гидромеханических условий экспериментальных исследований различных авторов. Нормализация параметров сформированной базы данных.

3. Разработка методики обобщения результатов экспериментальных исследований в области повышения энергоэффективности поверхностных теплообменных устройств.

4. Реализация алгоритмов обучения и формирования искусственной нейронной сети (далее – ИНС) для исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических характеристик пассивных поверхностных интенсификаторов теплообмена.

5. Разработка программного обеспечения нейросетевого моделирования (далее – НС-моделирование) эффективности теплообмена, гидравлического сопротивления и теплогидравлической эффективности трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы.

6. Анализ согласования полученных результатов исследования в диапазоне параметров экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена.

7. Разработка способа интенсификации по режимным характеристикам трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств.

8. Разработка компьютерной модели оптимальных поверхностей теплообмена в целом и геометрических характеристик для каждого типа поверхностных интенсификаторов.

Методы исследования. Для реализации метода исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена требуются методы, позволяющие обобщить результаты всех исследований и работать за пределами диапазонов экспериментальных исследований. Одним из таких методов является НС-моделирование, которое позволяет сформировать взаимосвязи между тепловыми и гидромеханическими характеристиками поверхностных интенсификаторов теплообмена. Это дает возможность работать с данными, не вошедшими в диапазон параметров, полученные опытным путем, что

в свою очередь позволяет обобщить результаты экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообменного оборудования.

Для решения задач диссертационного исследования использованы методы системного анализа, математического моделирования, ИНС, методы оптимизации – стохастический градиентный спуск, бутстрэпирования, ROC-анализа, объектно-ориентированного программирования. Построение модели ИНС осуществлялось посредством написания программного кода на языке Python 3.7, с применением библиотек Keras и TensorFlow.

Объект исследования: теплообменное оборудование с трубчатыми и пластинчатыми теплообменными поверхностями с пассивными интенсификаторами различной формы.

Предметом исследования являются теплогидравлические характеристики трубчатых и пластинчатых теплообменных поверхностей с различными типами пассивных интенсификаторов теплообмена, оптимальные комплексные теплофизические и гидромеханические процессы, их обобщение в форме компьютерной программы для повышения энергоэффективности поверхностных теплообменных устройств.

Соответствие диссертации паспорту специальности 01.04.14 - «Теплофизика и теоретическая теплотехника» по формуле специальности: исследования по процессам переноса тепла и массы в сплошных средах; имеющие целью обоснование методов расчета термодинамических и переносных свойств в различном агрегатном состоянии, выявление механизмов переноса массы, импульса и энергии при конвекции; обоснование и проверку методов интенсификации тепло- и массообмена и тепловой защиты. По областям исследований:

п. 5: «Экспериментальные и теоретические исследования однофазной, свободной и вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров теплопередающих поверхностей» - установление геометрических и теплофизических факторов, действующих на тепловые и гидромеханические характеристики поверхностных

пассивных интенсификаторов теплообмена, разработка метода исследования, проведение фазификации объекта исследования;

п. 9: «Разработка научных основ и создание методов интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты» - разработка компьютерной модели оптимальных поверхностей в целом и для каждого типа поверхностных интенсификаторов, разработка способа интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного устройства.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Впервые разработан метод исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических характеристик трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы, который позволяет работать с параметрами за пределами диапазонов экспериментальных исследований.

2. Разработан способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования.

3. Впервые разработана методика НС-моделирования энергоэффективности трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами теплообмена в виде сферических, V-образных, эллиптических, цилиндрических и подковообразных выемок, а также полусферических, кольцевых и спиральных выступов и проволочных вставок.

4. Сформирована база данных по характеристикам пассивных поверхностных интенсификаторов теплообмена с учетом конкретных теплофизических и гидромеханических условий экспериментальных исследований.

5. Произведено обучение ИНС и тестирование выборки по относительным коэффициентам теплообмена, гидравлического сопротивления и теплогидравлической эффективности при поверхностной интенсификации теплообмена, что впервые позволило установить характерные логические

взаимосвязи между режимными и геометрическими параметрами трубчатой и пластинчатой теплообменной поверхности.

6. Произведена оптимизация интенсифицированной поверхности теплообменного оборудования по тепловым и гидравлическим критериям.

7. Впервые произведено обобщение результатов экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке метода исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы, который позволяет работать с параметрами за пределами диапазонов экспериментальных исследований. Также в разработке методики НС-моделирования тепловой эффективности, гидравлического сопротивления, теплогидравлической эффективности трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств, геометрических и режимных характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена. Установление характерных логических взаимосвязей между характеристиками поверхностных интенсификаторов теплообмена, позволяет обобщить результаты экспериментальных исследований.

Практическая значимость результатов диссертационной работы обуславливается разработкой способа интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования, а также разработкой комплекса прикладных программ, реализующих предложенный метод исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы. Полученные результаты позволяют проектировать энергоэффективные теплообменные аппараты, отличающиеся уменьшенными массогабаритными параметрами. Разработанный способ интенсификации используется при охлаждении природного газа в АВО газа и позволяет обеспечить энергоэффективный теплообмен между охлаждающим

воздухом и сжатым природным газом на выходе компрессорной станции.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается использованием апробированных методов компьютерного и математического моделирования, сравнением результатов НС-моделирования с фактическими значениями экспериментальных исследований.

Автор защищает:

1. Метод исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы.

2. Способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного устройства.

3. Базу данных экспериментальных исследований по теплообмену и гидравлическому сопротивлению для сферических, цилиндрических, V-образных, эллиптических и подковообразных выемок, полусферических, кольцевых и спиральных выступов, спиральных проволочных вставок.

4. Методику подготовки и формирования экспериментальных данных исследований пассивной интенсификации теплообменного оборудования, а также фазификацию объекта исследования по тепловой, гидравлической и теплогидравлической эффективности.

5. Методику обобщения результатов экспериментальных исследований пассивной поверхностной интенсификации трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств.

6. Результаты исследования и их согласование с результатами экспериментальных исследований.

7. Результаты НС-моделирования тепловой эффективности, гидравлического сопротивления и энергоэффективности поверхностных теплообменных аппаратов, режимных и геометрических характеристик

поверхностных интенсификаторов теплообмена, а также результаты оптимизации поверхностной интенсификации теплообмена в среде ИНС.

8. Программное обеспечение, реализующее предложенные в диссертационной работе методы и алгоритмы, позволяющие обобщить результаты экспериментальных исследований и установить взаимосвязи между тепловыми и гидромеханическими характеристиками поверхностных интенсификаторов теплообмена.

Реализация результатов работы. Результаты исследования включая сформированную базу экспериментальных исследований по теплообмену и гидравлическому сопротивлению, разработанную нейросетевую модель поверхностной интенсификации теплообмена, результаты НС-моделирования тепловых и гидромеханических характеристик поверхностных интенсификаторов применяются в инновационной и проектной деятельности ООО «Газпром трансгаз Чайковский». Разработанный по результатам диссертационного исследования способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками реализован и применяется при эксплуатации устройства охлаждения компримированного природного газа на выходе компрессорной станции.

Личный вклад автора. Основные результаты получены автором лично под руководством д.т.н., проф. Гильфанова К.Х.

Апробация работы. Основные результаты опубликованы и обсуждались на 13 конференциях: XVI Производственно-техническая конференция молодых ученых и специалистов ООО «Газпром трансгаз Уфа» (г. Уфа, 17 декабря 2020 г.), XXXIII Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» (г. Казань 14-18 сентября 2020 г.), Международный молодежный научный форум «Ломоносов» (г. Москва 13-17 апреля 2020 г.), X Научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов "Новые направления и тренды в инновационной деятельности на предприятиях газовой промышленности ООО "Газпром трансгаз Казань" (г. Казань, 12-14 декабря 2019 г.), XXIV Международная молодежная научная конференция «XXIV Туполевские

чтения (школа молодых ученых)» (г. Казань, 7–8 ноября 2019 г.), Международная научно-техническая конференция "Интеллектуальные энергетические системы" (г. Казань, 18-20 сентября 2019 г.), XIV Международная молодежная научная конференция «Гинчуринские чтения» (г. Казань, 25 мая 2019 г.), Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (г. Москва, 08 апреля 2019 г.), XII научно – техническая конференция молодых ученых и специалистов ООО «Газпром трансгаз Чайковский» (г. Чайковский, 4-5 декабря 2018 г.), III Международная научно-практическая конференция молодых ученых «Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии» (г. Альметьевск, 14-17 ноября 2018 г.), Международная научно-практическая конференция «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли» (г. Альметьевск, 14-17 ноября 2018 г.), X Международная научно-практическая конференция «Водно-энергетический форум» (г. Казань, 2 ноября 2018 г.), IX Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» (г. Казань, 1-5 октября 2018 г.).

Публикации. Основное содержание работы изложено в 14 публикациях, из которых: 2 в рецензируемых журналах из перечня ВАК МОН РФ, 3 зарегистрированы в базе данных Scopus/Web of Science, 8 в журналах, зарегистрированных в РИНЦ. В Федеральной службе по интеллектуальной собственности (Роспатент) зарегистрированы 3 программы для ЭВМ.

Содержание и объем работ. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованных источников из 170 наименований и приложений. Работа изложена на 183 страницах машинописного текста и включает 85 рисунка, 28 таблиц.

ГЛАВА 1. Анализ исследований поверхностной интенсификации теплообменного оборудования вихрегенераторами различной формы

Существуют две формы интенсификации теплообмена: активные, при котором положительный эффект интенсификации теплообмена достигается за счет использования внешней энергии и пассивные, не требующие дополнительной энергии. Последние, продолжают вызывать интерес исследователей в связи с возможностью значительного повышения энергоэффективности теплообменных устройств без дополнительных внешних источников энергии.

Поверхностные интенсификаторы остаются одним из перспективных способов пассивной интенсификации теплообменной поверхности. Это связано с тем, что интенсификация достигается в результате разрушения только вязкостного подслоя потока, не оказывая влияния на основной поток [1]. Задача повышения эффективности теплообмена решается путем воздействия на поток пристенной области, где плотность теплового потока по нормали к поверхности намного меньше, чем в области внешнего потока. Это подтверждается результатами исследования [3], где установлено, что в пристенном основном потоке срабатывается не более 4% теплового перепада, а в вязкостном и переходных слоях потока 74% и 22% соответственно. В ламинарном слое потока срабатывается 65÷75% теплового перепада между теплообменной поверхностью и потоком [3]. Это подтверждает эффективность поверхностной интенсификации теплообмена.

Количество публикаций по данному направлению ежегодно увеличивается. Однако анализ результатов данных исследований, показывает, что выбор формы поверхностных интенсификаторов не всегда обоснован и часто носит случайный характер. Несмотря на различие форм поверхностных интенсификаторов, повышение эффективности теплообмена достигается благодаря общим физическим принципам, для эффективного практического применения которых требуется обобщение результатов экспериментальных исследований. Обзор публикаций в области поверхностной интенсификации различными формами завихрителей потока выполнен на базе исследований [1–118, 128, 129, 131–152].

1.1. Сферические выемки

Интерес к данному типу поверхностных интенсификаторов теплообменных устройств начал увеличиваться после публикаций результатов исследований [5, 6], в которой предложена концепция самоорганизующихся торнадоподобных течений для выемок со сглаженными кромками. Первые результаты исследований теплоотдачи и гидравлического сопротивления в каналах со сферическими выемками опубликованы еще в 60-х годах XX века [7]. Результаты исследований, посвященные интенсификации теплообмена сферическими выемками получены в работах Щелчкова А.В. [1, 50], Кикнадзе Г.И. [5, 18, 30], Гачечиладзе И.А. [6], Федорова И.Г. [7, 16], Афанасьева В.Н. [8, 26], Chyu М.К. [9], Терехова В.И. [10, 17], Щукина А.В. [11], Гортышова Ю.Ф. [12, 49], Ligrani Р.М. [13], Хабибуллина И.И. [14], Кесарева В.С. [15, 22, 23], Presser К.Н. [19], Griffith Т.С. [20], Mahmood G.I. [21, 54], Нагога Г.П. [24, 25], Почуева В.П. [27, 33], Баева С.В. [28], Беленького М.Я. [29, 40], Леонтьева А.И. [31], Александрова А.А. [32], Туркина А.В. [34, 35], Sudarev А. V. [36], Маскинской А.Ю. [37], Шрадера И.Л. [38], Муныбина К.Л. [39], Готовский М.А. [41], Burgess N.K. [42], Hwang S.D. [43], Moon H.K. [44], Zhou F. [45], Халатов А.А. [46], Шанина Ю.И. [47], Bunker R.S. [48], Анисина А.А. [51], Yu Raol [52], Бурцева С.А. [53]. В этих работах продемонстрирована высокая энергетическая эффективность системы сферических выемок, нанесенных на теплообменную поверхность теплообменных устройств.

Основные геометрические параметры сферических выемок представлены на рисунке 1.1, где t – продольный шаг сферических выемок, h , d_c – глубина и диаметр интенсификаторов, d_c – диаметр трубы, D – гидравлический диаметр трубы.

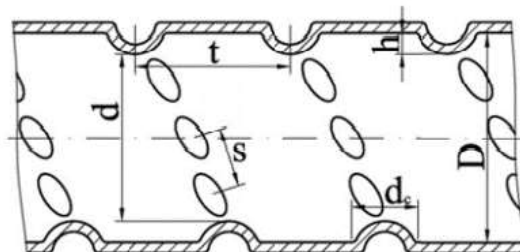




Рисунок 1.1 – Схема нанесения сферических выемок на теплообменную поверхность [1]

Одним из первых экспериментальные исследования вынужденного турбулентного конвективного теплообмена на плоской стенке с относительно неглубокими сферическими выемками выполнены авторами А.И. Леонтьевым и В.Н. Афанасьевым [8] и М. Chyu [9]. Обзор литературы посвященной поверхностной интенсификации теплообмена сферическими выемками выполнены: В.И. Тереховым в [10], А.В. Щукиным [11], Ю.Ф. Гортышовым, И.А. Поповым и авторами работы в [12] и Ф. Лиграни в [13]. По результатам обзора установлено, что завихрители в форме сферических выемок обеспечивают конфузорно – диффузорное течение без завихрения в основном потоке.

Поверхностные интенсификаторы в виде сферических выемок реализуются в теплообменных устройствах в двух типах: сферические выемки отрывного типа ($h/d > 0,1 \div 0,2$) и безотрывные ($h/d < 0,1 \div 0,2$) [14]. Принципиальные отличия по физическим образованиям вихрей приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Интенсификаторы в виде сферических выемок, имеющие принципиальные различия между собой по физическим принципам образования вихрей [14]

Тип интенсификатора теплообмена	Модель образования крупных вихрей	(Nu_{cp}/Nu_0)	$(Nu/Nu_0) / (\xi/\xi_0)$	Примечание
Сферическая выемка отрывного типа  [6]	Самоорганизующиеся крупномасштабная вихревая структура	2,7	0,84	$h/d > 0,1 \div 0,2$
Сферическая выемка безотрывная  [6]	Вихри Тейлора – Гертлера	1,5	1	$h/d < 0,1 \div 0,2$

Важно отметить возникновение циркуляционного течения, в результате чего образуется замкнутый контур, где одна часть поступающего в выемку потока выносится во внешнее течение, а другая возвращается в выемку (рисунок 1.2).

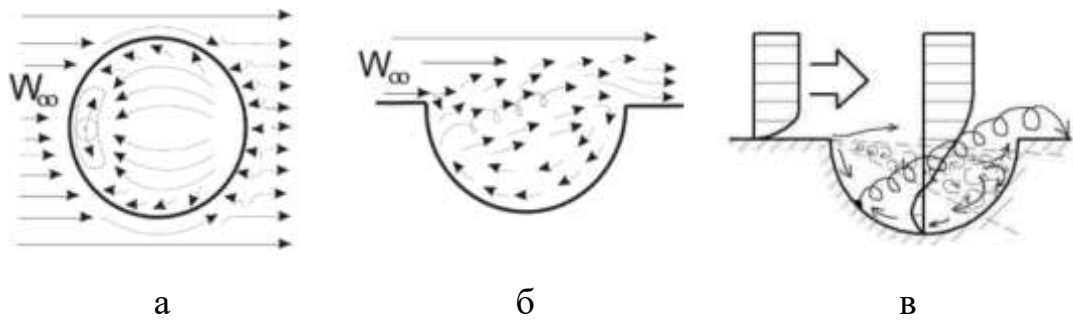


Рисунок 1.2 – Схема течения (а, б) и обтекания (в) в полусферической выемке [15]

В работе В.С. Кесарева и А.П. Козлова [15], показано, что эпицентры вихрей по отношению к продольной плоскости симметрии выемки расположены под углом $\pm 45^\circ$. Расстояние от дна выемки до эпицентра вихрей составляет $(0,25 \div 0,3)h$. Средняя скорость возвратного течения составляет $0,4W$ [15]. Показано, что образование вихрей происходит поочередно в правой и левой половине выемки.

В исследовании отрывного обтекания сферических выемок В.И. Терехова [17], показаны результаты измерений распределения давления на поверхности с выемкой (рисунок 1.3). Полученные результаты для скоростей $v_0 = 1,0$ и $1,5$ м/с показывают, что наличие выемки, не оказывает влияния на предысторию невозмущенного потока перед выемкой [17].

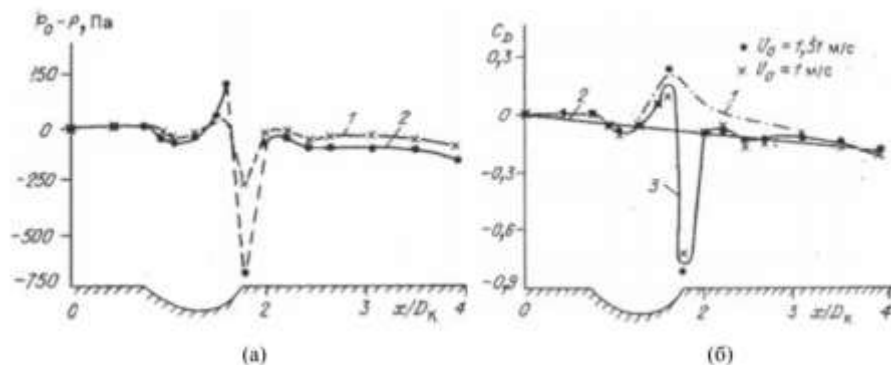


Рисунок 1.3 – Распределение статического давления вдоль канала (а): 1 – $v_0 = 1,51$ м/с; 2 – $v_0 = 1$ и распределение коэффициента давления вдоль канала (б): 1 – данные [17], 2 – по формуле Блазиуса, 3 – аппроксимация данных [17]

Образование крупномасштабных смерчеобразных вихревых структур в выемках отрывного типа происходит по из – за неустойчивости пограничного слоя.

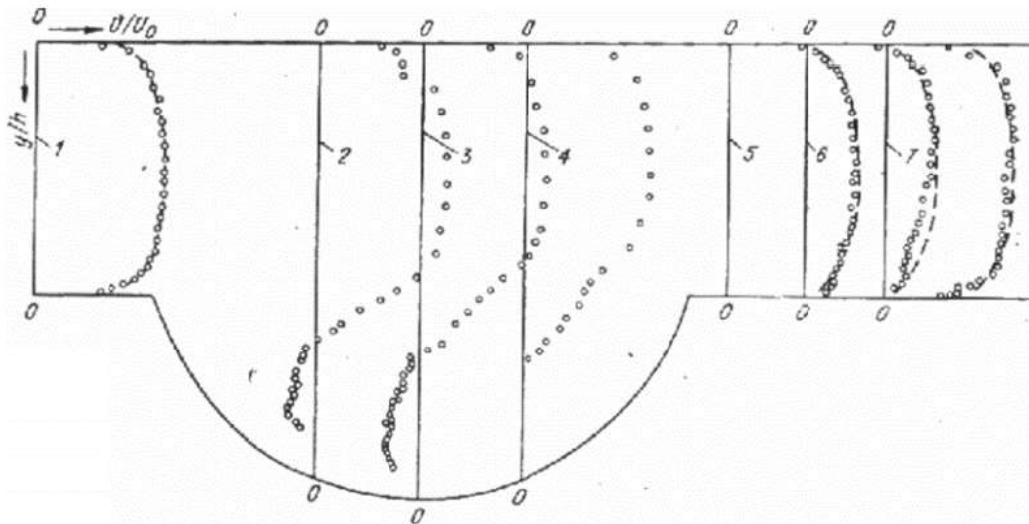


Рисунок 1.4 – Скорость течения по высоте канала [10]: 1 – 15 мм до выемки, 2 – 10 мм от центра выемки, выше по потоку, 3 – центр выемки, 4 – 10 мм от центра выемки ниже по потоку, 5 – 5 мм за выемкой, 6 – 20 мм за выемкой, 7 – 60 мм за выемкой; штриховая линия – $v/v_0 = (y/\delta)^{1/7}$

По рисунку 1.4 видно, что внутри сферической выемки формируются зоны циркуляционного течения с более низкой скоростью, чем скорость основного потока. [10]. Однако, после сферической выемки наблюдается формирование обновленного пограничного слоя с деформированным профилем скорости. По рисункам 1.3 и 1.4 можно сделать вывод, что за полусферической выемкой образуется зона неустойчивого вихревого течения, что положительно согласуется с мнением авторов [10, 17, 18].

В работе [19] авторами сделан вывод, что с увеличением числа Рейнольдса $Re_D > 10^4$ пульсирующий слой основного потока попадает в выемку, где генерирует завихрения. Это в свою очередь оказывает влияние на зависимости, характеризующие тепло-массообмен между выемкой и основным потоком [10].

Картина обтекания сферической выемки подробно описана в работах [10,12,19,20]. На рисунке 1.5 представлена визуализация обтекания сферической выемки, представленной в работе [20], где получены следующие результаты: средняя теплоотдача $Nu/Nu_0 = 2,0$ при $Re_D = 5000 \div 40000$.

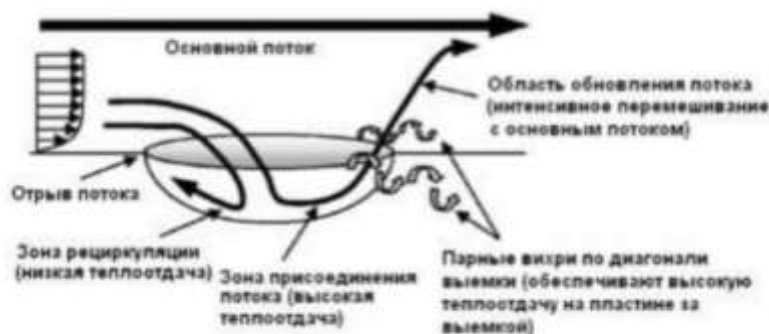


Рисунок 1.5 – Структуры потока сферической выемки [20]

Результаты работы [21] показывают, что в выемках образуются парные вихри, при этом максимальные завихрения наблюдаются в центральной части.

В работах [22, 23] представлены результаты исследований картины отрывного обтекания сферической выемки для диапазона $Re_D = 18,5 \cdot 10^4 \div 33,1 \cdot 10^4$. Течение в выемки образует циркуляционный контур, где в окрестности повторного присоединения пограничного слоя данный контур подпитывается жидкостью, выброс из контура осуществляется смерчеобразной структурой. Увеличение интенсивности турбулентности приводит к возрастанию средней величины поверхностного трения τ по поверхности выемки. Статическое давление p_0 перед выемкой выше статического давления p на поверхности выемки (рисунок 1.6).

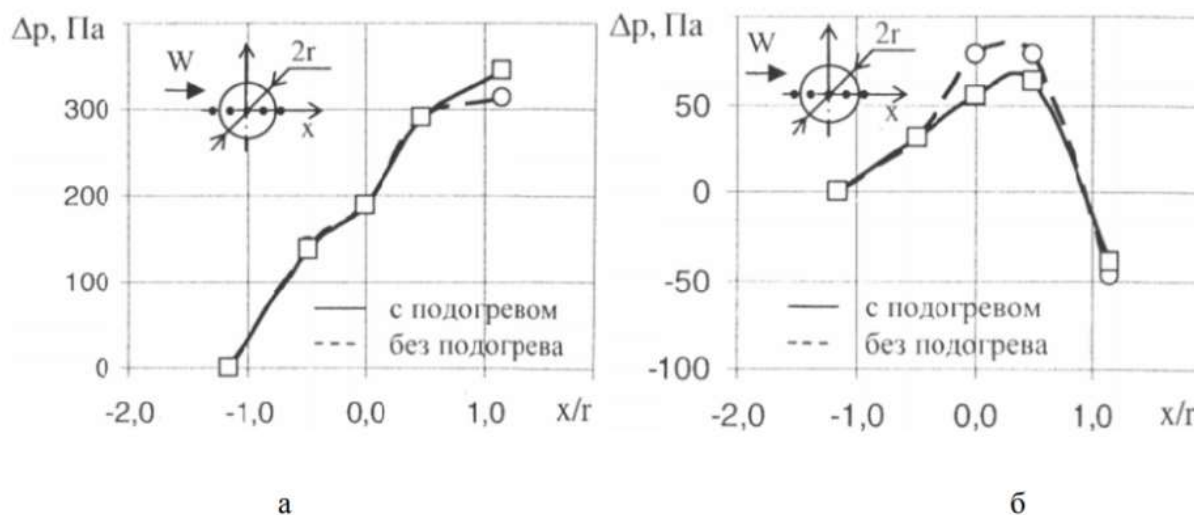


Рисунок 1.6 – Распределение статического давления вдоль оси выемки: а – участок пластины до выемки, $x = 35$ мм; б – участок пластины до выемки, $x = 130$ мм [22]

Также в работах [22, 23] выполнен анализ результатов относительных коэффициентов теплоотдачи α/α_0 . Среднее арифметическое значение α , составляет приблизительно $0,75\alpha_0$ при Tu от 0,5% (рисунок 1.7.) Максимальные значения α/α_0 соответствуют окрестности наветренной кромки выемки. Авторами сделан вывод, что увеличить локальные коэффициенты теплоотдачи α в выемке возможно при устранении зоны вторичного течения. Результаты, полученные в [22, 23] показывают, что с увеличением степени турбулентности основного потока Tu изменяется характер распределения и величина абсолютных значений локальных и среднеарифметических значений α/α_0 по поверхности выемки (рисунок 1.7 б).

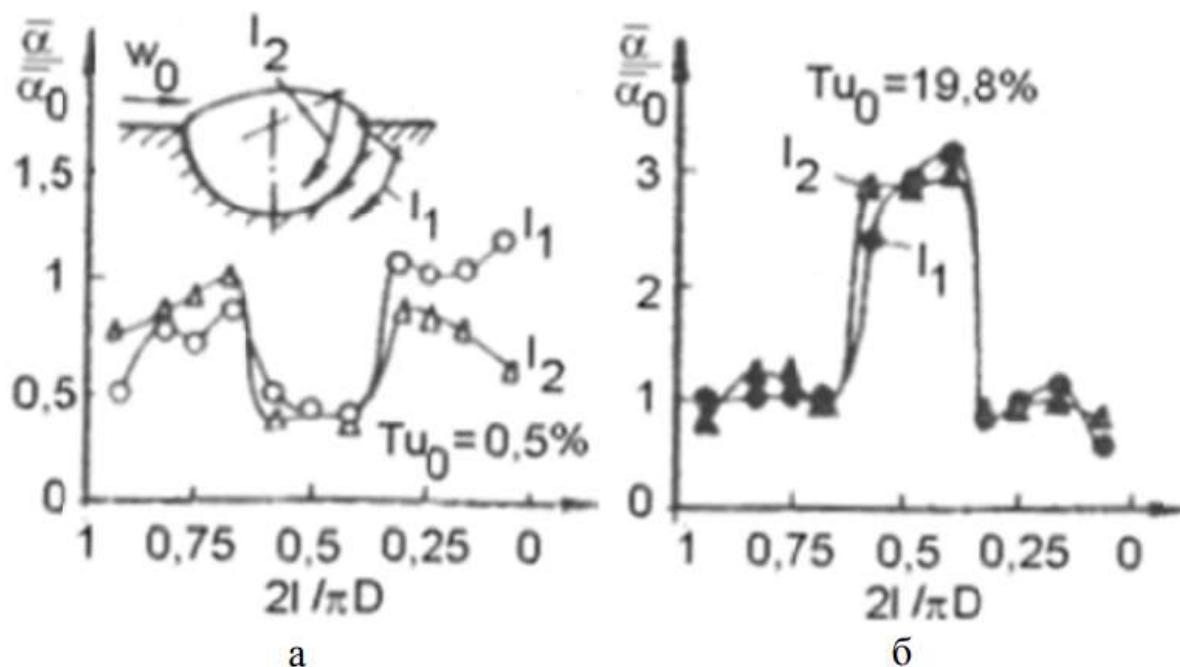


Рисунок 1.7 – Локальные характеристики теплоотдачи сферической выемки [114]

В экспериментальном исследовании Г.П. Нагоги [24] представлены результаты влияния геометрических характеристик на тепловую эффективность. Результаты представлены на рисунке 1.8.

В работе по исследованию распределения коэффициента теплоотдачи α [26] получены результаты, где распределение α в меридиональной плоскости более равномерное, что не согласуется с результатами работы [24, 25] показанных на рисунке 1.8.

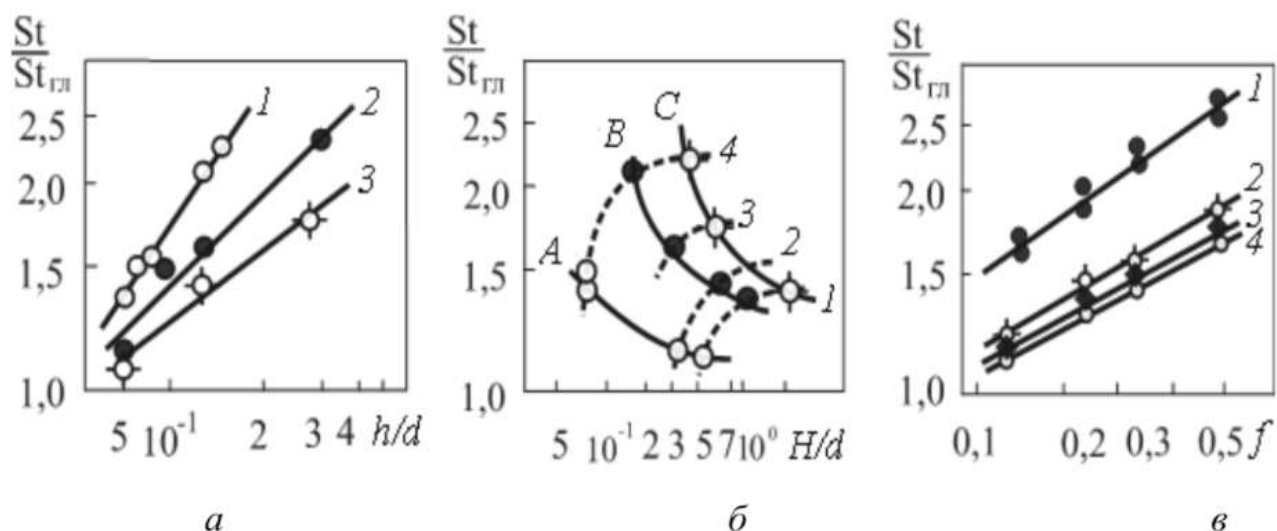


Рисунок 1.8 – Влияние геометрических параметров системы сферических выемок на интенсификацию теплообмена [24]: а – относительной глубины выемок h/d ; $f = 0,35$; 1 – $h/d = 0,17$; 2 – $h/d = 0,33$; 3 – $h/d = 0,66$; б – относительной высоты канала H/d ; $f = 0,35$; А – $H/d = 0,07$; В – $H/d = 0,13$; С – $H/d = 0,28$; 1 – $h/H = 0,13$; 2 – $h/H = 0,2$; 3 – $h/H = 0,33$; 4 – $h/H = 0,8$; в – плотности расположения выемок f : $h/d = 0,13$; 1 – $H/d = 0,17$; 2 – $H/d = 0,33$; 3 – $H/d = 0,66$; 4 – $H/d = 1$

Авторами [19, 27, 28] получены уравнения подобия для конвективного теплообмена, таблица 2. Полученные результаты показывают, что для средней теплоотдачи в сферических выемках при турбулентном режиме значения степени n во всех публикациях различны. Показатель степени n в зависимости изменяется в диапазоне от 0,74 до 1,07.

Изменение коэффициента гидравлического сопротивления в каналах со сферическими выемками в зависимости от числа Рейнольдса рассмотрено в работах [5, 12, 26, 29], таблица 2. По результатам исследований видно, что многие авторы используют зависимость: $\xi = A \cdot Re_D^{-0,23}$.

Авторами исследований [18, 30, 31] определено влияние геометрических параметров на коэффициент гидравлического сопротивления в каналах со сферическими выемками, таблица 1.2. В работах [9, 28, 29, 32 – 53] получены уравнения аппроксимации.

Влияние геометрических параметров на коэффициент гидравлического сопротивления в каналах со сферическими выемками

Уравнения подобия для конвективного теплообмена		
[27]	$Re_D < 7 \cdot 10^3$	$Nu = 0,061 \cdot Re_D^{0,74}$
	$Re_D > 7 \cdot 10^3$	$Nu = 0,04 \cdot Re_D^{0,8} Pr^{0,4}$
[28]	$Re_D = 2300 \div 10^3$	$Nu = 0,03 \cdot Re_D^{0,94} Pr^{0,4}$
[19]	$Re_D = 3 \cdot 10^3 \div 10^4$	$Nu = k \cdot Re_D^{1,33}$
	$Re_D > 10^4$	$Nu = k \cdot Re_D^{0,7}$
Изменение коэффициента гидравлического сопротивления в каналах со сферическими выемками в зависимости от числа Рейнольдса.		
[12]		$\xi = A \cdot Re_D^{-0,23}$
[26], [29]		$\xi = A \cdot Re_D^{-0,25}$
[5]	$Re_D > 2000$	$\xi = 0,0375 Re_D^{-0,25}$
Влияние геометрических параметров на коэффициент гидравлического сопротивления в каналах со сферическими выемками.		
[18, 30]		$\xi/\xi_0 = 1 + 6,5 f \sin[3,14(h/d)]$
[31]		$\xi_{сф} = \frac{1,2406 \cdot \left(\frac{h_{сф}}{d_{сф}}\right)^{2,62}}{\left[Re_h^{0,15} \cdot \left(\frac{H}{d_{сф}}\right)^{3,7} \cdot \left(\frac{h_{сф}}{d_{сф}}\right)^{2,62} \right]}$
Результаты исследований сферических выемок интенсификации теплообмена по тепловой эффективности		
[32]	$Re_D = 6 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^5$	$Nu/Nu_0 = 1,0 \div 1,45$
[33]	$Re_D = 9 \cdot 10^3 \div 9 \cdot 10^4$	$Nu/Nu_0 = 1,21 \div 1,44$
[34]	$Re_D = 3,5 \cdot 10^3 \div 2,2 \cdot 10^4$	$Nu/Nu_0 = 1,35 \div 1,7$
[35]	$Re_D = 5 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^5$	$Nu/Nu_0 = 1,1 \div 2,3$
[36]	$Re_D = 10^4 \div 2 \cdot 10^5$	$Nu/Nu_0 = 1,5 \div 2,75$

[37]	$Re_D = 5 \cdot 10^4$	$Nu/Nu_0 = 1,46$
[38]	$Re_D = 7 \cdot 10^3 \div 21 \cdot 10^3$	$Nu/Nu_0 = 0,98 \div 1,3$
[39]	$Re_D = 3 \cdot 10^3 \div 2,2 \cdot 10^4$	$Nu/Nu_0 = 1,1 \div 2,2$
[29, 40]	$Re_D = 7 \cdot 10^3 \div 21 \cdot 10^3$	$Nu/Nu_0 = 1,4 \div 2,6$
[41]	$Re_D = 15 \cdot 10^3 \div 80 \cdot 10^3$	$Nu/Nu_0 = 1,2 \div 1,6$
[42]	$Re_D = 9 \cdot 10^3 \div 80 \cdot 10^3$	$Nu/Nu_0 = 1,5 \div 2,5$
[9]	$Re_D = 10^4 \div 3 \cdot 10^4$	$Nu/Nu_0 = 2,2 \div 2,7$
[43]	$Re_D = 10^4$	$Nu/Nu_0 = 2,2$
[44]	$Re_D = 11 \cdot 10^3 \div 35 \cdot 10^3$	$Nu/Nu_0 = 1,4 \div 3,1$
[45]	$Re_D = 7 \cdot 10^3 \div 21 \cdot 10^3$	$Nu/Nu_0 = 1,1 \div 2$
[18]	$Re_D = 2,6 \cdot 10^3 \div 14 \cdot 10^3$	$Nu/Nu_0 = 1,8 \div 2,8$
[46]	$Re_D = 1,3 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^4$	$Nu/Nu_0 = 1,2 \div 3,7$
[47]	$Re_D = 2,5 \cdot 10^2 \div 4 \cdot 10^4$	$Nu/Nu_0 = 1,02 \div 1,55$
[28]	$Re_D = 2,3 \cdot 10^3 \div 10^4$	$Nu/Nu_0 = 2 \div 3$
[48]	$Re_D = 2 \cdot 10^4 \div 10^5$	$Nu/Nu_0 = 1,25 \div 2,2$
[49]	$Re_D = 7 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^4$	$Nu/Nu_0 = 1,15 \div 4,2$
[50]	$Re_D = 2 \cdot 10^2 \div 3 \cdot 10^4$	$Nu/Nu_0 = 1,39 \div 3,1$
[51]	$Re_D = 2 \cdot 10^2 \div 10^4$	$Nu/Nu_0 = 1,05 \div 1,19$
[52]	$Re_D = 8,5 \cdot 10^3 \div 60 \cdot 10^3$	$Nu/Nu_0 = 1,58 \div 1,62$
[53]	$Re_D = 0,1 \cdot 10^6 \div 7 \cdot 10^6$	$Nu/Nu_0 = 1,06 \div 1,25$

Рассмотрим исследование распределения локальных чисел Нуссельта в плоском канале высотой $H = 12,7 - 50,8$ мм, шириной $B = 411$ мм и длиной $L = 556$ мм с рельефами сферических выемок, проведённое в работе [54]. Расположение выемок реализовано в шахматном порядке (рисунок 1.9, а). Температурный фактор составлял $T_f/T_w = 0,92 \div 0,94$. Число Рейнольдса $Re_H = (9,8 \div 10,3) \cdot 10^3$. По рисунку 1.9, б видно, что для координаты $X/d = 9,35$ не наблюдается зависимости Nu/Nu_0 от Z/d и H/d . Однако, по рисунку 1.9, в видно, что на плоских поверхностях за выемками, координата $X/d = 8,50$, наблюдается значительное увеличение значений $Nu/Nu_0 = 2 \div 5,5$ раз в зависимости от степени стесненности канала H/d . Наличие в выемке парного вихря и вихревой дорожки за наветренной кромкой формирует в графической зависимости $Nu/Nu_0 = f(Z/D)$ два максимума относительной теплоотдачи в области между выемками (рисунок 1.9, б)

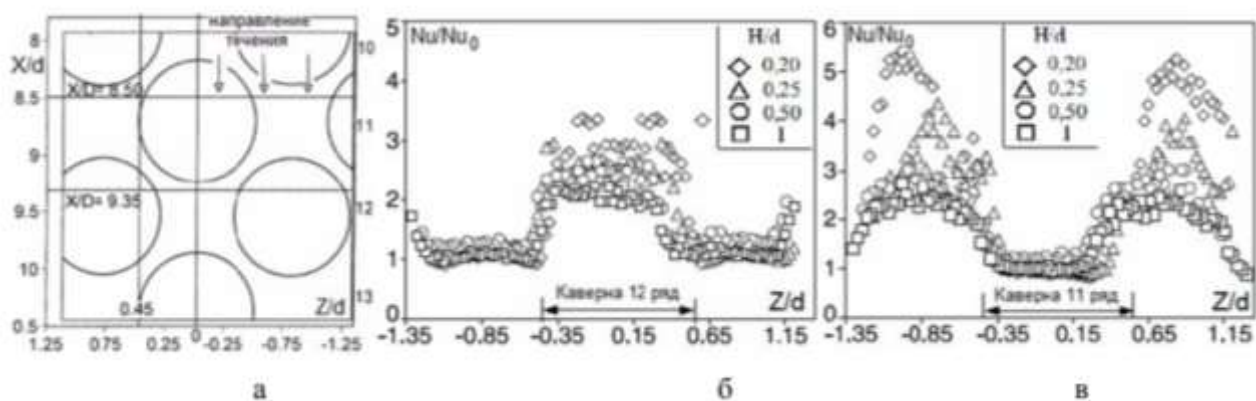


Рисунок 1.9 – Локальные значения Nu/Nu_0 в зависимости от Z/d при различной высоте канала H/d [54]: а – схема поверхности; б – $X/d = 9,35$; в – $X/d = 8,50$

На рисунке 1.10 а представлена графическая зависимость $Nu/Nu_0 = f(X/D)$ для диапазона значений H/D . Области перед выемкой (координата $7,9 < X/D < 8,2$) соответствуют постоянные значения $Nu/Nu_0 = 2$. Ухудшение Nu/Nu_0 наблюдается внутри выемки и в области подветренной кромки (координата $X/d = 8,4 \div 8,7$). При уменьшении значений H/d значение Nu/Nu_0 увеличивается, что позволяет сделать вывод, что Nu/Nu_0 зависит от относительной высоты канала H/d . В точках $X/d = 9,0 \div 9,7$ установлены максимальные значения теплоотдачи. Это положительно согласуется с результатами исследования [22]. Уменьшение H/d приводит к возрастанию масштаба завихрений.

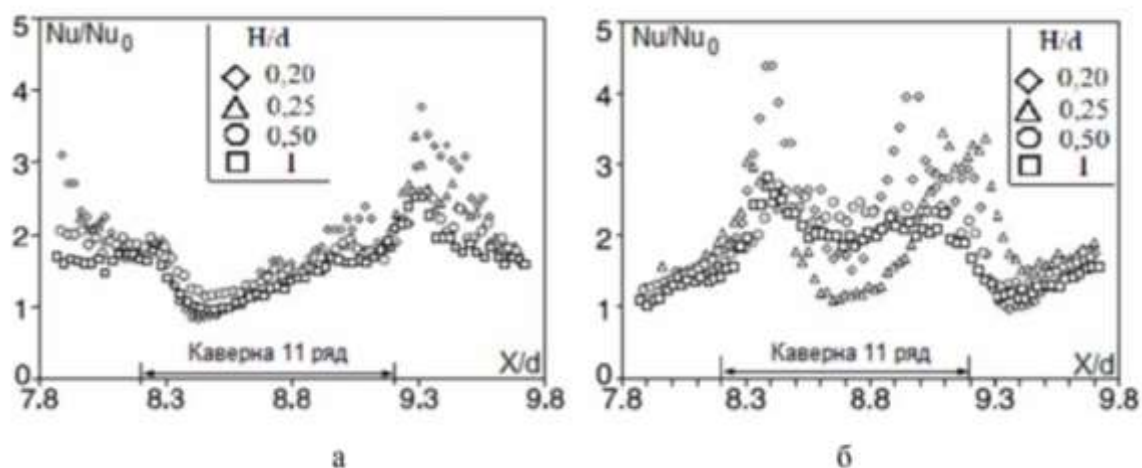


Рисунок 1.10 – Локальные значения Nu/Nu_0 в зависимости от X/d при различных относительных высотах канала H/d [54]: а – $Z/d = 0$; б – $Z/d = 0,45$

Таким образом, обобщающие расчетные зависимости для расчета коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления не получены, несмотря на большое количество экспериментальных работ по исследованию теплогидравлических характеристик каналов с поверхностными интенсификаторами теплообмена в виде сферических выемок. Большинство представленных в обзоре работ (таблица 1.2) направлены на исследование развитого турбулентного течения. Сферические выемки на плоских и цилиндрических поверхностях при их продольном обтекании приводит к росту гидравлического сопротивления в 1,25–2,5 раза. Отмечается, что отсутствуют рекомендации по расчету гидросопротивления и теплообмена в области ламинарных и переходных режимов, не даны границы переходов режимов течения в каналах и на поверхностях со сферическими выемками. Отсутствуют простые и надежные методики и рекомендаций для инженерных расчетов и проектирования теплообменного оборудования.

1.2. Полусферические выступы

Полусферические выступы являются одним из перспективных поверхностных вихрегенераторов применяемых в теплообменном оборудовании. Одним из главных преимуществ, является возможность получить значительный положительный эффект, не сужая проходное сечение трубы. Полусферические выступы формируются методом холодной штамповки на различных поверхностях.

Результаты исследований теплогидравлических характеристик поверхностей с полусферическими выступами представлены в работах Гортышова Ю.Ф. [12, 64], Муныбина К.Л. [39], Bergles A.E. [55], Дрейцера Г.А. [56], Мигай В.К. [57], Koch R. [58], Hwang S.D. [59], Миронова О.Н. [60], Легкий В.М. [61], Chen J. [63].

На рисунке 1.11 представлена схема труб с полусферическими выступами на поверхности с основными геометрическими параметрами поверхностных вихрегенераторов, где t , s – продольный и поперечный шаг выступов, h , d_c – высота и диаметр сферических выступов, d – внутренний диаметр трубы по вершинам выступов, D – гидравлический диаметр канала.

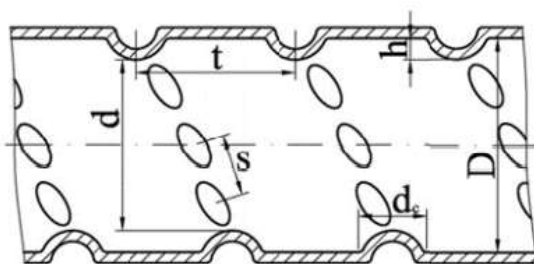


Рисунок 1.11 – Схема нанесения полусферических выступов на теплообменные трубы [1]

Авторами исследования [59] получены результаты по распределению локальных коэффициентов теплоотдачи. Наличие полусферического выступа на поверхности плоского канала приводит к тому, что основной поток воздуха натекает на переднюю кромку выступа и обтекая его формирует подковообразные вихри, образуя при этом застойную зону. (рисунок 1.12).



Рисунок 1.12 – Обтекание сферической выемки [59]

В зоне с минимальной толщиной пограничного слоя и в центре его формирования получены максимум локальных коэффициентов теплоотдачи. Увеличение средней теплоотдачи в 3,7 раз, сопровождается с увеличением коэффициента гидравлического сопротивления в 20 раз.

Исследование влияния поверхностных вихрегенераторов, на коэффициенты теплоотдачи и сопротивления проведено в работе [60]. Безразмерные геометрические параметры: $h/D = 0,0813$, $t/h = 12,5$, $L/D = 0,3$, при $h = 0,004$ м и $L = 7,9$ м., при турбулентном течении воздуха ($Re_D = 2,3 \cdot 10^4 \div 1,5 \cdot 10^5$). Установлено понижение с последующим увеличением местного коэффициента теплоотдачи. Между выступами в зоне продольного шага установлен минимум коэффициента теплоотдачи. Увеличение среднего коэффициента теплоотдачи для пластины с полусферическими выступами составило 30%, чем для гладкой пластины.

В работах [61] и [62] получены результаты, при которых относительная высота выступов h/H не оказывает влияние на теплоотдачу. Максимальные значения коэффициентов теплоотдачи получены при плотности нанесения выступов 0,236. Увеличение составило 17% по сравнению с гладким каналом. Увеличение относительной плотности расположения поверхностных вихрегенераторов приводило к снижению теплоотдачи до уровня гладкого канала. Геометрические параметры: ширина и высота канала $B = 0,4$ и $H = 0,035 - 0,1$ м, высота и диаметр полусферических выступов $h = 0,035$ м и $d_c = 0,07$ м.

Теплоотдача труб диаметром $D = 0,0166$ м с поверхностными вихрегенераторами высотой $h = 0,5 \div 1,5$ мм, диаметром основания $d_c = 2 \cdot 10^{-4} \div 5,5 \cdot 10^{-4}$ м и продольным шагом $t = 8 \cdot 10^{-4} \div 14 \cdot 10^{-4}$ м при вынужденном течении воды ($Re_D = 7 \cdot 10^3 \div 5,2 \cdot 10^4$) исследованы в [63]. Безразмерные геометрические параметры: $d/D = 0,639 \div 0,94$; $t/D = 0,4820,843$. Результаты исследования показали, что увеличение мощности на прокачку теплоносителя на 15–84% приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи на 25–137%.

В исследовании [12] получено максимальное увеличение теплоотдачи в 8 раз, при максимальном увеличении коэффициента гидравлического сопротивления в 20 раз по сравнению с гладким каналом, при диапазоне малых чисел Рейнольдса $Re_D = 10^3 \div 2 \cdot 10^3$. Увеличение чисел Рейнольдса $Re_D > 2 \cdot 10^3$ приводит к уменьшению уровня интенсификации теплоотдачи.

Исследования гидравлического сопротивления и теплоотдачи труб диаметром $D = 0,05$ м и длиной $L = 2$ м с полусферическими выступами представлены в работе [39]. Диапазон чисел Рейнольдса составил $Re_D = 2,5 \cdot 10^3 \div 3,3 \cdot 10^4$. Выступы расположены в трубе в шахматном порядке с шагом $0,02 \div 0,04$ м и высотой от 0,002 до 0,010 м. Увеличение теплоотдачи при поверхностной интенсификации полусферическими выступами составило 3 – 3,5 раз. Максимальное значение теплоотдачи наблюдалось в трубах с наиболее высокими выступами, при этом рост гидравлического сопротивления для самых высоких выступов составил до 6,5 – 8.

В работе [64] представлены результаты исследования гидравлического сопротивления и средней теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования с интенсификацией в виде сферических выступов. Результаты исследования представлены на рисунке 1.13, где показано влияние числа Рейнольдса Re_D и сравнение полученных данных по теплоотдаче в каналах со сферическими выступами и без них при следующих безразмерных параметрах интенсификаторов и канала: $h/D = 0,21 \div 0,5$, $h/H = 0,125 \div 0,5$, $H/D = 0,7 \div 1,68$. При $Re_D = 1000 \div 2000$ коэффициент теплоотдачи возрастает до 8 раз. В области турбулентного режима – до 2,5 раз, при этом рост гидросопротивления опережает рост теплоотдачи.

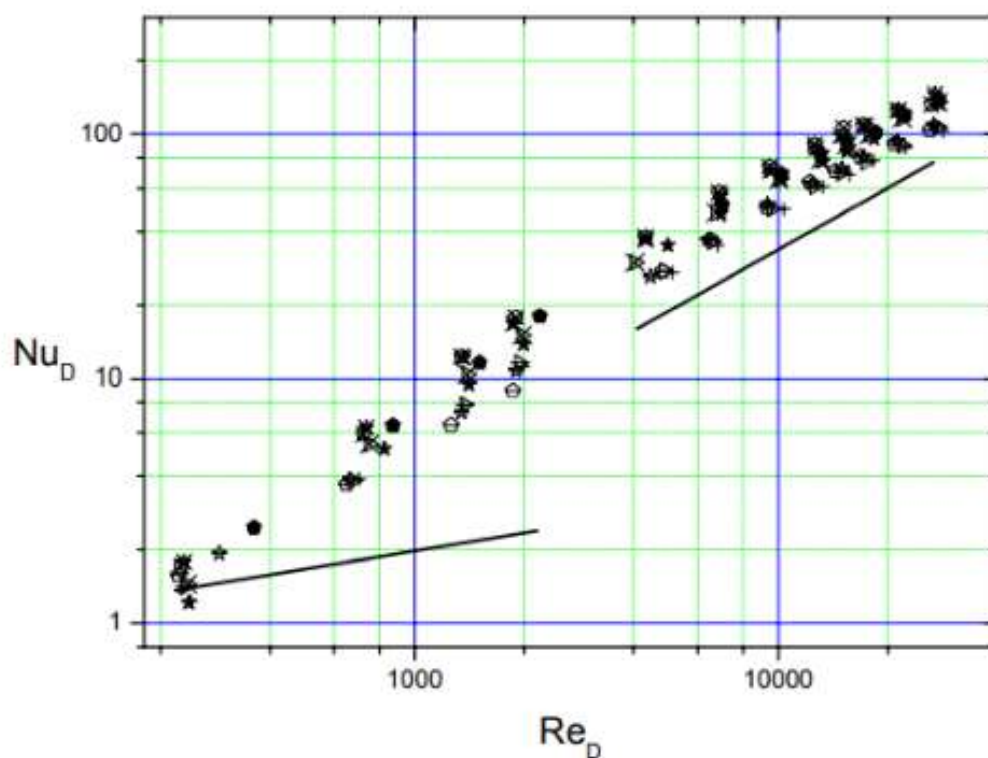


Рисунок 1.13 – Теплоотдача при интенсификации сферическими выступами.

Линии – расчет для гладкого канала, точки эксперименты для канала со сферическими выступами [64]

Обобщение и анализ данных по гидросопротивлению и теплоотдаче позволили авторам исследования [64] получить обобщающие зависимости, представленные в таблице 1.3.

Обобщающие зависимости по гидросопротивлению и средней теплоотдаче в каналах с двухсторонними сферическими выступами [64]

Переходный режим	
$\xi_h = 6451,24 \cdot \frac{\left(\frac{h}{d}\right)^{4,597}}{\left(\text{Re}_h \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^{1,853}\right)}$	$\text{Re}_h = 100 \div 530; H/D = 0,7 \div 1,68; h/D = 0,21 \div 0,5$
Турбулентное отрывное обтекание	
$\xi_h = 16,315 \cdot \frac{\left(\frac{h}{d}\right)^{3,572}}{\left(\text{Re}_h^{0,15} \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^{1,5}\right)}$	$\text{Re}_h = 530 \div 16000; H/D = 0,7 \div 1,68; h/D = 0,21 \div 0,5$
Переходный режим	
$\text{Nu}_h = 0,0039 \cdot \text{Re}_h^{1,1} \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^{(-0,789+3,89 \cdot \left(\frac{h}{D}\right))}$	$\text{Re}_h = 10^3 \div 530; H/D = 0,7 \div 1,68; h/D = 0,21 \div 0,5.$
Турбулентный режим	
$\text{Nu}_h = 0,075 \cdot \text{Re}_h^{0,75} \cdot \left(\frac{h}{D}\right)^{(0,527)}$	$\text{Re}_h = 525 \div 15500; H/D = 0,8 \div 1,77; h/D = 0,22 \div 0,6.$

1.3. Кольцевые выступы

Данный тип интенсификаторов широко применяются для повышения энергоэффективности кожухотрубных теплообменных аппаратов. Основным преимуществом поперечных кольцевые выступов является высокая тепловая эффективность и реализация наиболее рационального способа управления вихревыми структурами.

Геометрические характеристики представлены на рисунке 1.14, где D – внутренний диаметр теплообменной трубы, h – высота кольцевых выступов, d – диаметр отверстия диафрагм, t – расстояние между кольцевыми выступами, s – ширина кольцевых выступов, R – радиус закругления кольцевых выступов [1].

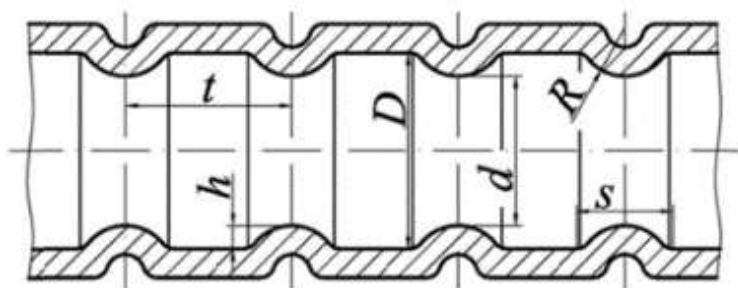


Рисунок 1.14 – Продольный разрез теплообменной трубы с кольцевыми выступами [1]

В работах [1, 12, 58, 67, 69, 70, 71, 72, 73, 74] получены результаты для трех характерных случаев формирования отрывных зон, при следующих значениях относительного шага кольцевых выступов: $t/h = 1 \div 2$, $t/h = 2 \div 4$ и $t/h = 8 \div 96$ рисунок 1.15. Один большой трехмерный вихрь B и два малых вихря в углах A и C наблюдается между кольцевыми выступами при $t/h = 1 \div 2$, рисунок 1.14. При $t/h = 2 \div 4$ характеризуется растягиванием и нестабильностью вихря B (рисунок 1.15, б). При этом наблюдается увеличение в размерах вихря A с параллельным формированием небольшого отрыва потока за передней верхней кромкой выступа. Третий случай характеризуется присоединением потока между выступами при $t/h = 8 \div 96$ (рисунок 1.15) [1].

Таким образом, присоединение потока между выступами способствует интенсификации теплоотдачи. При $t/h < 8$ наблюдается ухудшение теплоотдачи по сравнению с гладкой трубой, в результате полного оттеснения основного потока от поверхности зоной рециркуляции. Увеличение относительного шага t/h также ухудшает теплоотдачу [74].

Исследования конвективного теплообмена для труб с кольцевыми выступами $d/D = 0,95 \div 0,78$, $t/D = 0,36 \div 7,5$ в области турбулентных чисел $Re_D = 5 \cdot 10^3 \div 4 \cdot 10^5$ проведены в работе [57]. Выявлено увеличение теплоотдачи и гидравлического сопротивления $Nu/Nu_0 = 1,3 \div 2,6$ раз и $\xi/\xi_0 = 1,5 \div 17,3$ раза.

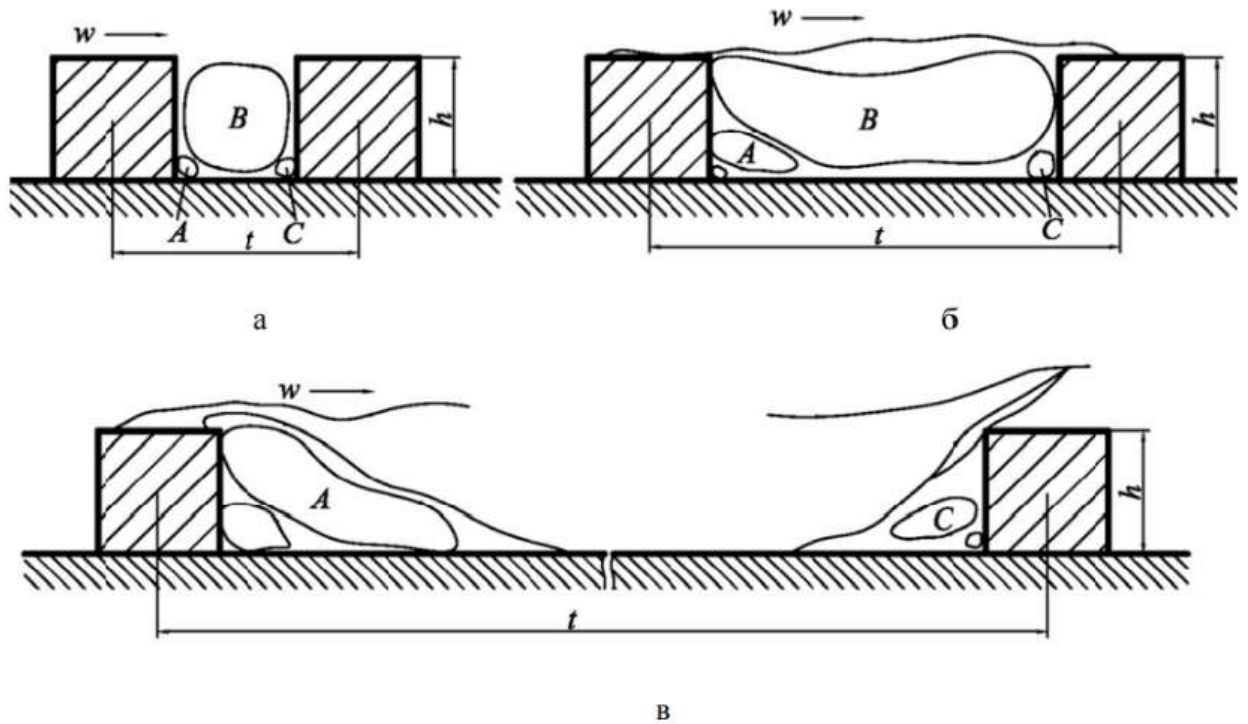


Рисунок 1.15 – Схема структуры вихревых зон между турбулизаторами в безградиентном пограничном случае [1]

В работе [75] представлены результаты исследования теплоотдачи и гидравлического сопротивления труб с кольцевыми выступами при вынужденном течении воздуха ($Re_D = 400 \div 10^5$). Исследования проводились при $d/D = 0,84$, $t/D = 0,408 \div 0,818$, $s/D = 0,16$. Максимально увеличение теплоотдачи ($Nu/Nu_0 = 1,15$ раз) установлено для труб при следующих геометрических и режимных параметрах $d/D = 0,84 \div 0,92$, $t/D = 0,16 \div 3,27$, $s/D = 0,05 \div 3,27$, $Re_D = 400 \div 10^3$. Также, авторами определены границы ламинарно-турбулентного перехода в диапазоне чисел $Re_{кр1} = 2 \cdot 10^3 \div 3 \cdot 10^3$. При плотном расположении кольцевых выступов, ламинарно-турбулентный переход происходит при числах Рейнольдса $Re_{кр1} = 3000$, при этом теплоотдача уменьшается $Nu/Nu_0 = 0,87 \div 0,75$ раз.

В работе [58] исследовались теплогидравлические характеристики труб с кольцевыми выступами с острыми кромками при вынужденном течении воздуха в диапазоне чисел $Re_D = 150 \div 10^5$. Установлено, что зависимость коэффициента гидравлического сопротивления для труб с кольцевыми выступами наблюдается для труб с малым $t/h = 3,92$. Для турбулентного течения $Re_D = 5 \cdot 10^3 \div 10^5$

коэффициент гидравлического сопротивления слабо зависит от Re_D . Уменьшение теплоотдачи наблюдается при низких числах Рейнольдса.

Результаты исследований, полученные авторами [69] согласуются с результатами работ [75,58]. Установлено, что форма выступа оказывает влияние на гидравлическое сопротивление, при этом влияние на теплоотдачу не выявлено.

Авторами [76] представлены результаты исследования теплоотдачи и гидравлического сопротивления труб с кольцевыми выступами ($d/D = 0,8 \div 0,92$, $t/D = 0,33 \div 1,94$; $t/h = 3,3 \div 48,5$) при вынужденном течении трансформаторного масла при $Pr = 170 \div 320$. Диапазон чисел Рейнольдса составлял $Re_D = 30 \div 1,2 \cdot 10^3$. Выявлено, что высота выступов оказывает существенное влияние на теплогидравлическую эффективность. Установлена зависимость $Nu = (d/D)^{-1,93}$ и $\xi = (d/D)^{-1,45}$. Аналогичная зависимость наблюдается и для t/D . Максимальное увеличение теплоотдачи составило $Nu/Nu_0 = 6,5$ раз, при увеличении гидравлического сопротивления в $\xi/\xi_0 = 1,34 \div 2,02$ раза по сравнению с гладкой трубой.

В работах [4, 67] получены результаты исследования по интенсификации теплоотдачи в трубах с кольцевыми выступами при турбулентном течении различных теплоносителей ($Pr = 0,7 \div 50$). Диапазон чисел Рейнольдса составил $Re_D = 10^4 \div 4 \cdot 10^5$, а диапазон безразмерных геометрических параметров $d/D = 0,9 \div 0,87$, $t/D = 0,25 \div 1$. Авторами установлено, что шаг, высота и форма кольцевых выступов оказывают значительное влияние на теплоотдачу и гидравлическое сопротивление труб. При $Re_D = 10^4 \div 4 \cdot 10^5$, теплоотдача возрастает в $Nu/Nu_0 = 1,2 \div 2,2$, при этом гидравлическое сопротивление возрастает $\xi/\xi_0 = 1,05 \div 10,5$ раза по сравнению с гладкой трубой. Также, по результатам исследования получены обобщающие зависимости для расчета средней теплоотдачи и гидравлического сопротивления труб с кольцевыми выступами для области развитого турбулентного течения $Re_D = 10^4 \div 4 \cdot 10^5$, таблица 1.4.

Обобщающие зависимости по гидросопротивлению и средней теплоотдаче в каналах с кольцевыми выступами [67]

$\frac{Nu}{Nu_0} = \left[1 + \frac{\lg Re_f - 4,6}{35} \right] \cdot \left[3 - 2 \cdot \exp \left(\frac{-18,21 \cdot (1-d/D)^{1,13}}{(t/D)^{0,326}} \right) \right]$	$d/D = 0,88 \div 0,98$ $; t/D = 0,25 \div 0,8.$
$\frac{Nu}{Nu_0} = \left[1 + \frac{\lg Re_f - 4,6}{30} \right] \cdot [(3,33 \cdot t/D - 16,33) \cdot d/D + (17,33 - 3,33 \cdot t/D)]$	$d/D = 0,88 \div 0,98$ $; t/D = 0,8 \div 2,5.$
$\frac{Nu}{Nu_0} = \left[1 + \frac{\lg Re_f - 4,6}{7,45} \right] \cdot \left(\frac{1,14 - 0,28 \cdot \sqrt{1-d/D}}{1,14} \right) \cdot \exp \left(\frac{9 \cdot (1-d/D)}{(t/D)^{0,58}} \right)$	$d/D = 0,9 \div 0,97;$ $t/D = 0,5 \div 10.$
$\frac{\xi}{\xi_0} = \left[1 + \frac{100 \cdot (\lg Re_f - 4,6) \cdot (1-d/D)^{1,65}}{\exp(t/D)^{0,3}} \right] \cdot \exp \left[\left(\frac{25 \cdot (1-d/D)^{1,32}}{(t/D)^{0,75}} \right) \right]$	$d/D = 0,9 \div 0,97;$ $t/D = 0,5 \div 10.$
$\frac{\xi}{\xi_0} = \left[1 + (\lg Re_f - 4,6) / \left(3,4 \cdot \frac{Re_f}{10^5} + 6 \right) \right] \cdot (1,3 - \sqrt{d/D - 0,93}) \exp [20,9 \cdot (1-d/D)^{1,05}]$	$d/D = 0,88 \div 0,98$ $; t/D = 0,5.$

1.4. Цилиндрические выемки

Данный тип поверхностных интенсификаторов позволяет снизить гидравлические потери при относительно не сложной технологии их создания на теплообменной поверхности.

В работе [77] авторами представлены результаты исследования локальных коэффициентов поверхностных интенсификаторов в форме цилиндрических выемок, при вынужденном течении воздуха для чисел $Re_D = (1,4 \div 2,5) \cdot 10^4$. Геометрические характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена в виде цилиндрических выемок представлены на рисунке 1.16.

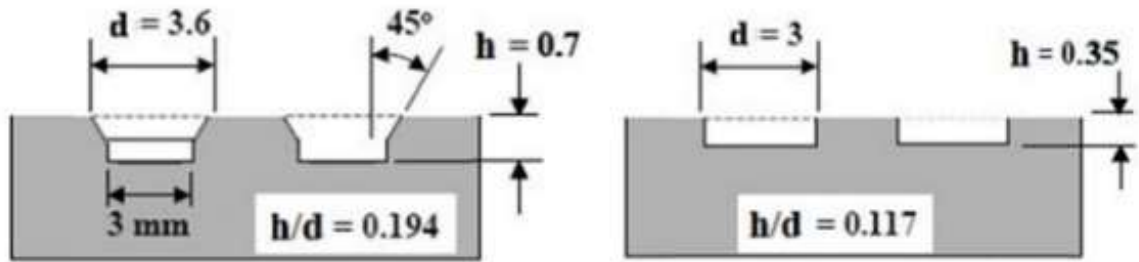


Рисунок 1.16 – Геометрические параметры цилиндрических выемок [77]

По результатам исследования установлено, что цилиндрические выемки позволяют увеличить теплоотдачу на 45% по сравнению с гладким каналом. Это меньше на 17% по сравнению со сферическими выемками, рисунок 1.16. Авторами установлено влияние значения относительной глубины h/d цилиндрической выемки на теплоотдачу. Влияние типа выемки на теплоотдачу для $Re_D = (1,4 \div 1,5) \cdot 10^4$ в сужающемся канале (рисунок 1.17, а) и для $Re_D = (1,3 \div 1,8) \cdot 10^4$ в расширяющемся канале (рисунок 1.17, б) не выявлено. Значительная интенсификация теплообмена достигается при числах $Re_D = 1,8 \cdot 10^4$.

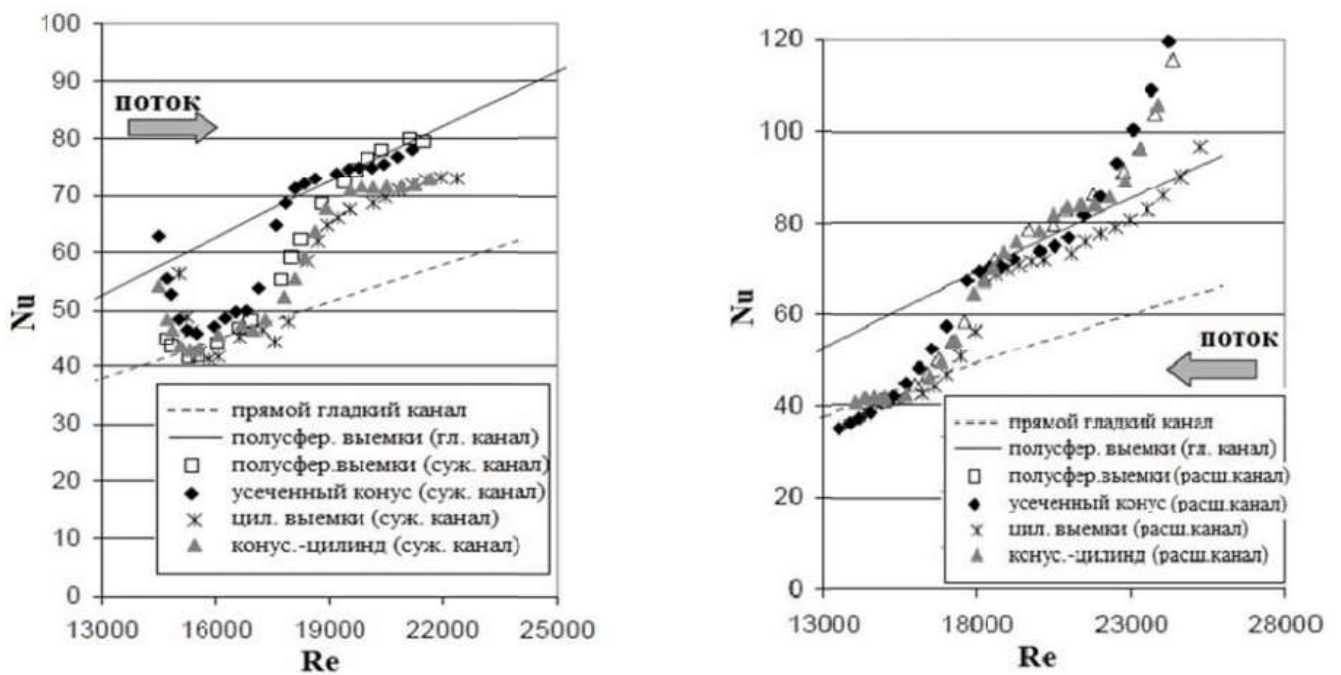


Рисунок 1.17 – Зависимость числа Nu от Re_D для сужающихся (а) и расширяющихся (б) каналов с различными типами выемок [77]

Влияние относительной глубины цилиндрических выемок также подтверждаются результатами исследования [78], где исследованы выемки для чисел Рейнольдса $Re_D = 10^4 \div 3 \cdot 10^4$. При $h/d = 1,0$ установлено увеличение теплоотдачи на 100–150%, при $h/d = 5,0$ на 20–60%.

Исследование турбулентного потока в плоском канале с цилиндрическими выемками для $Re_D = 10^4 \div 6,5 \cdot 10^4$ проведены в работе [79]. Гидравлический диаметр канала D использован в качестве определяющего размера в числе Re_D . В рамках данной работы производилось сравнение средней теплоотдачи для четырех различных видов рельефов. Установлено, что интенсификация теплообмена от цилиндрических выемок выше, чем от сферических. Прирост гидравлического сопротивления достигал 160%, теплоотдачи – от 70% до 120%. Противоположные результаты получены в работе [80], где установлено, что острые кромки, ухудшают конвективный теплообмен.

Структура потока при вынужденном течении воды в канале с цилиндрическими выемками, в диапазоне чисел Рейнольдса $Re_D = 3,2 \cdot 10^3 \div 2,5 \cdot 10^4$ при скоростях потока $w = 0,05 \div 0,5$ м/с проведены в работах [81, 82]. Диаметр цилиндрической выемки d_k использован в качестве определяющего размера в числе Re_D . Диапазон значений относительной глубины выемок составил $h/d = 0,05 \div 0,1$. По результатам исследования определены критические числа Рейнольдса, а также установлено влияние формы и глубины выемок на относительную толщину пограничного слоя, поверхностное трение и объемные флуктуации. Авторами выявлено, что увеличение относительной толщины пограничного слоя до $\delta/h = 0,88 \div 1,18$ оказывает значительное влияние на структуру потока в выемке и за ней. Также установлено, что для неглубоких выемок переход между режимами течения наступает при малых числах Рейнольдса.

Аналогичные результаты получены в работе [83], где методом жидкокристаллической термографии исследовано обтекание одиночной неглубокой цилиндрической выемки ($h/d = 0,1$) при малых скоростях потока. При $Re_D = 5186 \div 8294$ выявлена асимметричность линии тока за выемкой, которая, постепенно увеличиваясь достигает максимума при $Re_D = 16683$ (рисунок 1.18).

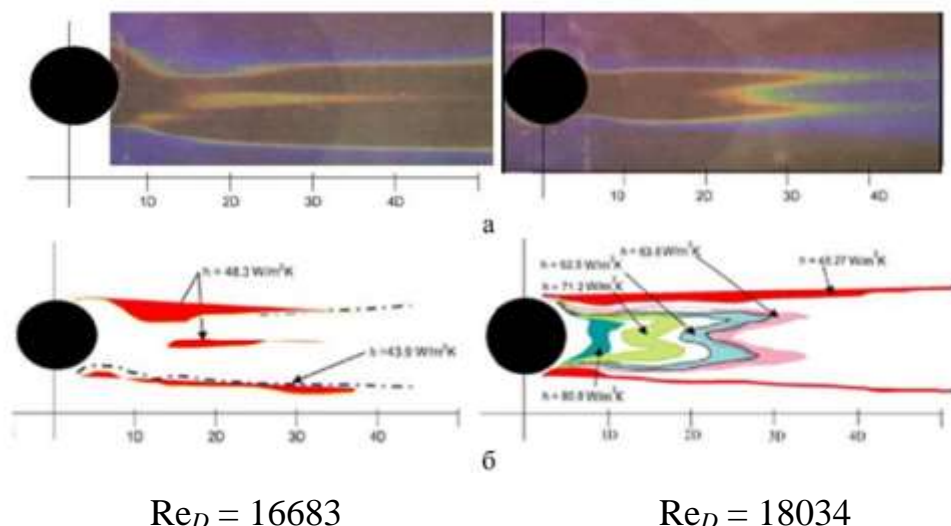


Рисунок 1.18 – Обтекание одиночной цилиндрической выемки [83]: а – след за выемкой; б – локальные коэффициенты теплоотдачи за выемкой

В исследованиях [84, 85] представлены результаты обтекания цилиндрической выемки воздухом при относительной глубине и диаметре выемки $h/d_k = 0,2 \div 0,7$ и $d_k = 76$ мм. Цилиндрическая выемки с геометрическими параметрами $H \times B \times L = 210 \times 610 \times 6500$ мм расположена на расстоянии 4030 мм от начала плоского канала. Симметричность флуктуации локального давления выявлено для относительной глубины $h/d_k = 0,2$, при этом максимум амплитуды флуктуаций локального давления наблюдается у наветренной кромки при $\theta = 180^\circ$.

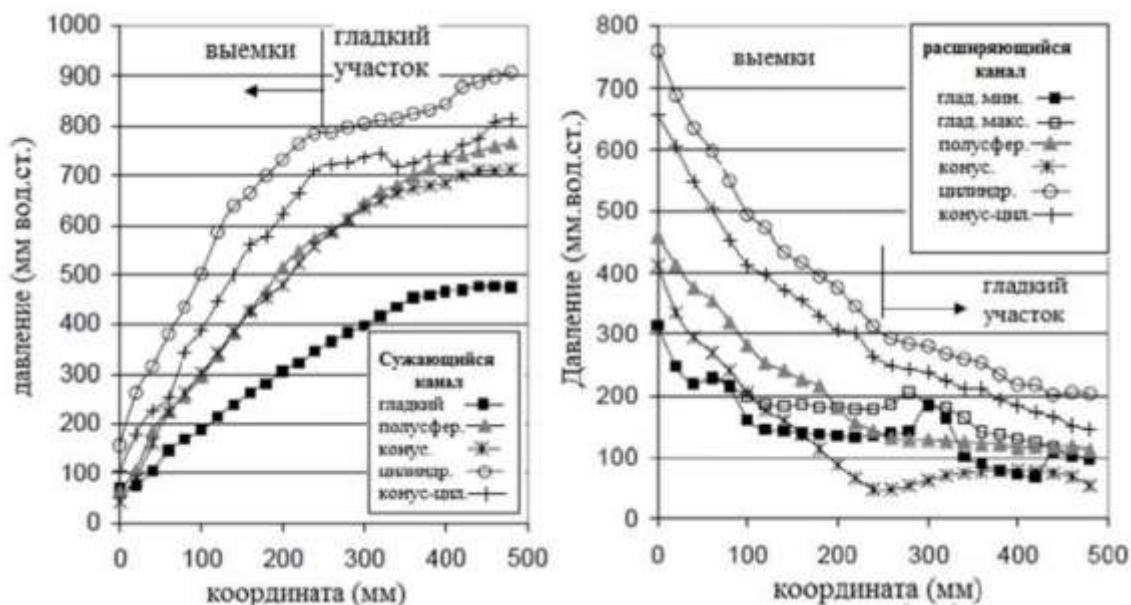


Рисунок 1.19 – Потери давления в сужающихся и расширяющихся каналах для выемок различной формы [77]

Аналогичная работа проведена авторами исследования [77]. На рисунке 1.19 представлены результаты для выемок различной формы в сужающихся и расширяющихся каналах. Максимальное увеличение гидравлического сопротивления составил 120% [77].

Анализ литературных источников в области исследования интенсификации теплоотдачи показывает, что изучению теплогидравлической эффективности с данными типами интенсификаторов посвящено незначительное количество работ. Большинство работ направлено на изучение структуры потока и численное моделирование теплогидравлических характеристик. Имеющиеся результаты исследований показывают, что применение поверхностных интенсификаторов цилиндрической формы приводит значительным гидравлическим потерям.

1.5. Спиральные выступы и спиральные проволочные вставки

Спиральные выступы (СПВ), спиральные проволочные вставки (СППВ) и низкие спиральные ребра (СПР) позволяют не только повысить эффективность интенсификации теплообмена, но значительно уменьшить скорость загрязнения теплообменного оборудования. Данный тип поверхностных интенсификаторов теплообмена позволяет использовать закрутку потока для турбулизации только пристенных слоев теплоносителя, не воздействуя при этом на весь поток.

Основные геометрические размеры труб с внутренним спиральным выступами показаны на рисунке 1.20, где $N = 6$ – количество заходов оребрения; $\theta = 45^\circ$ – угол спирального оребрения; e — высота выступа, м; d_i — внутренний диаметр трубы, м; d_0 — внешний диаметр трубы, м.

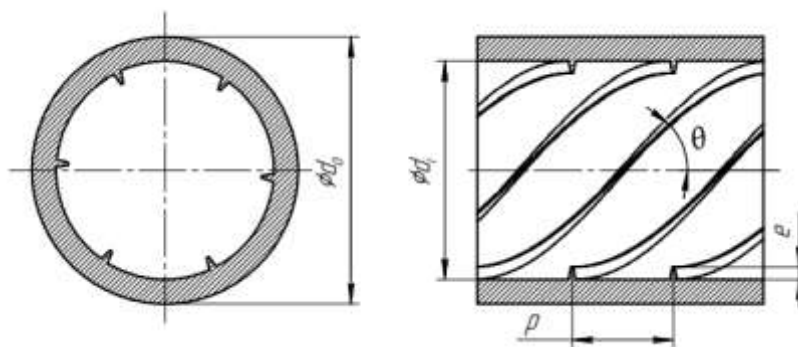


Рисунок 1.20 – Геометрические размеры труб с СПВ [88]

Динамика течения в канале с СПВ весьма сложна. В зависимости от режима течения, геометрических параметров выступов, природы теплоносителя, внутреннего диаметра трубы по гладкой части стенки эффект интенсификации теплообмена может быть обусловлен: фактором закрутки всего потока или его пристенной зоны; отрывным обтеканием выступов при отсутствии закрутки течения; совместным проявлением обоих факторов [65].

Обширные исследования структуры потока в каналах с проволочными спиральными вставками была выполнена в работах [89, 90]. Авторами исследования [89] установлено, что при увеличении значения угла спиральной закрутки θ за выступом наблюдается рециркуляция потока и образуется вихрь, движущийся вдоль спирального выступа. При значении числа Рейнольдса $Re_D < 500$ структура потока аналогична течению в гладких трубах, при этом в пристенных слоях наблюдается незначительное вращение потока, что приводит к увеличению коэффициента гидравлического сопротивления. По результатам анализа [90] было отмечено, что перед выступом и после него имеются спиральные вихри, вращающиеся вдоль ребер (рисунок 1.21).



Рисунок 1.21 – Схематическое изображение структуры течения в канале с внутренним спиральным оребрением [90]

Эффективность интенсификации теплообмена во многих работах оценивается коэффициентом $\eta = (Nu/Nu_0) / (\xi/\xi_0)$. В ряде исследований [73, 71, 91 – 93] коэффициент η используется в форме относительного энергетического

коэффициента $\eta = E'/E'_0$. В работах [94, 95, 96] установлено влияние угла закрутки на относительный энергетический коэффициент (рисунок 1.22, 1.23).

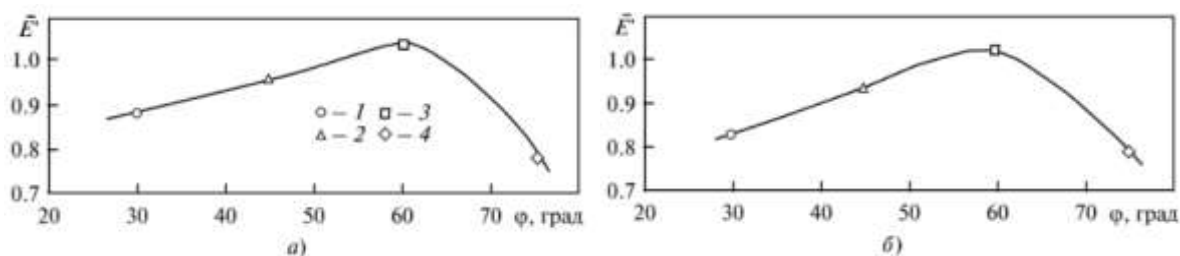


Рисунок 1.22 – Влияние угла закрутки на эффективность канала с проволочными вставками ($h = 2.0$ мм). $H^+ = 400$; а – 50% глицерол + 50% вода, $h^+ = 200$; б – вода, 1 – 4 – данные для труб с различным шагом выступов

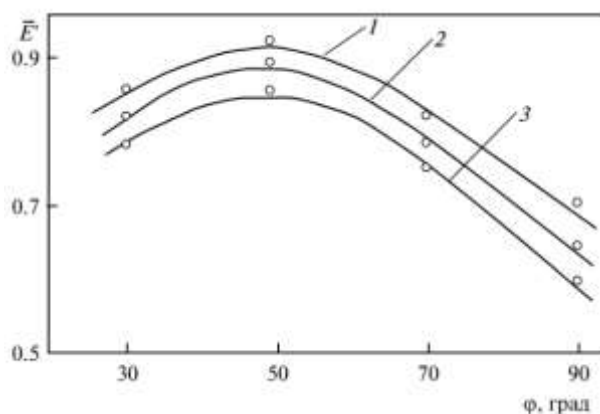


Рисунок 1.23 – Влияние угла закрутки и высоты спиральных выступов на эффективность канала h^+ : 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30

В работах [94, 96, 97] проведены исследования при турбулентном течении воды в трубах с СПР ($h = 1,5$ мм; $D = 17,8$ мм; $z = 16$), установлено, что при $\phi > 0$ закрутка потока оказывает положительное влияние [23]. Спиральные выступы уменьшают массу трубы на 10% при $\phi = 0$, а при $\phi = 30^\circ$ на 50% [94, 96].

Применение спиральных интенсификаторов теплообмена позволяют в значительной мере увеличить площадь поверхности канала F/F_0 [66,99]. Также значительное влияние на теплогидравлическую эффективность каналов с СПВ оказывают особенности нанесения на поверхность и степень деформации стенки между соседними элементами спиральных интенсификаторов [66,99,93, 99].

Критические числа Рейнольдса в зависимости от геометрических характеристик каналов с проволочными вставками исследовано в работе [100].

Установлено, что диапазон критических чисел Рейнольдса составил $Re_{кр} = 94 \div 325$. В работе [101] авторами получена зависимость для определения критического числа Рейнольдса в трубах с данного типа интенсификаторами теплоотдачи:

$$Re_{кр} = 1070 \cdot \left(\frac{p}{d}\right)^{0,0157} \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{e}{d_i}\right)^{3,65} . \quad (1.1)$$

Авторами исследований [102–105] отмечается, что увеличение относительной высоты выступов e/d наибольшим образом сказывается на увеличении величины коэффициента гидравлического сопротивления, при этом не оказывает влияние на коэффициент средней теплоотдачи.

По результатам исследования [106] получены функции $Nu = f(Re_D^n; Pr; T_w/T_f)$ и $\xi = f(Re_D^n; Pr; T_w/T_f)$ рисунок 1.24, 1.25. Установлено, что T_w, T_f – температуры стенки и потока, преимущественным образом определяют эффективность интенсификации каналов с СППВ.

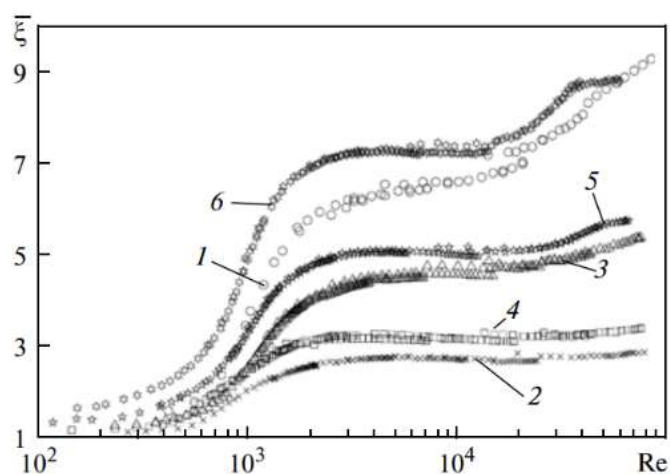


Рисунок 1.24 – Относительное сопротивление трения проволочных вставок t/D ; h/D : 1 – 1,17; 0,0744; 2 – 2,68; 0,0806; 3 – 1,70; 0,0778; 4 – 2,55; 0,0933; 5 – 1,86; 0,0997; 6 – 1,41; 0,1011 [106]

По рисунку 1.24 видно, что при $Re_D < 500$ формируется ламинарное течение, $\xi \rightarrow 1$. В диапазоне $Re_D = 500 \div 3000$ происходит плавный переход в турбулентный режим (ламинарно-турбулентный переход). При $Re_D > 3000$ фиксируется автомодельный участок $\xi \neq f(Re_D)$ [65].

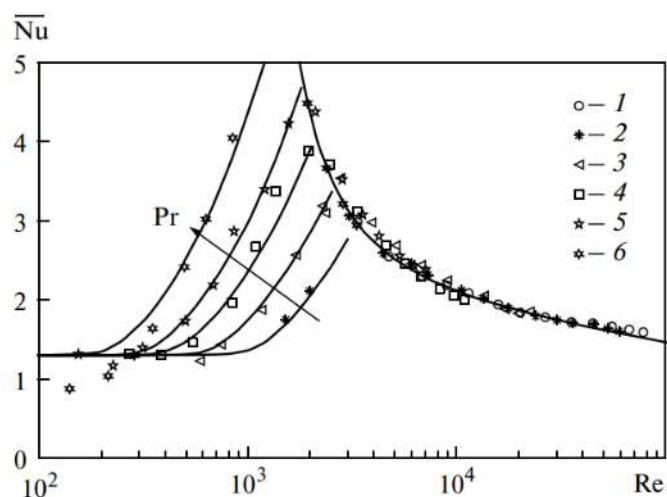


Рисунок 1.25 – Теплоотдача при интенсификации СПВ ($t/D = 1,86$; $h/D = 0,0997$).

Pr: 1 – 2,8; 2 – 4,35; 3 – 18,5; 4 – 36,0; 5 – 80,0; 6 – 150,0 [106]

Зависимость Nu от Re_D и Pr при ламинарно-турбулентном переходе для труб с СППВ представлена на рисунке 1.25. При $Re_D > 1000$ устанавливается закон обычного турбулентного теплообмена $Nu \approx Re_D^n$, $n = 0,72$ [65].

1.6. V-образные углубления

В научно-технической литературе исследования теплогидравлической эффективности V-образных углублений ограничено. Результаты исследований представлены в основном зарубежными авторами.

В работе [107] исследованы теплогидравлические характеристики при поверхностной интенсификации V-образными углублениями в прямоугольном канале с односторонним расположением выемок в диапазоне чисел $Re_D = 10000 \div 40000$. По результатам исследования выявлено, что в обеих наклонных полостях выемки образуются вихри (рисунок 1.26).

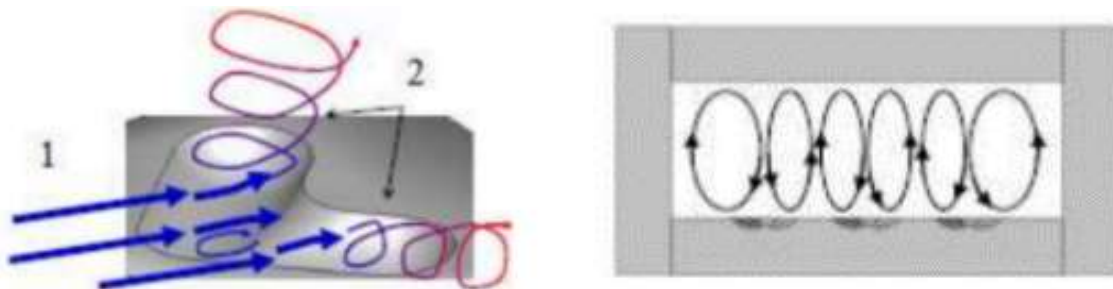


Рисунок 1.26 – Формирование парных вихрей V-образными выемками [24]: 1 – основной поток, 2 – парные вихри.

Таким образом, авторами исследования [107] сделан вывод, что данный тип интенсификаторов позволяют увеличить эффективность теплообмена при формировании в наклонных каналах завихрений в противоположных направлениях.

1.7. Эллиптические выемки

Геометрическая форма эллиптической выемки представляет собой соединенные цилиндрической (траншейной) выемкой две половинки полусферических выемок. В связи с чем, вводятся дополнительные геометрические параметры длины выемки L и угла наклона продольной оси выемки к набегающему потоку ϕ . Обзор литературных источников, показывает, что несмотря на сходство с полусферическими выемками, теплогидравлическая эффективность эллиптических значительно выше. По мнению авторов исследований, [108, 109] это связано с формированием моносмерчевых вихрей.

В работе [110] проведена оценка эффективности применения эллиптических выемок. По результатам исследования разработано поле скоростей потока, графическая зависимость и система уравнений для расчета значений импульсов скоростей вихреобразующего потока, что позволяет определить теплогидравлическую эффективность при интенсификации теплообмена эллиптическими выемками. На рисунке 1.27 представлена схема распределения направлений потоков течения в выемке.

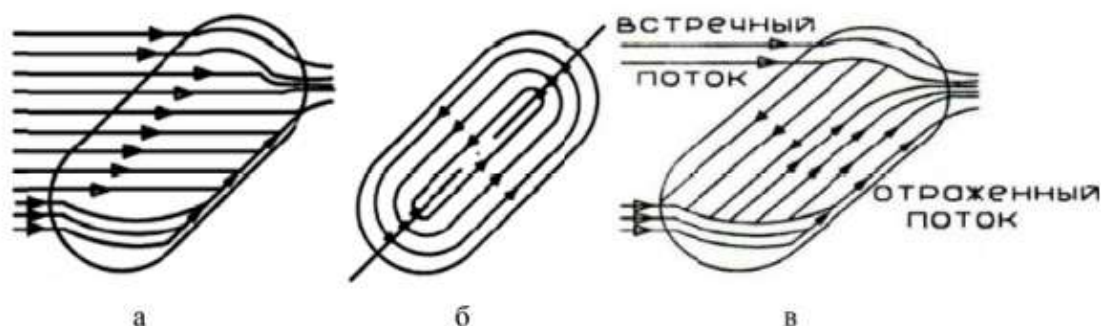
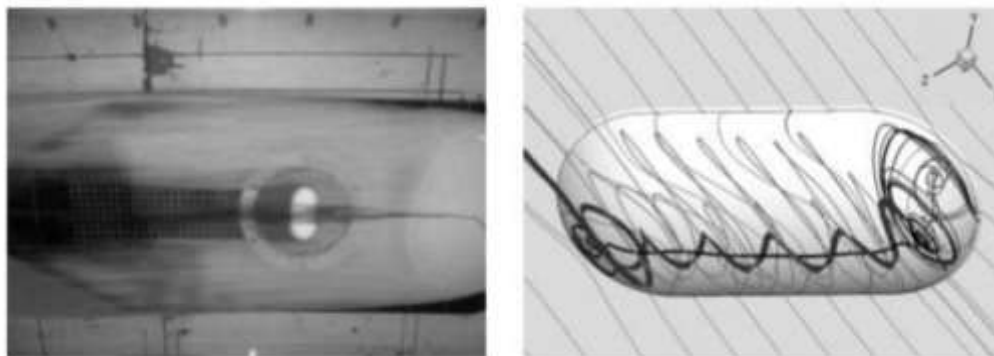


Рисунок 1.27 – Распределение направления потоков в верхней (а) и нижней (б) частях эллиптической выемки и общее взаимодействие потоков (в) [87]

На рисунке 1.28 представлены результаты визуализации взаимодействия потока (а) и результаты численного моделирования (б).



а

б

Рисунок 1.28 – а – Визуализация взаимодействия набегающего потока с внутренней структурой овальной лунки ($w = 0,1$ м/с и $\alpha = 90^\circ$) и б – Численное моделирование вихревого движения внутри овальной лунки глубиной $0,35d$ для $Re_D = 4000$ и $\alpha = 60^\circ$ [111]

Установлено, что вихреобразование начинает формироваться на дне передней по потоку сферической части эллиптической выемки, а сток периодически присоединяется к кормовой сферической части выемки. В некоторых случаях выбрасывается наружу из углубления в форме самоорганизующегося крупномасштабного вихря, прикрепленного к передней сферической части выемки [111].

Авторами работ [114] представлены результаты исследования эллиптической выемки с относительной глубиной $0,35$ и длиной 6 . По результатам исследования получены наиболее рациональные формы эллиптических выемок, представляющие собой узкие траншейные наклонные под углом 45° выемки. Установлено, что уменьшение ширины эллиптической выемки приводит к уменьшению отрывной зоны, а с увеличением ширины поток переходит в ламинарный режим.

В работах [112, 113] авторами представлено распределение локальных коэффициентов теплоотдачи $\alpha_i = (q_{cm} - q_{ni}) / (T_{cm} - T_o)$ в диапазоне $Re_H = 8 \cdot 10^4$ в зависимости от различных значений угла ϕ (рисунок 1.29).

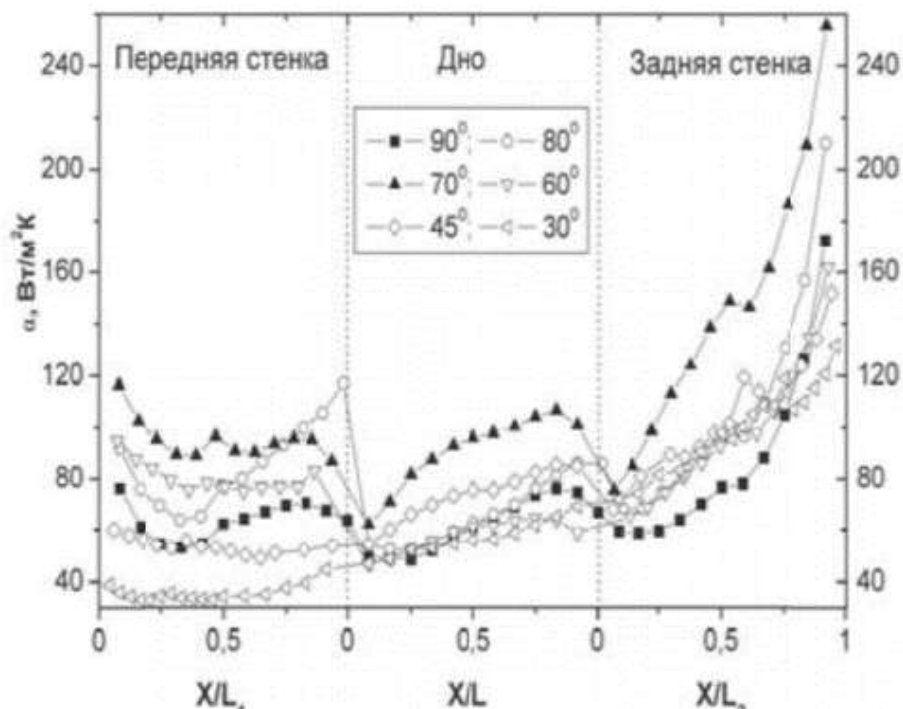


Рисунок 1.29 – Влияние угла наклона ϕ стенок траншеи на локальные коэффициенты теплоотдачи α_i [112]

При углах $\phi = 30^\circ$ и 45° наблюдается отсутствие роста теплоотдачи. Однако значительное увеличение выявлено при $\phi = 80^\circ$. Высокий уровень коэффициентов теплоотдачи α_i наблюдается по линии сопряжения подветренной стенки и дна траншеи, что объясняется перестройкой вихреобразования.

Анализ полученных результатов исследования [115] показывает, что применение эллиптических выемок позволяет увеличить теплоотдачу на 10% по сравнению с полусферическими выемками, что положительно согласовывается с результатами исследований [108, 109]. При этом снижение гидравлических потерь приводит к увеличению теплогидравлической эффективности на 13% [115].

1.8. Подковообразные выемки

Количество существующих работ по исследованию теплогидравлической эффективности в каналах с подковообразными выемками ограничено. Рассмотрим результаты исследований [116, 117]. Геометрические характеристики данного типа интенсификаторов представлены на рисунке 1.30.

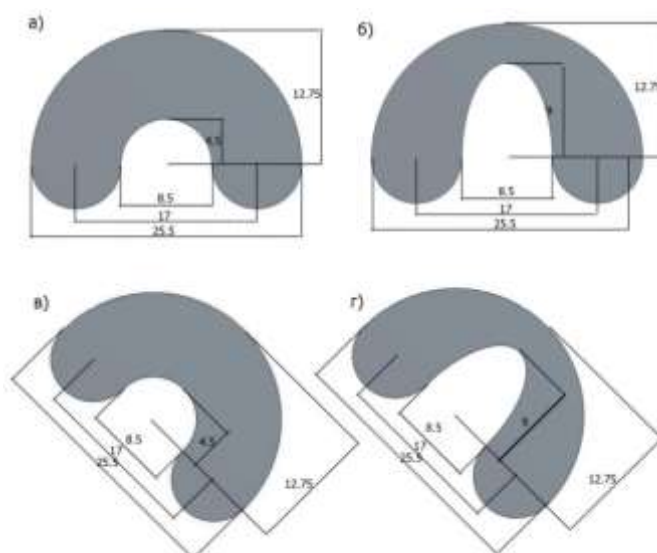


Рисунок 1.30 – Геометрия подковообразных лунок глубиной 1,2 мм, находящейся на смоделированном воздуховоде (размеры в мм) [116]

В работе [116] с помощью программного обеспечения получены и проанализированы потери давления в каналах, стенки которых покрыты подковообразными лунками с различной геометрией. Для проверки адекватности используемых методов и программных средств выполнено сравнение результатов физического и численного эксперимента. Выявлено, что использованные методы и средства показывают достоверные результаты, отклонение расчетных и экспериментальных данных находятся в пределах погрешности эксперимента. На рисунке 1.31 представлены полученные графики потерь давления.

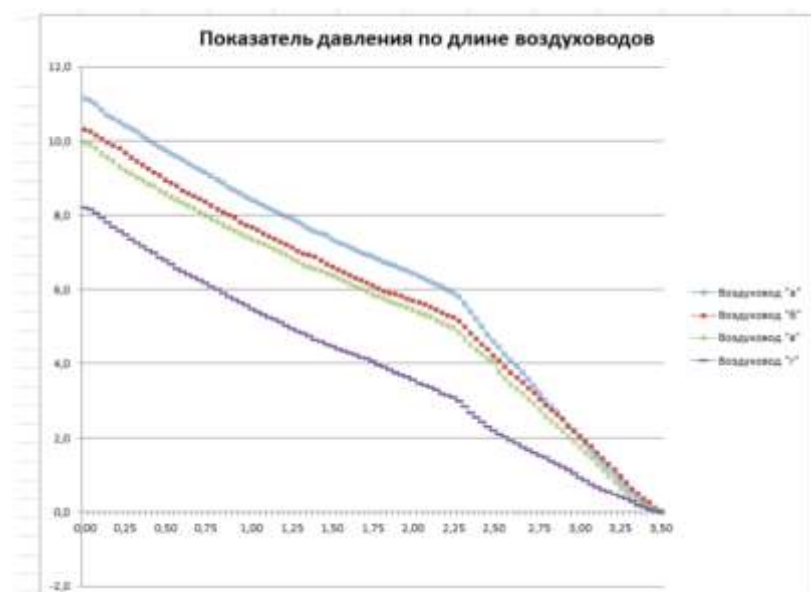


Рисунок 1.31 – График потерь давления, подковообразные интенсификаторы [116]

Таким образом, по графику на рисунке 1.31 видно, что минимальным аэродинамическим сопротивлением обладает воздуховод с поверхностными интенсификаторами в виде лунок подковообразной формы. Максимальным аэродинамическим сопротивлением обладает воздуховод с поверхностными интенсификаторами в виде лунок подковообразной формы. Если принять потери давления в гладком воздуховоде равным $2,27 \text{ Па/пм} = 100\%$, то потери давления на 1 погонный метр в воздуховодах с интенсификаторами будут составлять: а = $4,72 \text{ Па/пм} = 208\%$, б = $4,16 \text{ Па/пм} = 183\%$, в = $4,00 \text{ Па/пм} = 176\%$, г = $2,48 \text{ Па/пм} = 109\%$.

В работе [117] проведено численное исследование течения и теплообмена в прямоугольном канале с интенсификаторами в виде подковообразных $2d$ лунок при наличии наложенных пульсаций потока. В результате численного моделирования определена зависимость эффективности теплообмена от пульсирующего потока рабочего тела (воздуха). Установлены значения коэффициентов теплоотдачи [117]:

$$\alpha = \frac{q}{\Delta t}, \text{Re}_y = \frac{U_{cp} \cdot y_i}{\vartheta}, \quad (1.2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, q – теплоступления; Δt – температурный напор ($\Delta t = t_{\text{bound}} - t_{\text{flow}}$), U_{cp} – скорость потока, y_i – расстояние от входа, ν – вязкость воздуха (кинематическая).

Числа Струхалия [117]:

$$Sh = \frac{f \cdot d_r}{U_{cp}}, \quad (1.3)$$

где f – частота, d_r – гидравлический диаметр канала, ν – кинематическая вязкость воздуха ($\nu = 13,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$).

Числа Стантона [117]:

$$St = \frac{\alpha}{C_p \cdot \rho \cdot U_{cp}}, \quad (1.4)$$

где C_p – удельная теплоемкость воздуха ($1005 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$).

Обобщение результатов исследования теплоотдачи на базе критерия Стантона представлено на рисунке 1.32. Выявлено, что наличие пульсаций потока

ведет к росту теплоотдачи для прямоугольного канала с подковообразными лунками, выполненными по одной из стенок канала. По рисунку 1.32 выявлено, что интенсивности теплообмена определяется частотой пульсаций потока. Пульсация воздуха с частотой $f = 5\text{ Hz}$ позволяет увеличить теплоотдачу до 74% при увеличении скорости потока и до 67 % при торможении потока. Обобщение результатов расчета по числу Струхала представлено на рисунке 1.33.

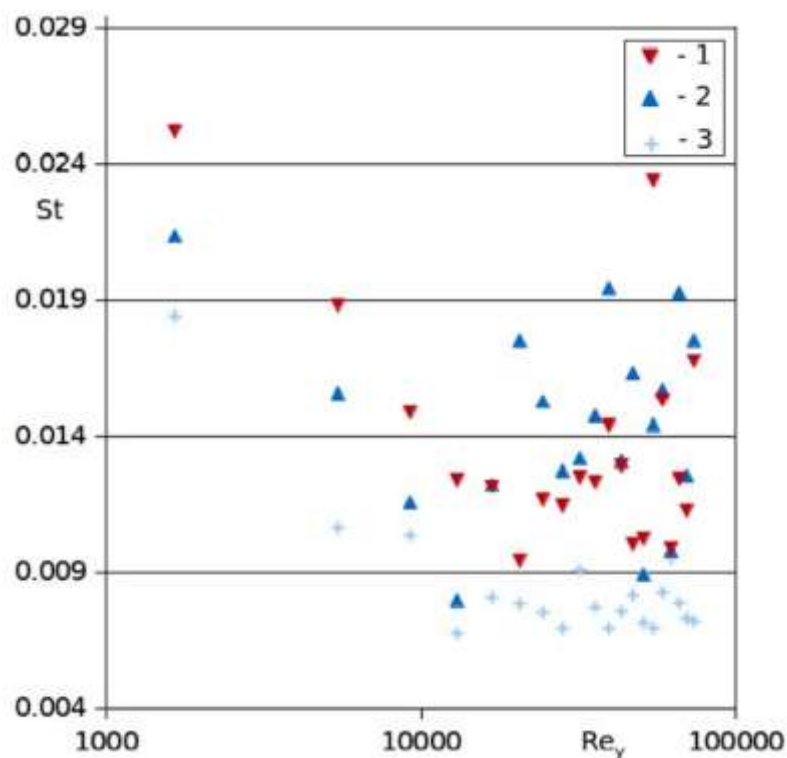


Рисунок 1.32 – Теплоотдача: 1 – при замедлении потока $f = 5\text{ Hz}$; 2 – при увеличении скорости потока $f = 5\text{ Hz}$; 3 – без пульсаций при $f = 0\text{ Hz}$ [117]

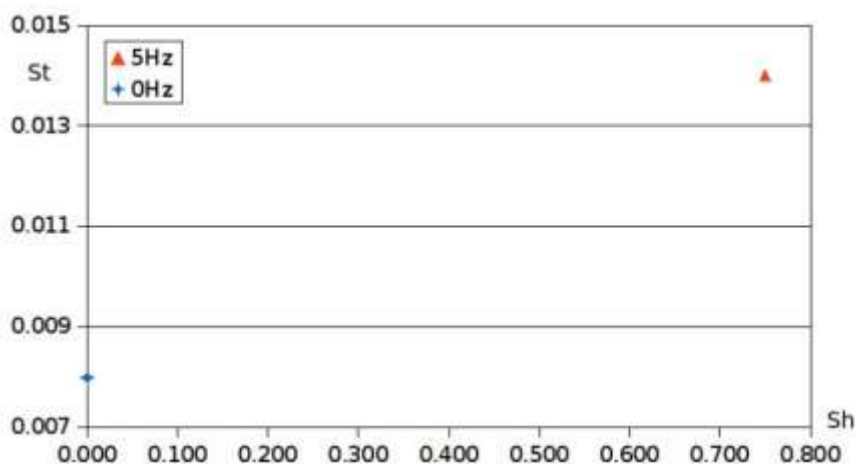


Рисунок 1.33 – Зависимость теплоотдачи от пульсаций потока [117]

Таким образом, результаты исследования [117] показывают, что локальные значения коэффициента теплоотдачи для канала с подковообразными лунками изменяются не только по длине, но и зависят от частоты пульсирующего потока.

1.9. Выводы по 1 главе и постановка задач исследования

Проведенный в данной главе анализ предметной области показал, что для повышения теплогидравлической эффективности необходимо получить обобщающие зависимости результатов экспериментальных исследований для каждого типа поверхностных интенсификаторов теплообмена. На сегодняшний день в научно – технической литературе имеется огромная база различных исследований по данной тематике. Однако, несмотря на значительное количество экспериментальных работ по исследованию теплогидравлических характеристик в каналах с поверхностными интенсификаторами теплообмена, не получены обобщающие расчетные зависимости для расчета коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления. Следует отметить, что авторами некоторых исследований получены обобщающие зависимости результатов исследований в виде эмпирических формул зависимости чисел Нуссельта от чисел Рейнольдса и Прандтля с привлечением определяющих размеров. Однако, их практическое применение ограничивается узким классом поверхностных интенсификаторов в диапазоне параметров проведенных экспериментов.

Таким образом, для обобщения результатов экспериментальных исследований и расширения диапазона практического применения режимных и геометрических параметров различных форм поверхностных интенсификаторов теплообмена требуется разработка методов, позволяющих работать с параметрами за пределами диапазонов, в которых были проведены экспериментальные исследования. Одним из таких методов, позволяющих обобщить параметры, полученные экспериментальным путем и сформировать характерные логические взаимосвязи между геометрическими и режимными параметрами, присущими определенному типу интенсификаторов теплообмена, являются искусственные нейронные сети (ИНС). Разработка нейросетевой модели поверхностной

интенсификации теплообмена позволит обобщить результаты многих исследований в данной области.

Целью работы ставилось разработка метода исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы, с обеспечением достоверности работы с параметрами за пределами диапазонов экспериментальных исследований, а также способа интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками.

Задачи исследования, решаемые для достижения поставленной цели:

1. Определение геометрических и теплофизических факторов поверхностной интенсификации теплообмена, влияющих на тепловые и гидромеханические характеристики теплообменного оборудования. Фашификация объекта исследования.

2. Создание базы данных по характеристикам пассивных интенсификаторов трубчатых и пластинчатых теплообменных поверхностей с учетом конкретных теплофизических и гидромеханических условий экспериментальных исследований различных авторов. Нормализация параметров сформированной базы данных.

3. Разработка методики обобщения результатов экспериментальных исследований в области повышения энергоэффективности поверхностных теплообменных устройств.

4. Реализация алгоритмов обучения и формирования искусственной нейронной сети (далее – ИНС) для исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических характеристик пассивных поверхностных интенсификаторов теплообмена.

5. Разработка программного обеспечения нейросетевого моделирования (далее – НС-моделирование) эффективности теплообмена, гидравлического сопротивления и теплогидравлической эффективности трубчатых и пластинчатых

теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы.

6. Анализ согласования полученных результатов исследования в диапазоне параметров экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена.

7. Разработка способа интенсификации по режимным характеристикам трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств.

8. Разработка компьютерной модели оптимальных поверхностей теплообмена в целом и геометрических характеристик для каждого типа поверхностных интенсификаторов.

ГЛАВА 2. Разработка метода исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров поверхностных теплообменных устройств

В данной главе представлены этапы разработки метода исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами теплообмена различной формы, основанный на выявлении взаимосвязей между режимными и геометрическими характеристиками поверхностных интенсификаторов. Для реализации метода разработаны методики формирования и подготовки базы параметров экспериментальных исследований пассивной интенсификации теплообмена, а также метод и алгоритм формирования и оптимизации ИНС для нейросетевого моделирования поверхностной интенсификации теплообмена. Представлена разработка нейросетевой модели оптимальных характеристик поверхностных интенсификаторов, а также исходная структура искусственной нейронной сети, результаты оценки точности и методики ее оптимизации. Представлена разработка инструментального программного обеспечения реализующий предложенный метод: назначение, средства разработки, описание основных объектов, классов и методов, особенности реализации, структура и описание программного кода. Представлено функционирование инструментального программного обеспечения.

2.1. Методика обобщения результатов экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообменных устройств

Анализ экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена, выполненный в первой главе, позволяет сделать вывод, что для обобщения всех результатов исследований в данной предметной области и выявления характерных логических взаимосвязей при поверхностной интенсификации теплообменного оборудования, требуются методы, позволяющие работать с параметрами за пределами экспериментальных исследований. Одним из

методов, предлагающих решение данной проблемы, являются методы интеллектуального анализа данных на базе нейронных сетей.

Обучение нейронной сети по экспериментальным данным, полученных в рамках исследований поверхностной интенсификации различных авторов, позволяет сформировать характерные логические взаимосвязи между параметрами, присущими определенному типу интенсификаторов теплообмена, что дает возможность работать с данными, не вошедшими в диапазон параметров, полученных опытным путем. Такое расширение «поля зрения» данного метода позволяет обобщить результаты многих исследований в данной области и рассчитать наиболее оптимальные параметры различных типов поверхностных интенсификаторов теплообмена.

Информационный подход к моделированию, в основе которого лежит анализ больших объемов данных, формирование логических взаимосвязей и выявление из них скрытых закономерностей на базе нейронных сетей, позволяет реализовать метод исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена. Для реализации данного подхода используется набор технологий обнаружения знаний в данных Knowledge Discovery in Databases (далее – KDD), который позволяет установить закономерности в параметрах экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена [119 – 123]. Типовая схема технологии KDD представлена на рисунке 2.1 [124, 125]



Рисунок 2.1 – Схема технологии обнаружения знаний в данных [124, 125]

Для практического применения технологии KDD при реализации предлагаемого метода исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена разработан алгоритм нейросетевого моделирования поверхностной интенсификации теплообмена, представленный на рисунке 2.2.

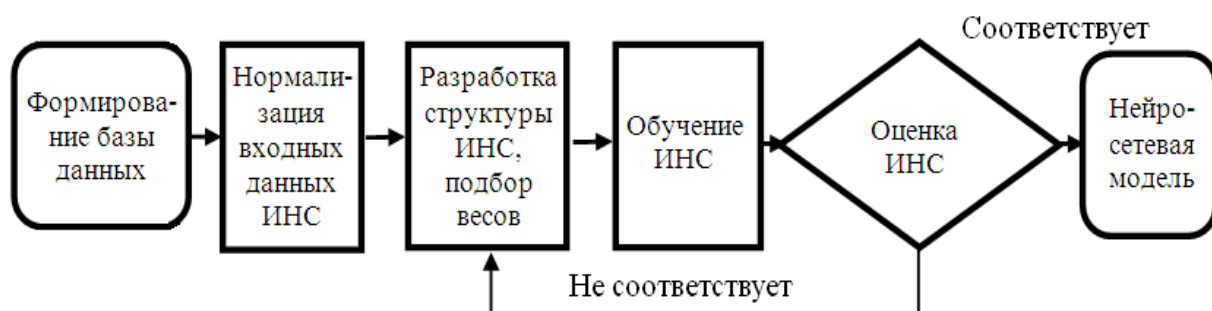


Рисунок 2.2 – Алгоритм построения нейросетевой модели поверхностной интенсификации теплообмена

Таким образом, для разработки метода исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена требуется решить следующие основные задачи:

- Сформировать базу данных по результатам экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена и выполнить фазификацию энергоэффективности трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств по тепловой эффективности, гидравлическому сопротивлению, режимных и геометрических характеристик ;
- Сформировать (разработать структуру и произвести обучение) исходную нейросетевую модель интенсификации теплообменного оборудования;
- Оценить адекватность разработанной нейросетевой модели поверхностной интенсификации теплообмена и ее точность работы;
- Произвести оптимизацию результатов нейросетевого моделирования поверхностной интенсификации теплообмена в широком диапазоне режимных и геометрических характеристик вихрегенераторов различной формы.

2.2. Объект исследования. Фазификация режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена по энергоэффективности теплообменного оборудования

Объект исследования - теплообменное оборудование с трубчатыми и пластинчатыми теплообменными поверхностями с пассивными интенсификаторами теплообмена в виде сферических, V-образных, эллиптических, цилиндрических и подковообразных выемок, а также полусферических, кольцевых и спиральных выступов в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических характеристик.

Фазификация объекта исследования занимает большую часть времени нейросетевого моделирования поверхностной интенсификации теплообмена, однако от точности фазификации на 80% зависит точность результатов исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена. Для фазификации объекта исследования разработана методика формирования базы экспериментальных параметров, включающая в себя этапы сбора параметров экспериментальных исследований, их нормализации и устранения аномалий, связанных с погрешностью измерения или интерпретации экспериментальных данных.

2.3. Методика формирования базы данных экспериментальных исследований интенсификации трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств

База данных для всех типов поверхностных интенсификаторов теплообмена сформирована на основе экспериментальных параметров, полученных в рамках экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплоотдачи и гидравлического сопротивления [1–118, 128, 129, 131–152]. В зависимости от типа поверхностных интенсификаторов, обучающая выборка представляет собой матрицу из 9 – 16 столбцов и более 1000 строк. Одна строка обучающей выборки, представляет собой один обучающий набор экспериментальных параметров.

База данных для разработки нейросетевой модели поверхностной интенсификации теплообмена кольцевыми выступами сформирована на основе результатов экспериментальных исследований [1, 57, 58, 67, 72, 75, 76, 133].

В таблице 2.1 представлена часть обучающей выборки экспериментальных параметров для кольцевых выступов.

Таблица 2.1

Выборка базы экспериментальных параметров для кольцевых выступов

$L, \text{ м}$	$t, \text{ м}$	$h, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$D, \text{ м}$	t/h	t/d	d/D	Pr	Re_D	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$
1	0,009	0,0013	0,0074	0,01	6,9230	1,2162	0,740	3,56	1200	0,99
1	0,0138	0,0019	0,0121	0,016	7,2251	1,1333	0,761	3,56	1200	0,72
0,76	0,009	0,0013	0,0074	0,01	6,9230	1,2162	0,740	3,56	1400	0,31

где L – длина трубы; t – расстояние между интенсификаторами; h – глубина или высота интенсификатора; d – диаметр трубы по вершинам выступов; D – внутренний диаметр трубы; Pr – число Прандтля; Re_D – число Рейнольдса; Nu – число Нуссельта для интенсифицированной поверхности; Nu_0 – число Нуссельта для гладкой поверхности; ξ – гидравлическое сопротивление для интенсифицированной поверхности; ξ_0 – гидравлическое сопротивление для гладкой поверхности.

Для формирования базы данных нейросетевой модели поверхностной интенсификации полусферическими выступами использованы исследования [7, 12, 39, 41, 63, 129 – 133]. Фрагмент обучающей выборки экспериментальных параметров для полусферических выступов представлен в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Выборка базы экспериментальных параметров для полусферических выступов

$h, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$D, \text{ м}$	$t, \text{ м}$	$s, \text{ м}$	f	d/D	t/D	s/D	Pr	Re_D	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$
0,0005	0,008	0,01	0,006	0,004	0,9	0,6	0,4	1,038	8,3	800	0,68
0,0001	0,009	0,01	0,01	0,006	0,98	1	0,6	1,001	8	1000	1,16
0,0019	0,012	0,016	0,0138	0,00889	0,761	0,863	0,556	1,108	6	2000	1,5

где h – высота выступов; d – диаметр выступа; D – внутренний диаметр трубы (гидравлический диаметр каналов); t – шаг спиральной линии, по которой нанесены выступы (продольный шаг выступов); s – шаг выступов по спиральной линии (поперечный шаг выступов); f – увеличение площади поверхности; Pr – число Прандтля; Re_D – число Рейнольдса; Nu , Nu_0 – число Нуссельта для интенсифицированной и гладкой поверхности; ξ , ξ_0 – гидравлическое сопротивление для интенсифицированной и гладкой поверхности.

Эффективность теплоотдачи, выражаемая отношением Nu/Nu_0 при интенсификации сферическими выемками исследована в работах многих авторов. Однако, количество экспериментальных работ, где результаты исследований представлены в виде аналогии Рейнольдса $(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$, характеризующий теплогидравлическую эффективность не достаточны для обучения высокоточной ИНС. Поэтому, на выходе ИНС, для сферических выемок использованы результаты исследований эффективности теплоотдачи [8, 9, 18, 24, 25, 28, 29, 32 – 53, 134, 135]. Часть обучающей выборки экспериментальных параметров для сферических выемок представлена в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Выборка базы экспериментальных параметров для сферических выемок

h , м	d , м	H , м	h/d	H/d	h/H	Pr	Re_D	(Nu/Nu_0)
0,00071	0,00514	0,01	0,138	1,945	0,071	0,686	280	1
0,005	0,01	0,002	0,5	0,2	2,5	0,687	300	1,6
0,00071	0,00514	0,008	0,138	1,556	0,088	0,691	560	0,92

где h – глубина выемки; d – диаметр выемки; H – высота теплообменной поверхности; Pr – число Прандтля; Re_D – число Рейнольдса; Nu – число Нуссельта для интенсифицированной поверхность; Nu_0 – число Нуссельта для гладкой поверхности.

Результаты исследований [48, 78 – 87, 112, 113, 136 – 144] использованы для формирования базы данных нейросетевой модели поверхностной интенсификации цилиндрическими выемками. Сформированная база данных частично представлена в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Выборка базы экспериментальных параметров для цилиндрических выемок

$L, \text{ м}$	$B, \text{ м}$	$H, \text{ м}$	$h, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$t, \text{ м}$	$s, \text{ м}$	h/d	Pr	Re_D	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$
0,19	0,096	0,01	0,0016	0,016	0,042	0,024	0,1	0,7	300	1,15
0,19	0,096	0,01	0,0032	0,016	0,042	0,024	0,2	0,7	750	0,85
0,19	0,096	0,01	0,008	0,016	0,042	0,024	0,5	0,7	2100	1,07

где L – длина теплообменной пластины; B – ширина теплообменной пластины; H – высота теплообменной пластины; h – глубина выемки; d – диаметр выемки; t – продольный шаг выемок; s – поперечный шаг выемок; Pr – число Прандтля; Re_D – число Рейнольдса; Nu – число Нуссельта для интенсифицированной поверхности; Nu_0 – число Нуссельта для гладкой поверхности; ξ , ξ_0 – гидравлическое сопротивление для интенсифицированной и гладкой поверхности.

Нейросетевая модель поверхностной интенсификации теплообмена спиральными выступами (далее – СПВ) и спиральными проволочными вставками (далее – СППВ) разработана на базе результатов экспериментальных исследований [4, 67, 94, 97, 99, 100, 145 – 150]. В таблице 2.5 представлена часть сформированной обучающей выборки.

Таблица 2.5

Выборка базы экспериментальных параметров для спиральных выступов и спиральных проволочных вставок

h/D	t/h	h/s	s/D	z	d/D	t/D	$\phi, ^\circ$	Pr	Re_D	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$
0,107	0,075	0,007	2,82	0	0	1,873	0	0,7	25000	0,84
0,114	8,7	0,0456	2,316	0	0	0,637	45	202	350	2,4
0,031	0,075	0	0	3	0	0,63	48,8	0,7	25000	1,24

где h – высота СПВ и СППВ; D – диаметр теплообменной трубы; d – диаметр СПВ и СППВ; t – продольный шаг СПВ и СППВ; s – поперечный шаг СПВ и СППВ; z – количество заходов оребрения; ϕ – угол к встречному потоку теплоносителя; Pr – число Прандтля; Re_D – число Рейнольдса; Nu – число Нуссельта для

интенсифицированной поверхности; Nu_0 – число Нуссельта для гладкой поверхности; ξ, ξ_0 – гидравлическое сопротивление для интенсифицированной и гладкой поверхности.

Ranaware A.G. в своей работе [152] получил результаты экспериментальных исследований интенсификации теплообмена V -образными выемками, которые использованы при формировании базы данных нейросетевой модели поверхностной интенсификации. В таблице 2.6 представлена часть обучающей выборки экспериментальных параметров для V -образных выемок.

Таблица 2.6

Выборка базы экспериментальных параметров для V -образных выемок

$H, \text{ м}$	$B, \text{ м}$	$L, \text{ м}$	$h, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$s, \text{ м}$	$t, \text{ м}$	h/d	t/d	s/d	Pr	Re_D	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$
0,1	0,15	0,15	0,002	0,013	0,016	0,0162	0,2	1,25	1,25	0,7	32000	1,279
0,1	0,15	0,15	0,005	0,019	0,023	0,0237	0,3	1,25	1,25	0,7	19000	1,749
0,1	0,15	0,15	0,011	0,022	0,027	0,0275	0,5	1,25	1,25	0,67	19500	1,175

где L – длина теплообменной пластины; B – ширина теплообменной пластины; H – высота теплообменной пластины; h – глубина выемки; d – диаметр выемки; t – продольный шаг выемок; s – поперечный шаг выемок; Pr – число Прандтля; Re_D – число Рейнольдса; Nu – число Нуссельта для интенсифицированной поверхности; Nu_0 – число Нуссельта для гладкой поверхности; ξ, ξ_0 – гидравлическое сопротивление для интенсифицированной и гладкой поверхности.

Для подковообразных выемок, как и для сферических количество экспериментальных исследований теплогидравлической эффективности ограничено. Для формирования базы данных нейросетевой модели поверхностной интенсификации подковообразными выемками использованы экспериментальные исследования теплообменных характеристик авторов работы [52]. В таблице 2.7 представлена часть обучающей выборки экспериментальных параметров для подковообразных выемок, где D – диаметр трубы; L – длина пластины; s – поперечный шаг выемок; t – продольный шаг выемок; d – диаметр выемки; h – глубина выемки; ϕ – угол к встречному потоку теплоносителя; Pr – число Прандтля;

ω – скорость потока; Nu – число Нуссельта для интенсифицированной поверхности; Nu_0 – число Нуссельта для гладкой поверхности; ξ , ξ_0 – гидравлическое сопротивление для интенсифицированной и гладкой поверхности.

Таблица 2.7

Выборка базы экспериментальных параметров для подковообразных выемок

D , м	L , м	ϕ , °	h , м	d , м	s , м	t , м	h/d	t/d	s/d	Pr	ω , м/с	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$
0,15	1,27	45	0,0012	0,008	0,05	0,05	0,14	5,88	5,88	0,67	14,1	1,11
0,15	1,28	46	0,0012	0,008	0,05	0,05	0,141	5,881	5,88	0,7	14	1,13
0,15	1,29	48	0,0012	0,008	0,05	0,05	0,142	5,882	5,88	0,7	14	1,17

Для формирования базы данных нейросетевой модели поверхностной интенсификации эллиптическими выемками использован экспериментальный материал [52]. В таблице 2.8 представлена часть обучающей выборки экспериментальных параметров для эллиптических выемок.

Таблица 2.8

Выборка базы экспериментальных параметров для эллиптических выемок

H , м	L , м	h , м	d , м	s , м	t , м	ϕ , °	h/d	t/d	s/d	Pr	Re_D	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$
0,02	3,38	0,003	0,015	0,018	0,03	0	0,2	2,16	1,25	0,7	13900	0,878
0,02	3,38	0,003	0,015	0,018	0,03	0	0,2	2,16	1,25	0,7	18400	0,842
0,02	3,38	0,003	0,015	0,018	0,03	0	0,2	2,16	1,25	0,7	22900	0,809

где L – длина теплообменной пластины; H – высота теплообменной пластины; h – глубина выемки; d – диаметр выемки; t – продольный шаг выемок; s – поперечный шаг выемок; ϕ – угол к встречному потоку теплоносителя; Pr – число Прандтля; Re_D – число Рейнольдса; Nu – число Нуссельта для интенсифицированной поверхности; Nu_0 – число Нуссельта для гладкой поверхности; ξ , ξ_0 – гидравлическое сопротивление для интенсифицированной и гладкой поверхности.

Обучение и тестирование ИНС для работы с капельными углублениями произведено на базе данных, сформированных на основе экспериментальных

исследований [52]. Часть обучающей выборки экспериментальных параметров для капельных углублений представлена в таблице 2.9.

Таблица 2.9

Выборка базы экспериментальных параметров для капельных углублений

H , м	B , м	L , м	H , м	d , м	s , м	t , м	h/d	t/d	s/d	Pr	Re_D	$(Nu/Nu_0)/$ (ξ/ξ_0)
0,02	1	3,38	0,003	0,015	0,018	0,0324	0,2	2,16	1,25	0,7	8500	1,212
0,02	1	3,38	0,002	0,01	0,012	0,0216	0,2	2,16	1,25	0,7	8950	1,207
0,02	1	3,38	0,002	0,011	0,013	0,0237	0,2	2,16	1,25	0,7	9400	1,202

где L – длина теплообменной пластины; B – ширина теплообменной пластины; H – высота теплообменной пластины; h – глубина выемки; d – диаметр выемки; t – продольный шаг выемок; s – поперечный шаг выемок; Pr – число Прандтля; Re_D – число Рейнольдса; Nu – число Нуссельта для интенсифицированной поверхности; Nu_0 – число Нуссельта для гладкой поверхности; ξ , ξ_0 – гидравлическое сопротивление для интенсифицированной и гладкой поверхности.

2.3.1. Нормализация параметров базы данных экспериментальных исследований интенсификации поверхностных теплообменных устройств

Для повышения точности работы ИНС необходимо произвести нормализацию входных и выходных параметров. Нормализация входных данных — это процесс, при котором все входные данные проходят процесс «выравнивания», т.е. приведения к интервалу $[0,1]$. Если не провести нормализацию, то входные данные будут оказывать дополнительное влияние на нейрон, что приведет к неверным решениям. В общем виде формула нормализации выглядит так [120]:

$$y = \frac{(x - x_{\min})(d_2 - d_1)}{x_{\max} - x_{\min}} + d_1, \quad (2.1)$$

где x – значение, подлежащее нормализации; $[x_{\min}, x_{\max}]$ – интервал значений x ; $[d_1, d_2]$ – интервал, к которому будет приведено значение x .

Для НС–моделирования поверхностной интенсификации теплообмена, на выходе ИНС в качестве функции активации выбрана сигмоида. Поэтому необходимо сделать нормировку для выходных параметров обучающей выборки, опустив минимальные значения до 0 [120]:

$$y_n = Y - Y_{\min}, \quad (2.2)$$

где Y – исходные данные выходных параметров обучающей выборки; Y_{\min} – минимальное значение исходных данных выходных параметров обучающей выборки.

Максимальные значения выборки необходимо привести к 1 [120]:

$$X_n = \frac{Y}{y_{n\max}}, \quad (2.3)$$

где $y_{n\max}$ – максимальное значение смещенной выборки выходных параметров.

Входные параметры ИНС также необходимо нормализовать. Для этого выполняется следующее [120]:

$$x_n = \frac{X - S}{\sigma}, \quad (2.4)$$

где X – исходная матрица обучающих данных, S – среднее арифметическое матрицы обучающих данных, σ – стандартное отклонение.

Таким образом, приближая значения параметров к диапазону функции активации, ускоряется корректировка весов.

2.3.2. Устранение аномалий, связанных с погрешностью измерения или интерпретации экспериментальных данных

Для обучения ИНС, позволяющую реализовать исследование однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена для НС–моделирования поверхностной интенсификации теплообмена, используются более 10 000 значений экспериментальных параметров. Точность результатов экспериментальных исследований оказывает прямое воздействие на точность работы разрабатываемой ИНС. Кроме того, необходимо учитывать сопоставление

результатов исследований различных авторов. Несмотря на то, что во всех рассматриваемых исследованиях авторами уже проведена обработка полученных результатов, при объединении результатов исследований в общую базу данных, не каждый параметр имеет достаточную точность. Это связано с тем, что в каждом исследовании использованы различные методы оценки результатов измерений, средства измерений с различным классом точности и методами интерпретации экспериментальных данных.

Для решения данной задачи, обучение ИНС выполнено в три этапа. По результатам первого этапа обучения выявляются наиболее аномальные значения, которые значительно отклоняются от остальных значений базы экспериментальных параметров исследований для определенного типа поверхностных интенсификаторов теплообмена. На рисунке 2.3. представлены результаты первого этапа обучения для случая поверхностной интенсификации теплообмена поперечными кольцевыми выступами.

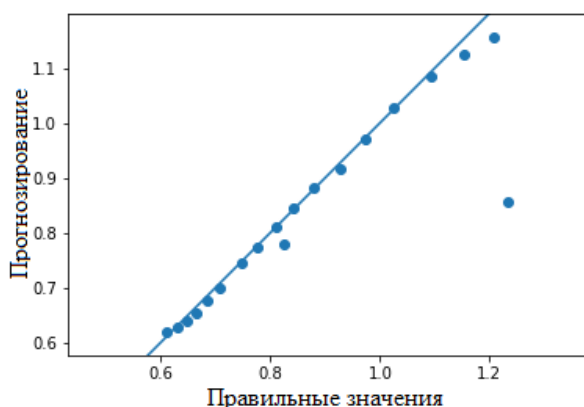


Рисунок 2.3 – Первый этап обучения ИНС поверхностными интенсификаторами в виде поперечных кольцевых выступов

По рисунку 2.6. видно, что одна точка значительно отклоняется от остальных результатов прогнозирования. Это позволяет сделать вывод, что скорее всего, в базе экспериментальных данных имеются значительные аномалии, для опытных данных соответствующих данному исследованию. Для устранения данных аномалий производится вычистка параметров, соответствующих данной точке в обучающем наборе экспериментальных данных. Далее производится второй этап обучения ИНС, по результатам которого оценивается влияние данной точки на

формирование характерных логических взаимосвязей нейросетевой модели для данного типа поверхностных интенсификаторов теплообмена. На рисунке 2.4. представлены результаты второго этапа обучения ИНС.

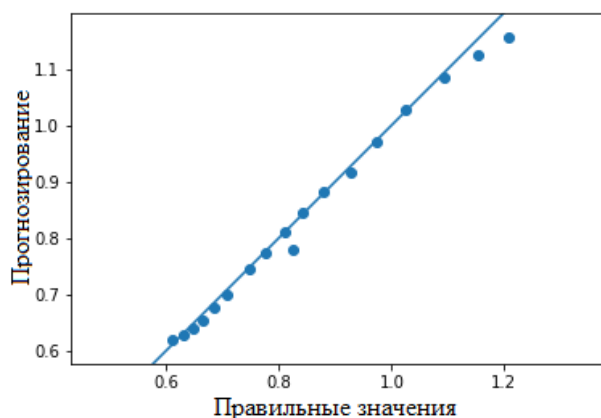


Рисунок 2.4 – Второй этап обучения ИНС поверхностными интенсификаторами в виде кольцевых выступов

По результатам второго этапа обучения (рисунок 2.4) видно, что удаление в базе экспериментальных данных обучающей выборки параметров с аномальными значениями не влияют на формирование общих взаимосвязей поверхностной интенсификации поперечными кольцевыми выступами. Это позволяет сделать вывод, что экспериментальные параметры, соответствующие данной точке, действительно имели значительную погрешность. Далее производится заключительный этап обучения ИНС. В случае если удаление аналогичных параметров приводит к значительным изменениям результатов второго этапа обучения база экспериментальных данных не изменяется и параметры точки с аномальными отклонениями принимаются для заключительного этапа обучения ИНС. Анализ результатов исследований показывает, что описанные выше аномальные отклонения от общего набора экспериментальных параметров, влияющие на формирование логических взаимосвязей, чаще всего наблюдается при переходном режиме течения теплоносителя.

Аналогичные операции производятся для каждого типа поверхностных интенсификаторов теплообмена.

Таким образом, данный метод очистки базы экспериментальных параметров от аномалий, связанных с погрешностью измерения и интерпретации экспериментальных данных позволяет удалить только те данные, которые не оказывают влияния на формирование характерных логических взаимосвязей по результатам обучения по общей обучающей выборке экспериментальных параметров для каждого типа поверхностных интенсификаторов теплообмена.

2.4. Построение исходной нейросетевой модели поверхностной интенсификации теплообменного оборудования

2.4.1. Методика построения нейросетевой модели

Перед обучением ИНС необходимо сформировать обучающие и тестовые выборки. Сформированная база данных экспериментальных параметров разделена на два типа. Первый тип включает в себя 63,2% данных от общей базы данных экспериментальных параметров и представляет собой обучающую выборку для ИНС. Второй тип содержит оставшиеся 36,8% данных от общей базы и состоит из экспериментальных данных, не вошедших в обучающую выборку. Данный подход реализован на основе метода 0,632-бутстрэпа [119].

На выходе ИНС используется сигмоидальная функция, где функцией активации является число из интервала от 0 до 1. Точность работы ИНС зависит от данного порога, так как его увеличение приводит к повышению числа ошибок первого рода, а уменьшение к повышению числа ошибок второго рода

Одним из эффективных методов выбора точки отсечения классов решений является метод ROC-анализа (Receiver Operating Characteristic) [119, 153]. Для разработки ИНС поверхностной интенсификации теплообмена предлагается методика, состоящая из этапов формирования структуры и построения исходной нейросетевой модели поверхностной интенсификации теплообмена, оценки ее точности и значения ошибки, а также оптимизации структуры ИНС.

2.4.2. Структура и математическая модель нейронной сети поверхностной интенсификации теплообмена

Структура ИНС поверхностной интенсификации теплообмена разработана на базе следствия из теоремы Колмогорова – Арнольда – Хехт – Нильсена [154]. На рисунке 2.5 представлена структура исходной ИНС.

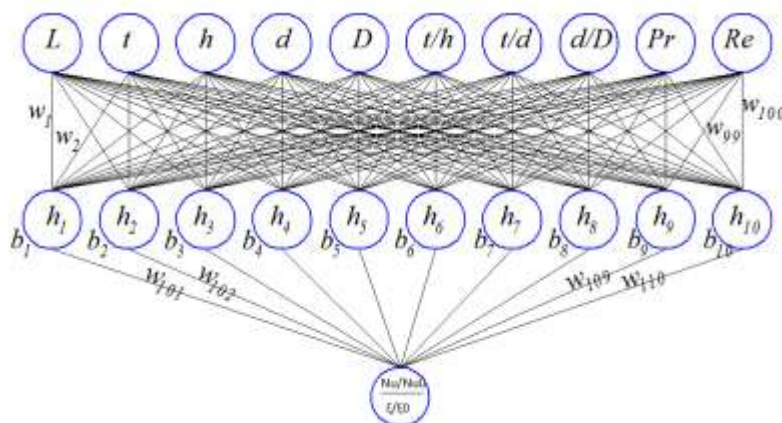


Рисунок 2.5 – Структура исходной нейронной сети

Исходная нейросетевая модель состоит из 10–14 входных нейронов (в зависимости от типа поверхностных интенсификаторов теплообмена таблицы 6 – 14), 10 нейронов скрытого слоя и единственного выходного нейрона.

Для обучения нейронной сети применяются методы многовариантных исчислений. Потеря представлена как функция веса и смещения [122]:

$$M(w_1, w_2, w_n, b_1, b_2, b_n), \quad (2.5)$$

где w_n – вес сигнала, поступающий на вход нейрона; b_n – смещение каждого нейрона ИНС.

Алгоритм работы ИНС предусматривает возможность определения величины потери M , в случае изменения веса w_1 . Для этого, необходимо частную производную $\partial M / \partial w_1$ представить в контексте [122]:

$$\frac{\partial M}{\partial w_1} = \frac{\partial M}{\partial y_p} \cdot \frac{\partial y_p}{\partial w_1}. \quad (2.6)$$

Расчет $\partial M / \partial y_p$ возможен, если M представить в виде $M = (y_t - y_p)^2$ [122]:

$$\frac{\partial M}{\partial y_p} = \frac{\partial (y_t - y_p)^2}{\partial y_p} = -2(y_t - y_p). \quad (2.7)$$

Далее необходимо рассчитать выход последнего нейрона, который представляет отношение тепловой и гидравлической эффективности:

$$y_p = (Nu / Nu_0) / (\xi / \xi_0) = f(w_{101}h_1 + w_{102}h_2 + w_{103}h_3 \dots + w_n h_n + b_{11}), \quad (2.8)$$

где f – функция активации сигмоида.

Так как w_{101} влияет только на h_1 :

$$\frac{\partial y_p}{\partial w_1} = \frac{\partial y_p}{\partial h_1} \cdot \frac{\partial h_1}{\partial w_1}, \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial y_p}{\partial h_1} = w_{101} \cdot f'(w_{101}h_1 + w_{102}h_2 + w_{103}h_3 \dots + w_n h_n + b_{11}), \quad (2.10)$$

Те же самые действия проводятся для $\partial h_1 / \partial w_1$.

Таким образом, $\partial M / \partial w_1$ разбита на несколько частей, которые будут оптимальны для подсчета:

$$\frac{\partial M}{\partial w_1} = \frac{\partial M}{\partial y_p} \cdot \frac{\partial y_p}{\partial h_1} \cdot \frac{\partial h_1}{\partial w_1}. \quad (2.11)$$

Аналогичные операции проводятся для каждого нейрона и его веса ИНС поверхностной интенсификации теплообмена.

2.4.3. Разработка исходной модели ИНС и оценка ее ошибки

При разработке исходной модели ИНС и для оценки ее ошибки применяется метод 0,632-бутстрэпа [119]. Из общей базы данных формируется обучающая выборка таким же объемом на основе процедуры сэмпинга с замещением. Вероятность выбора каждой записи для обучающей выборки составляет 0,632. Обучающая выборка будет состоять из 63,2% записей от общей базы экспериментальных параметров. Не вошедшие в него записи используются для формирования тестовой выборки. Объем тестовой выборки составляет 36,8% от общей базы данных. Процесс формирования, обучающего и тестового множеств по данному методу представлен на рисунке 2.6.

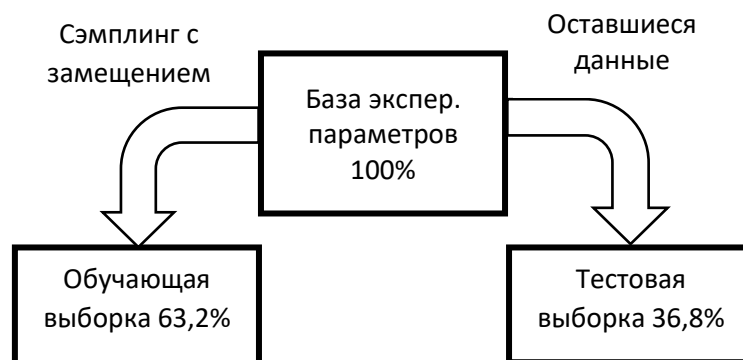


Рисунок 2.6 – Схема отбора данных

Метод бутстрэпирования включает следующие этапы оценки модели ИНС:

- 1) Из общей базы данных параметров экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена формируется две отдельные выборки для обучения и тестирования ИНС;
- 2) Определение ошибки нейросетевой модели при обучении и тестировании на сформированных выборках;
- 3) Расчет общей бутстрэп-ошибка ИНС;
- 4) Повторяются шаги 1–4 для каждого шага итерации;
- 5) Устанавливается итоговая ошибка нейросетевой модели поверхностной интенсификации теплообмена.

Для вычисления ошибки классификации на обучающем E_{train} и тестовом наборе E_{test} использована среднеквадратическая ошибка (MSE) потери [122]:

$$E_{train} = E_{test} = MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_t - y_p)^2, \quad (2.12)$$

где n – объем обучающей или тестовой выборки; y_t – истинное значение; y_p – прогнозируемое значение ИНС (результат работы ИНС).

Принцип потери, заключается в том, что меньшие потери соответствуют наилучшим результатам ИНС, а тренировка нейронной сети в стремлении минимизировать потери.

Итоговая бутстрэп-ошибка определяется по формуле [119]:

$$E_b = 0,632 \cdot E_{test} + 0,368 \cdot E_{train}. \quad (2.13)$$

Данный подход позволяет повысить точность классификации [119].

В качестве алгоритма обучения ИНС используется метод нахождения минимального значения функции потерь [122]. Минимизация функции заключается в определении ее максимальной впадины, которая позволяет выявить минимальную ошибку обучения ИНС. Для этого повышаем точность, для каждой итерации обучения. Это отражается в следующем уравнении [122]:

$$w_l \leftarrow w_l - \eta \frac{\partial M}{\partial w_l}, \quad (2.14)$$

где η является константой оценки обучения, что контролирует скорость обучения.

Если $\partial M / \partial w_l$ положительная, w_l уменьшится, что приведет к уменьшению M . Если $\partial M / \partial w_l$ отрицательная, w_l увеличится, что приведет к уменьшению потери M . Применяя это на каждый вес и смещение в сети, потеря будет постепенно снижаться, а показатели сети улучшатся.

2.4.4. Поиск оптимальной точки отсечения классов решений нейросетевой модели поверхностной интенсификации теплообменных устройств

Чувствительность и специфичность используются для оценки качества бинарной классификационной модели [119]. Чувствительность является мерой, характеризующей долю положительных результатов, которые являются правильными. Специфичность же является мерой, характеризующей долю правильно идентифицированных отрицательных результатов. Данные показатели заимствованы из медицинской практики, используемые в задачах оценки качества медицинских диагностических тестов [153, 155]. Для оценки предсказательной и классификационной способности, разрабатываемой ИНС используется аппарат ROC-анализа, который показал свою эффективность в оценке диагностической способности медицинских тестов и моделей [153]. Данный тип анализа позволяет вычислить оптимальную точку отсечения для кривой ROC (т.е. значение, при котором чувствительность и специфичность максимальны).

Как описывалось выше, методом нормализации выходные параметры ИНС приведены в диапазон от 0 до 1. Следовательно, значение наименьшей теплогидравлической эффективности, соответствующей определенному набору

геометрических и режимных характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена будет наиболее близкой к 0, а максимальное значение теплогидравлической эффективности соответственно наиболее близкой к 1.

В данной работе положительными значениями принимаем значения, где разность прогнозируемого ИНС параметра и его фактического значения не превысит 0,05, что может быть представлено в следующем выражении

$$|y_p - y_t| \leq 0,05, \quad (2.15)$$

где y_t – истинное значение, y_p – прогнозируемое значение ИНС.

Отрицательными значениями примем параметры теплогидравлической эффективности, генерируемые ИНС, где разность с фактическими превысит 0,05:

$$|y_p - y_t| \geq 0,05. \quad (2.16)$$

Для оценки качества разрабатываемой нейросетевой модели поверхностной интенсификации теплообмена, кроме положительных и отрицательных значений ИНС необходимо определить какие значения будут считаться истинными, а какие ложными. В терминологии ROC – анализа первые называются истинно положительным (TP), вторые — ложно отрицательным множеством (FN). При этом параметр, варьируя которым, мы будем получать то или иное разбиение на два класса называется порогом, или точкой отсечения (cut – off value). В зависимости от него будут получаться различные величины ошибок I и II рода [156].

В таблице 2.10 представлены ошибки I и II рода (confusion matrix), которая строится на основе результатов классификации моделью и фактической (объективной) принадлежностью примеров к классам [156].

Таблица 2.10

Матрица ошибок [156]

Модель	Фактически положительно	Фактически отрицательно
Положительно	TP	FP
Отрицательно	FN	TN

В таблице 2.10: TP – правильно определенные положительные данные; TN – правильно определенные отрицательные данные; FN – неправильно определенные положительные данные; FP – неправильно определенные отрицательные данные.

Для перевода значений в относительные используем выражения [156].

Сегмент истинно положительных данных [156]:

$$TRP = \frac{TP}{TP + FN} \cdot 100\% . \quad (2.17)$$

Сегмент ложно положительных данных [156]:

$$FRP = \frac{FP}{TN + FP} \cdot 100\% . \quad (2.18)$$

Чувствительность (Сегмент истинно положительных данных) [156]:

$$S_e = TRP \frac{TP}{TP + FN} \cdot 100\% . \quad (2.19)$$

Сегмент истинно отрицательных случаев (специфичность) [156]:

$$S_p = \frac{TN}{TN + FP} \cdot 100\% . \quad (2.20)$$

Таким образом, для построения ROC-кривой для каждого значения порога отсечения, которое меняется от 0 до 1 с шагом d_x (например, 0,01) рассчитываются значения чувствительности S_e и специфичности S_p . Далее строится график зависимости: по оси Y откладывается чувствительность S_e , по оси X – $FPR = 100 - S_p$ – доля ложно положительных случаев. Пример ROC-кривой – графика, позволяющий оценить качество модели [119, 153] представлена на рисунке 2.7.

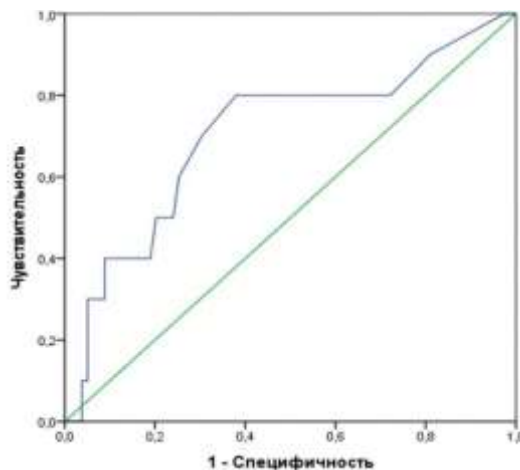


Рисунок 2.7 – Пример ROC – кривой

Одним из методов сравнения ROC – кривых является оценка площади под кривыми. Эта оценка может быть получена непосредственно вычислением площади под многогранником, ограниченным справа и снизу осями координат и слева вверху — экспериментально полученными точками (рисунок 2.8). Численный показатель площади под кривой называется AUC (Area Under Curve) [156]. С помощью численного метода трапеций его можно вычислить [156]:

$$AUC = \int f(x)dx = \sum_i \left[\frac{X_{i+1} + X_i}{2} \right] \cdot (Y_{i+1} - Y_i). \quad (2.21)$$

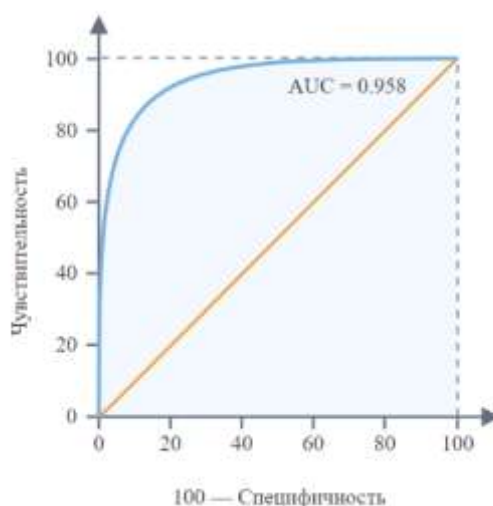


Рисунок 2.8 – Площадь под ROC – кривой

Метод оценки площади под ROC – кривой показывает, что чем больше показатель AUC, тем лучше качество модели. В таблице 2.11 представлена экспертная шкала значений AUC для оценки качества модели [156].

Таблица 2.11

Шкала оценки качества нейросетевой модели

Интервал	Качество модели
0,9÷1,0	Высокое
0,8÷0,9	Выше среднего
0,7÷0,8	Среднее
0,6÷0,7	Ниже среднего

0,5÷0,6	Низкое
---------	--------

Для каждого типа поверхностных интенсификаторов теплообмена построена ROC–кривая с значения AUC. Результаты представлены в таблице 2.12.

Таблица 2.12

Результаты оценки качества разрабатываемых моделей ROC – кривой

Тип поверхностного интенсификатора	Интервал AUC	Оптимальная точка отсечения
Кольцевые выступы	0,869	0,74
Полусферические выступы	0,974	0,8
Сферические выемки	0,871	0,78
Цилиндрические выемки	0,853	0,69
V–образные выемки	0,764	0,77
Подковообразные выемки	0,732	0,83
Капельные углубления	0,795	0,65
Спиральные выступы и спиральные проволочные вставки	0,841	0,66
Эллиптические выемки	0,81	0,73

По результатам оценки качества моделей видно, что практически все рассматриваемые типы интенсификаторов теплообмена характеризуются в соответствии с таблицей 2.11 как средние, выше среднего или высокого качества.

Следующим шагом будет определение оптимального порога отсечения классов решений нейронной сети. Для этого использованы нейросетевые модели, полученные при определении интервала AUC, т.к. они характеризуются наилучшим качеством. Результаты отсечения оптимальных классов решений представлен в таблице 2.12. Для каждого типа поверхностных интенсификаторов теплообмена построены графики зависимостей S_p и S_e от оптимальной точки отсечения $Cutt_off_k$. На рисунке 2.9 представлена данная зависимость для поверхностных интенсификаторов теплообмена в виде кольцевых выступов.

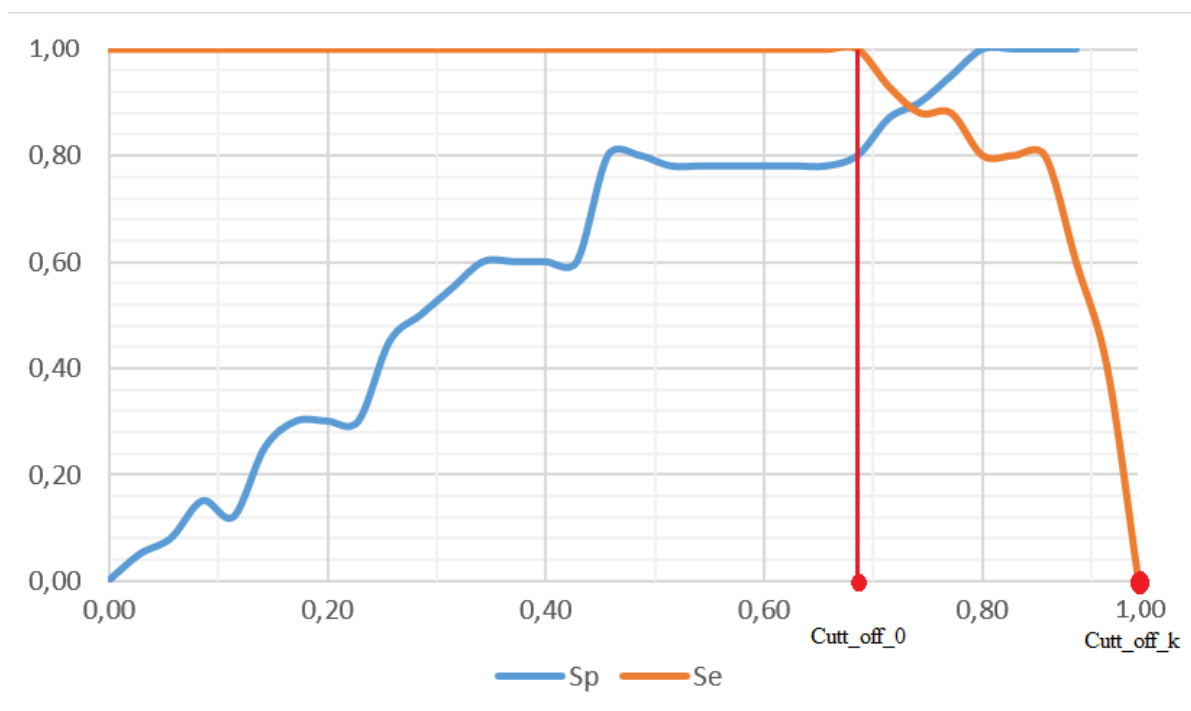


Рисунок 2.9 – Графики зависимостей Sp и Se от точки отсечения

Для определения оптимальной точки отсечения классов решения нейронной сети т.е. баланса между чувствительностью и специфичностью ($Se \approx Sp$) по графику, представленному на рисунке 2.12 используем следующее выражение [156]:

$$Cutt_off_0 = \min_k |Se_k - Sp_k|, \quad (2.22)$$

где k – итерация тестирования.

Порог представляет собой точку отсечения двух кривых (рисунок 2.12). Оптимальная точка отсечения классов решений для нейросетевой модели поверхностной интенсификации теплообмена поперечными кольцевыми выступами $Cutt_off_0 = 0,74$. С учетом выбранной точки отсечения классов решений нейросетевую модель можно считать высокочувствительной, что позволяет минимизировать ошибку I – го рода и повысить точность определения теплогидравлической эффективности при поверхностной интенсификации теплообмена при поверхностной интенсификации теплообмена поперечными кольцевыми выступами. Аналогичные операции проведены для каждого рассматриваемого в данной работе типа поверхностных интенсификаторов теплообмена. Результаты экспериментальной оценки ошибки и точности ИНС поверхностной интенсификации теплообмена представлены в таблице 2.13.

Результаты оценки модели ИНС поверхностной интенсификации

Тип интенсификатора	№	E_{test}	E_{train}	E_b	$E, \%$	Точность
Кольцевые выступы	1	0,036	0,057	0,043	3,5	96,5%
	2	0,013	0,047	0,025		
	3	0,03	0,046	0,035		
	4	0,024	0,031	0,026		
	5	0,039	0,051	0,043		
Полусферические выступы	1	0,059	0,041	0,05	3,5	96,5%
	2	0,039	0,024	0,03		
	3	0,051	0,029	0,042		
	4	0,023	0,019	0,021		
	5	0,031	0,013	0,024		
Сферические выемки	1	0,057	0,039	0,050	3,7	96,3%
	2	0,02	0,031	0,024		
	3	0,051	0,029	0,042		
	4	0,042	0,027	0,036		
	5	0,041	0,021	0,033		
Капельные углубления	1	0,065	0,018	0,047	3,8	96,2
	2	0,08	0,018	0,057		
	3	0,029	0,02	0,025		
	4	0,043	0,013	0,03		
	5	0,032	0,021	0,027		
V-образные выемки	1	0,1	0,032	0,074	3,6	96,4
	2	0,042	0,028	0,036		
	3	0,029	0,021	0,026		
	4	0,026	0,018	0,023		
	5	0,028	0,014	0,022		
Эллиптические выемки	1	0,093	0,016	0,064	3,9	96,1
	2	0,014	0,017	0,015		
	3	0,07	0,03	0,055		
	4	0,032	0,028	0,03		
	5	0,042	0,01	0,03		
Подковообразные выемки	1	0,028	0,025	0,026	3,4	96,6
	2	0,039	0,029	0,035		
	3	0,024	0,017	0,021		
	4	0,049	0,031	0,042		
	5	0,051	0,035	0,045		
Цилиндрические выемки	1	0,04	0,046	0,042	3,6	96,4
	2	0,058	0,041	0,051		
	3	0,014	0,046	0,025		
	4	0,024	0,032	0,026		
	5	0,031	0,039	0,033		
Спиральные выступы и спиральные проволочные вставки	1	0,1	0,042	0,078	4,2	95,8
	2	0,014	0,025	0,018		
	3	0,059	0,06	0,059		
	4	0,018	0,029	0,022		
	5	0,031	0,041	0,034		

Результаты, представленные в таблице 2.13 показывают, что для каждого типа поверхностных интенсификаторов теплообмена исходная нейросетевая модель имеет незначительную погрешность.

2.5. Оптимизация структуры нейросетевой модели поверхностной интенсификации теплообменного оборудования

Эффективность ИНС характеризуется такими оптимальными параметрами как вес, смещение и количество нейронов в модели. Оптимальное решение в большинстве случаев достигается методом проб и ошибок [119] или малоэффективными стратегиями перебора различных вариантов структур [126]: постепенное наращивание, построение заведомо слишком сложной сети с последующим упрощением, поочередное наращивание и упрощение.

Практическое применение нейросетевых технологий показывает, что упрощение нейронной сети приводит к значительным ошибкам при моделировании целевой зависимости в реальных задачах. Усложнение ИНС приводит к наличию свободных параметров, которые приводят к снижению ее обобщающей способности [158].

На сегодняшний день существуют различные методы оптимизации искусственных нейронных сетей. Далее рассмотрим некоторые алгоритмы оптимизации, наиболее подходящих для нейросетевого моделирования поверхностной интенсификации теплообмена.

В основе генетического алгоритма (англ. genetic algorithm) заложен, алгоритм нахождения глобального экстремума многоэкстремальной функции, суть которого заключается в параллельной обработке множества альтернативных решений. В ГА используются следующие операторы: селекция, скрещивание и мутация [157].

Работа ГА продолжается, пока не выполнится заданное число поколений или один из критериев реализующий прерывание алгоритма [157]. Алгоритм функционирования ГА представлен на рисунке 2.10:

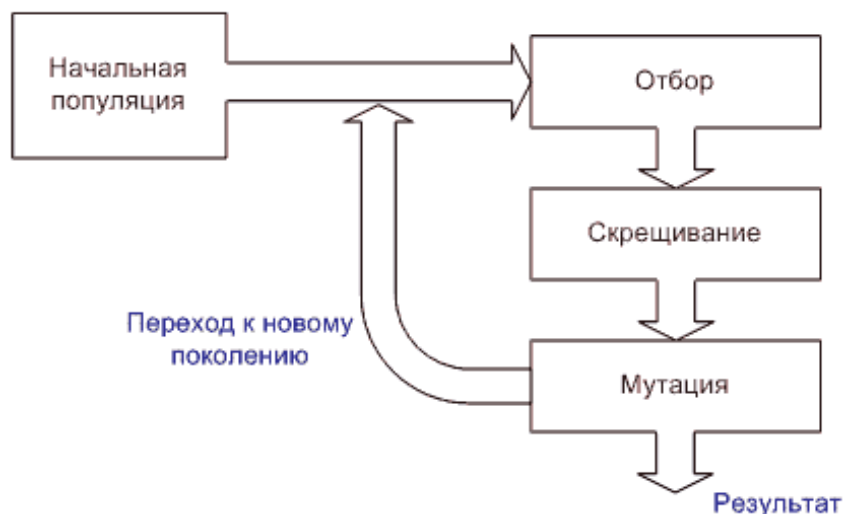


Рисунок 2.10 – Функционирование ГА [157]

Метод роя частиц (англ. Particle Swarm Optimization) привлекла большое внимание из-за своей простоты. МРЧ включает частицы, которые постоянно движутся в сторону получения лучших значений, чтобы удовлетворить свою целевую функцию. Каждая частица в МРЧ характеризуется своей скоростью и положением. Кроме того, частицы МРЧ не спариваются и не дают нового потомства, в отличие от ГА. Более того, не происходит мутации и частицы не заменяются новыми. Алгоритм МРЧ индексирует частицы для поиска позиций с более желаемой пригодностью.

МРЧ базируется на имитации группового поведения конечного множества агентов (например, рыб или птиц в природе) [158]. На рисунке 2.11 представлен алгоритм роя частиц, видно что данный метод представляет собой итеративный процесс, постоянно находящийся в изменении. Постоянно происходит расчёт искомой функции и поиск наилучшего значения [158].

Алгоритм МРЧ состоит из пяти основных шагов:

1. Присвоение случайных значений скорости и положению каждой частицы.
2. Оценка пригодности частиц с помощью целевой функции.
3. Определение наилучшего решения для частиц в рамках итерации.
4. Обновление положения и скорости частиц.
5. Повторение шагов 2 и 4 до достижения критерия сходимости или превышения определенного количества итераций.

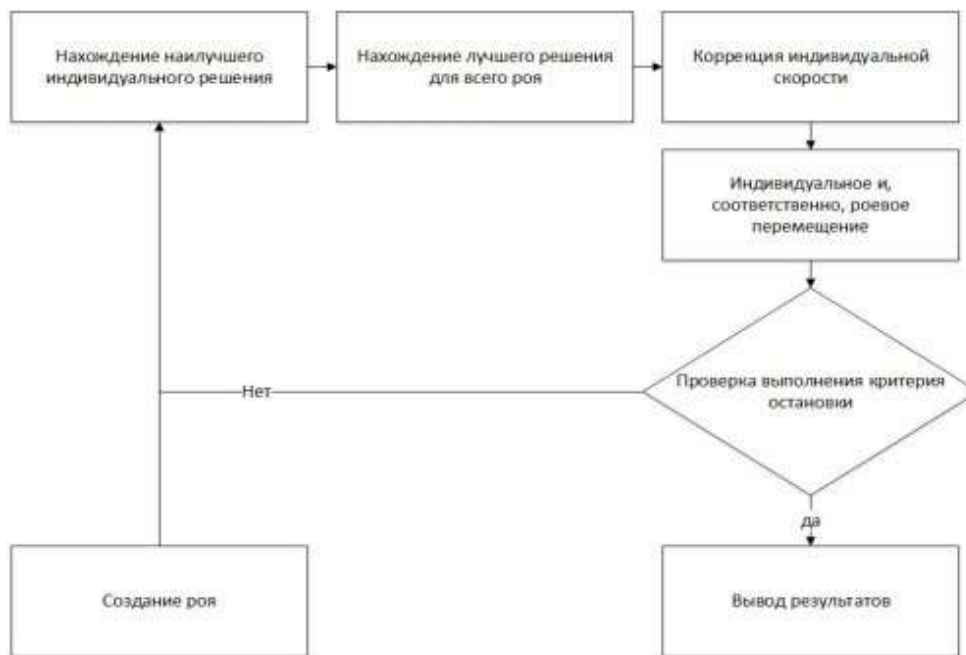


Рисунок 2.11 – Алгоритм функционирования МРЧ [158]

Алгоритм пчел (англ. Bee Algorithm) — это оптимизационный алгоритм, в основе которого лежит поведение пчёл в живой природе [158]. Рассматриваемый метод ПА использует алгоритм схожий с добычей нектара медоносными пчелами. Схема работы алгоритма пчел представлена на рисунке 2.12.



Рисунок 2.12 – Общая схема работы алгоритма пчел

Работу алгоритма можно разбить на два этапа:

1. Инициализация. При инициализации для n разведчиков генерируются начальные положения или используется метод случайного перебора [158]:

$$X_i = rand(G(X)), i = 1, \dots, n^s. \quad (2.26)$$

2. Локальный поиск. После формирования списков лучших и перспективных областей, в их окрестности отправляются рабочие. При каждой итерации рассматриваются новые области в соответствии со следующим выражением [158]:

$$X_{(i-1)c^b+kj}^b = N_{ij-1}^b + Rnd \cdot rad, i = 1, \dots, n^b, k = 1, \dots, c^b, \quad (2.27)$$

$$X_{n^b c^b + (i-1)c^b + kj}^g = N_{ij-1}^g + Rnd \cdot rad, i = 1, \dots, n^g, k = 1, \dots, c^g, \quad (2.28)$$

где i – количество пчел – разведчиков; N^b, N^g – количество лучших областей; Rnd – случайный коэффициент; rad, i – радиус исследуемой области; c – общее количество пчел; k – минимальное расстояние между соседними областями [158].

Одной из самых распространённой техникой оптимизации является алгоритм стохастического градиентного спуска (англ. stochastic gradient descent (SGD)), который представляет собой метод нахождения минимального значения функции потерь. Как уже отмечалось в разделе 2.3.3 Минимизация функции заключается в определении ее максимальной впадины, которая позволяет выявить минимальную ошибку обучения ИНС. Для этого повышаем точность, для каждой итерации обучения. Это отражается в следующем уравнении [122]:

$$w_l \leftarrow w_l - \eta \frac{\partial M}{\partial w_l}, \quad (2.29)$$

где η является константой оценки обучения (шаг обучения), что контролирует скорость обучения; M – потеря (ошибка); w – вес.

Если $\partial M / \partial w_l$ положительная, w_l уменьшится, что приведет к уменьшению M . Если $\partial M / \partial w_l$ отрицательная, w_l увеличится, что приведет к уменьшению потери M . Применяя это на каждый вес и смещение в сети, потеря будет постепенно снижаться, а показатели сети улучшатся.

Стохастический градиентный спуск обновляет каждый параметр, вычитая градиент оптимизируемой функции по соответствующему параметру и масштабируя его на шаг обучения η , являющийся гиперпараметром. Если η увеличивается, то метод будет расходиться; если уменьшается — будет сходиться. Правило пересчета [122]:

$$i = U \{1, 2, \dots, n\}, \quad (2.30)$$

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \eta \nabla f_i(\theta_t), \quad (2.31)$$

где f_i — функция, подсчитанная на i — ом части данных, и индекс i выбирается случайным образом; θ — параметр оптимизации; η — шаг обучения.

Необходимо определить dM / dw . Для этого выберем функцию потерь среднеквадратичной ошибки [122]:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_p)^2. \quad (2.32)$$

Особенностью работы СГС является попадание в область локального минимума функции. Как показано на рисунке 2.13 локальный минимум весов для одной пары обучающих примеров (набора пар) может не являться локальным минимумом для другой пары (набора пар). Это не дает нам гарантии, что действительно был найден глобальный минимум функции. Для решения данной проблемы в данной работе предлагается дополнительно настраивать скорость обучения и запускать СГС из нескольких случайных точек.



Рисунок 2.13 – Локальный и глобальный минимумы функции

Проведенный анализ методов оптимизации ИНС показал, что их общая цель заключается в нахождении минимума непрерывной функции ошибки, а различие заключается в применяемых подходах для обновления параметров модели. В таблице 2.14 представлено сравнение алгоритмов оптимизации ИНС.

Таблица 2.14

Сравнение методов оптимизации ИНС при поверхностной интенсификации теплообменного оборудования

	Преимущества	Недостатки
Генетический алгоритм [157]	<ul style="list-style-type: none"> • По сравнению с другими алгоритмами, с большей вероятностью способны находить глобальные оптимумы; • Используется в задачах, которые сложно формализовать математически т.к. функция приспособленности может быть выражена на уровне алгоритма; • Устойчивость к шуму; • Реализация на уровне параллельных вычислений, что позволяет значительно повысить скорость работы алгоритма; • Непрерывное обучение популяции при постоянном изменении окружающей среды. 	<ul style="list-style-type: none"> • Сложность формализации исходной задачи на уровне генов и хромосом, операторов отбора, скрещивания и мутации; • Требуется определения дополнительных внешних параметров работы алгоритма (размер популяции, вероятности скрещивания и мутации, способ отбора и кроссинговера и т.п.); • Высокая вычислительная ресурсоемкость; • Не гарантировано нахождение глобального оптимума т.к. некоторые особи в популяции могут быстро занять локальный оптимум и потянуть за собой всю популяцию;
Метод роя частиц [158]	<ul style="list-style-type: none"> • Простота реализации (низкая алгоритмическая сложность в реализации); • Эффективен для глобальной оптимизации, т.к. застревания в локальном минимуме маловероятно; • Большая скорость сходимости; • Наличие памяти (все частицы хорошего знания решения сохраняются), в то время как ГА (генетический алгоритм), предыдущие знания меняются с изменением населения; • Возможности включения других, более сложных методов. 	<ul style="list-style-type: none"> • Сильная зависимость качества сходимости от выбранных коэффициентов; • Скорость некоторых частиц может существенно возрасти и они могут покинуть область с ограничениями на значения переменных $x_{min} < x_{ij} < x_{max}$. • Частицы в МРЧ обмениваются информацией только посредством текущего лучшего поиска, в то время как в ГА хромосомы обмениваются информацией друг с другом, так что все население перемещается в оптимальную область.

Продолжение таблицы 2.14

Алгоритм пчел [158]	<ul style="list-style-type: none"> • Возможность эффективного разделения на параллельные процессы; • Высокая скорость работы; • Качественные решения даже на задачах большой размерности; • Способен со 100% вероятностью обнаружить локальный экстремум функции, имеющей один экстремум на области поиска. • Возможность объединения с генетическими алгоритмами. 	<ul style="list-style-type: none"> • Значительная зависимость от устанавливаемых параметров; • Неустойчивый к незначительным изменениям настроечных параметров; • Зависимость временной сложности пчелиного алгоритма от числа вершин – $O(n^2)$. • Низкая скорость сходимости • Большая вероятность «застрять» в локальном минимуме.
Стохастический градиентный спуск [122]	<ul style="list-style-type: none"> • Скорость обновления весов w позволяет реализовать динамическое обучение; • Обеспечивает обучение ИНС на основе больших баз данных (т.к. используется не вся база данных, а только ее сегмент, которого может оказаться достаточно для обучения); • Реализует разные варианты обучения; • Простота реализации. 	<ul style="list-style-type: none"> • Требует ряда – O, таких как параметр регуляризации и количество итераций; • Алгоритм может не сходиться или сходиться слишком медленно • Чувствителен к масштабированию функций. • Может "застрять" в одном из локальных минимумов. (для устранения используют технику встряхивания коэффициентов); • Возможно переобучение, то есть классификация становится неустойчивой, и вероятность ошибки увеличивается.

Эффективность каждого метода возможно оценить только после ее реализации. Положительный эффект метода при решении одной задачи не гарантирует получения аналогичных положительных результатов при решении второй. Для выбора наиболее эффективного метода оптимизации ИНС используемой для решения задачи НС–моделирования поверхностной интенсификации теплообмена сравним результаты реализации рассмотренных методов оптимизации ИНС разработанной на одинаковом, для каждого метода, наборе сформированной базы данных результатов экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена. На рисунке 2.14 представлено сравнение результатов оптимизации методами генетического алгоритма (GA), роя частиц (PSO), алгоритма пчел (BA) и стохастическим градиентным спуском (SGD) поверхностной интенсификации теплообмена.

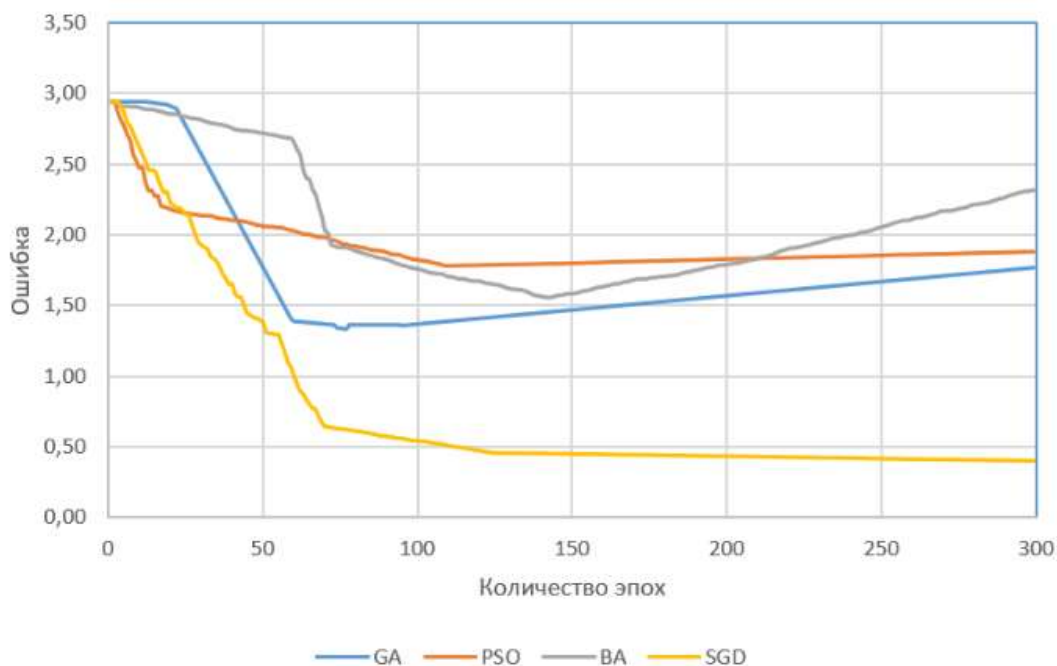


Рисунок 2.14 – Сравнение методов оптимизации поверхностной интенсификации полусферическими выступами.

По рисунку 2.14 видно, что метод *SGD* показал наилучший результат для набора экспериментальных данных результатов исследований поверхностной интенсификации теплообменного оборудования. Аналогичные результаты получены для каждого типа поверхностных интенсификаторов теплообмена, рассматриваемых в данной диссертационной работе. Точность результатов, достигнутых в ходе оптимизации ИНС методом *SGD*, объясняется, тем, что исходная выборка является сбалансированной, т.к. предварительно устранены аномалии, связанные с погрешностью измерения или интерпретации экспериментальных данных (п.2.3.2), что положительно сказывается на производительности метода *SGD*.

2.6. Разработка инструментального программного обеспечения, реализующего предложенный метод исследования

На базе описанных в предыдущей главе методик формирования исходных данных и разработки нейросетевой модели реализовано инструментальное программное обеспечение, которое предназначено для решения задач, связанных с исследованием однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств

теплоносителей, режимных и геометрических параметров трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы. В инструментальном программном обеспечении производится ИС-моделирование поверхностной интенсификации теплообмена. В таблице 2.15 представлен состав разработанного математического обеспечения и его соответствие решаемым задачам, связанным с формированием и подготовкой исходных данных для моделирования и построением нейросетевой модели поверхностной интенсификации теплообмена.

Таблица 2.15

Состав разработанного математического обеспечения и его соответствие решаемым задачам

Решаемые задачи	Разработанное математическое обеспечение
Формирование базы эмпирических данных исследований поверхностной интенсификации теплообмена	Методика сбора и подготовки исходных данных к анализу
Построение исходной нейросетевой модели поверхностной интенсификации теплообмена	Методика построения нейросетевой модели
Оптимизация структуры нейросетевой модели	Метод и алгоритм СГС

Методика формирования и подготовки исходных данных позволяет сформировать базу данных для обучения ИНС для всех типов поверхностных интенсификаторов теплообмена. База данных сформирована на основе экспериментальных параметров, полученных в рамках опытных исследований поверхностной интенсификации теплоотдачи, гидравлического сопротивления и теплогидравлической эффективности. Сформированная база данных предварительно проходят этапы нормализации входных и выходных параметров, а также этапы устранения аномалий, связанных с погрешностью измерения или интерпретации экспериментальных данных.

При разработке исходной модели ИНС используется методика, на основе следствия из теоремы Арнольда – Колмогорова – Хехт – Нильсена [154]. Данная

методика позволяет найти оптимальную точку отсечения классов решения, а также оценить точность нейросетевой модели по полученной бутстрэп – ошибке.

Метод и алгоритм оптимизации СГС (стохастический градиентный спуск) позволяет повысить точность работы нейросетевой модели и значительно оптимизировать структуру исходной модели ИНС.

Предложенное математическое обеспечение позволяет разработать инструментальное программное обеспечение НС–моделирования поверхностной интенсификации теплообмена, позволяющее получить наиболее оптимальные характеристики трубчатых и пластинчатых теплообменных поверхностей.

2.6.1. Средства разработки

ИНС разработана на базе языка программирования Python. Для решения задачи НС–моделирования интенсификации теплообмена использовались библиотеки: NumPy, TensorFlow, Pandas, Keras, Matplotlib и Theano.

NumPy (Numeric Python) – фундаментальный пакет Python. Он позволяет работать с массивами данных и векторами. Подключение к нему пакета **SciPy** (Scientific Python) позволяет реализовывать различные алгоритмы и прикладные математические техники (минимизация, преобразование Фурье, регрессия).

Одной из основных объектов, определенных в NumPy, – это N – мерный тип массива, называемый ndarray, который описывает коллекцию предметов одного типа. Каждый элемент в ndarray занимает одинаковый размер блока в памяти, а элемент в ndarray является объектом типа данных dtype.

Элемент, извлеченный из объекта ndarray, представлен объектом Python одного из скалярных типов массива. На рисунке 2.15 показана взаимосвязь между ndarray, объектом типа данных (dtype) и скалярным типом массива.

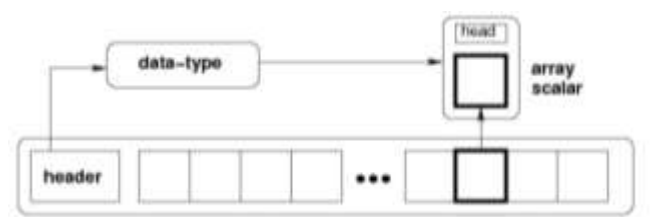


Рисунок 2.15 – Взаимосвязь между ndarray, объектом типа данных (dtype) и скалярным типом массива [130]

Массивы схожи со списками в python и могут быть многомерными. Функция `array` принимает два аргумента: список для конвертации в массив и тип для каждого элемента. Ко всем элементам можно получить доступ и производить различные манипуляции. **Array slicing** использует многомерные массивы, подключая каждый срез, как фильтр.

Метод **shape** возвращает количество строк и столбцов в матрице. Метод **dtype** возвращает тип переменных, хранящихся в массиве. Метод **len** возвращает длину первого измерения (оси). Метод **in** используется для проверки на наличие элемента в массиве. Метод **reshape** создает новый массив, при этом не модифицирует оригинальный.

Метод **NumPy** предоставляет много удобных функций, которые реализуются с помощью различных методов и объектов. Выше было представлено описание лишь некоторых из них, которые используются при НС–моделировании поверхностных интенсификаторов теплообмена.

Pandas работает поверх NumPy и широко используется для обработки и анализа данных. Модуль **DataFrame** – позволяет хранить и обрабатывать табличные данные, как двумерную структуру данных. Pandas предоставляет богатый набор функций для DataFrame. Например, выравнивание данных, статистика данных, нарезка, группировка, объединение, объединение данных и т.д.

Библиотека Pandas Python несет в себе 3 основные структуры данных:

- **Series** – это небольшой объект, похожий на одномерный массив, который не изменяет свои размеры;
- **DataFrame** – это объект, обладающий табличной структурой данных, который может изменять свои размеры;
- **Panel** – это объект, который имеет структуру трехмерного массива, способного изменять свои размеры.

Модуль DataFrame Python Pandas для построения нейросетевой модели поверхностной интенсификации теплообмена построен с использованием файлов CSV. Файл **CSV** — это текстовый файл, в котором хранятся данные для каждой

строки. Элементы разделяются запятой. Метод **read_csv** (`file_name`) используется для чтения данных из файла CSV в DataFrame.

Pandas предлагает большое количество встроенных методов, помогающих проводить статистический анализ данных.

Matplotlib позволяет визуализировать данные. Для визуализации используется объемный код т.к. matplotlib является низкоуровневой библиотекой.

Для визуализации результатов работы нейросетевой модели поверхностной интенсификации теплообмена используются следующие инструменты библиотеки: **scatterplot** (точечный график), **best fit** (график линейной регрессии) и **pairplot** (парный график). Визуализация представлена на рисунках 2.16 – 2.18.

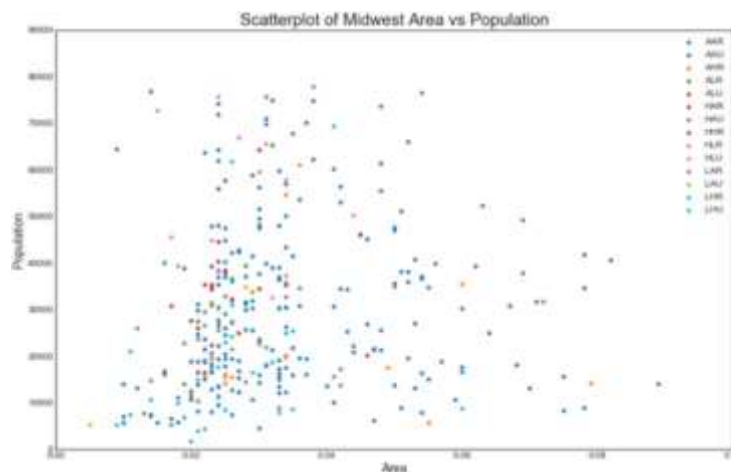


Рисунок 2.16 – Scatterplot [130]

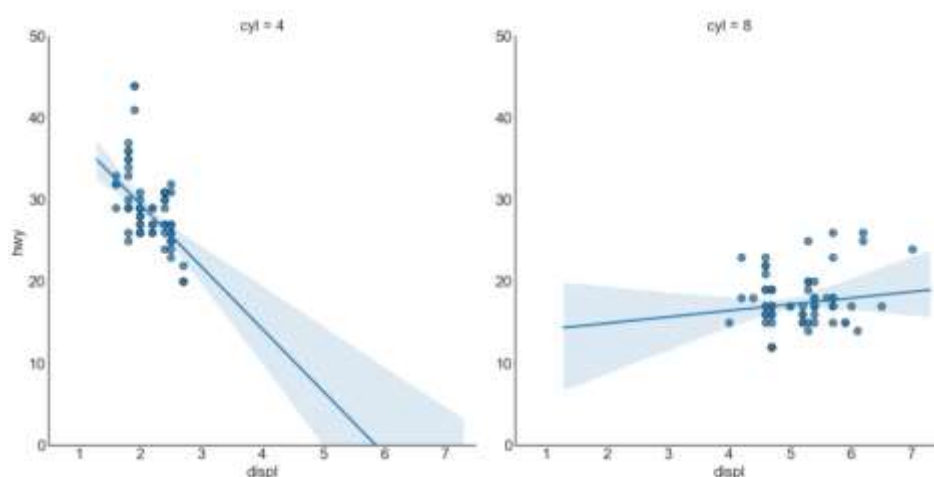


Рисунок 2.17 – Best fit [130]

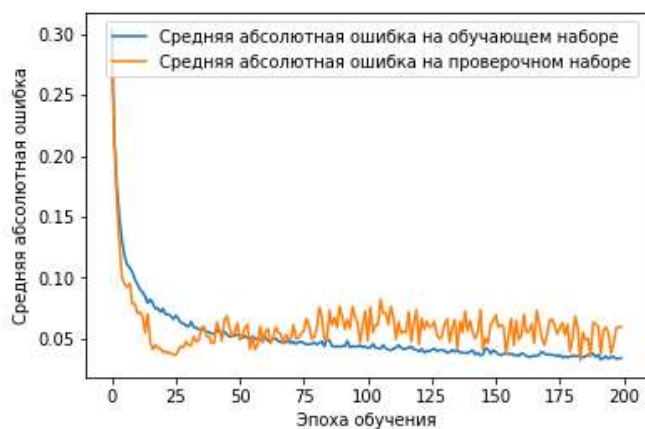


Рисунок 2.18 – Pairplot

Theano – библиотека с открытым исходным кодом, где для вычислений используется синтаксис NumPy, что позволяет реализовывать высокоэффективные параллельные вычисления.

TensorFlow – это библиотека с открытым исходным кодом, которая позволяет масштабировать машинное обучение с сохранением кода программы. Эта библиотека позволяет распределить вычисления по разным CPU или GPU, что в свою очередь значительно увеличивает вычислительную мощность. Работа с TensorFlow совпадает с кодом в случае Theano, с тем исключением, что некоторые функции имеют дополнительные параметры, позволяющие управлять величиной исходящего изображения. Важное отличие в том, что TensorFlow позволяет не определять величину каждой размерности на входе.

Keras оперирует объектами используя библиотеки с открытым кодом (TensorFlow, Theano). Keras включает три типа функций: модели, слои, модули.

2.6.2. Структура и описание исходного кода инструментального программного обеспечения

Функционирование разработанного инструментального программного обеспечения НС-моделирования поверхностной интенсификации теплообмена можно разделить на шесть основных этапов.

Первый этап заключается в подключении требуемых библиотек и модулей, которые будут использованы в процессе функционирования инструментального программного обеспечения.

Листинг 1. Подключение модулей и библиотек.

```
from tensorflow.keras.models import Sequential
from tensorflow.keras.layers import Dense
from pandas import read_csv, DataFrame
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
```

Второй этап состоит из команд, позволяющих загрузить параметры экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена для обучения и тестирования ИНС.

Листинг 2. Загрузка обучающей и тестовой выборки.

```
dataset = read_csv('NMdiss_1\I_in_ringPr_Nu - E.txt',',')
dataset.head()
dataset = np.array(dataset)
dataset1 = read_csv('NMdiss_1\I_out_ringPr_Nu - E.txt',',')
dataset1.head()
dataset1 = np.array(dataset1)
dataset2 = read_csv('NMdiss_1\I_in_t_ringPr_Nu - E.txt',',')
dataset2.head()
dataset2 = np.array(dataset2)
dataset3 = read_csv('NMdiss_1\I_out_t_ringPr_Nu - E.txt',',')
dataset3.head()
dataset3 = np.array(dataset3)
x_train = dataset
y_train = dataset1
x_test = dataset2
y_test = dataset3
```

Третий этап – нормализация загруженных данных. При нормализации производятся операции по приведению входных и выходных данных в диапазон от 0 до 1.

Листинг 3. Нормализация загруженных данных.

```
mean = x_train.mean(axis = 0)
std = x_train.std(axis = 0)
def norm(x):
    return (x - mean) / std
x_train = norm(x_train);
x_test = norm(x_test);
min_y = y_train.min()
max_y = y_train.max() - min_y
y_train = (y_train - min_y) / max_y
y_test = (y_test - min_y) / max_y
```

Четвертый этап заключается в разработке архитектуры ИНС и настройке функции активации. Для оценки точности работы ИНС применяется функция mean square error (средне – квадратичная ошибка).

Листинг 4. Построение архитектуры ИНС.

```
model = Sequential()
model.add(Dense(64, activation = 'relu', input_shape = (yxt.shape[1],)))
model.add(Dense(64, activation = 'relu'))
model.add(Dense(1, activation = 'sigmoid'))
print(model.summary())
model.compile(optimizer = 'sgd', loss = 'mse', metric = ['mae'])
```

Пятый этап состоит в обучении и тестировании структуры ИНС.

Листинг 5. Обучение и тестирование ИНС

```
history = model.fit(x_train,
                    y_train,
                    epochs = 500,
                    validation_split = 0.1,
                    verbose = 2)
pred = model.predict(x_test).flatten()
pred = pred * max_y + min_y
y_test = y_test * max_y + min_y
err = np.mean(abs(pred - y_test))
```

Шестой этап – визуализация полученных результатов обучения и тестирования ИНС. На данном этапе производится вывод оценки точности работы ИНС, результатов сравнения спрогнозированных значений ИНС и реальных значений экспериментальных параметров обучающей и тестовой выборки. Формируются графики с разбросом спрогнозированных значений ИНС и графики сравнения средней абсолютной ошибки на обучающем наборе и тестовом наборе.

Листинг 6. Визуализация полученных результатов нейросетевого моделирования.

```
print(err)
print(np.mean(y_test))
for i in range(len(pred)):
    print("Выход ИНС (спрогнозированное значение): ", pred[i],
          ", реальное значение: ", y_test[i],
          ", разница: ", pred[i] - y_test[i])
print("Средняя абсолютная ошибка на обучающем
наборе: ", np.mean(history.history['mean_absolute_error']), "%")
print("Средняя абсолютная ошибка на проверочном
наборе: ", np.mean(history.history['val_mean_absolute_error']), "%")
print("Средний модуль отклонения: ", err)
```

```

#считаем графики ошибки
plt.plot(history.history['mean_absolute_error'],
         label = 'Средняя абсолютная ошибка на обучающем наборе')
plt.plot(history.history['val_mean_absolute_error'],
         label = 'Средняя абсолютная ошибка на проверочном наборе')
plt.xlabel('Эпоха обучения')
plt.ylabel('Средняя абсолютная ошибка')
plt.legend()
plt.show()
plt.scatter(y_test,pred)
plt.xlabel('Правильные значения')
plt.ylabel('Предсказания')
plt.axis('equal')
plt.xlim(plt.xlim())
plt.ylim(plt.ylim())
plt.plot([-100,100], [-100,100])
error = pred - y_test
plt.hist(abs(error), bins = 25)
plt.xlabel("Значение ошибки, $1K")
plt.ylabel("Количество")
plt.show()

```

2.6.3. Функционирование инструментального программного обеспечения

Функционирование инструментального программного обеспечения рассмотрим на примере программы для НС–моделирования поверхностной интенсификации теплообмена.

Работа программы начинается с этапа загрузки параметров экспериментальных исследований, которые будут использованы для обучения и тестирования разрабатываемой нейросетевой модели поверхностной интенсификации теплообмена. Загружаемые параметры сформированы по результатам экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена [1 – 117,128 – 152]. Пользователю предоставляется возможность произвести преднастройку основных параметров структуры нейросетевой модели: выбрать тип поверхностного интенсификатора, выбрать входные и выходные параметры искусственной нейронной сети, установить количество эпох обучения и т.д. По умолчанию программное обеспечение направлено на разработку нейросетевой модели, устанавливающей взаимосвязи между режимными и геометрическими параметрами поверхностной интенсификации при определении теплогидравлической эффективности. Кроме того, предусмотрена возможность

прогнозирования значения каждого, отдельного параметра в зависимости от изменения совокупности других параметров, соответствующих определенному типу поверхностного интенсификаторов теплообмена. Так, установив на выходе ИНС значение диаметра сферической выемки, а на входе все остальные режимные и геометрические параметры, в том числе тепловую и гидравлическую эффективность, ИНС сформирует наиболее оптимальные значения диаметра сферической выемкой для выбранной совокупности входных параметров. Это позволяет повысить эффективность теплообменного оборудования, при отсутствии информации о некоторых режимных и геометрических параметрах или спрогнозировать влияние изменения одного параметра на остальные и теплогидравлическую эффективность в целом. Далее рассмотрим основные этапы работы разработанного программного обеспечения.

На рисунке 2.19 представлен **первый этап** работы программного обеспечения, формируемый при ее запуске.



```
In [46]: runfile('C:/Users/ruslan/.spyder-py3/temp_all.py', wdir='C:/Users/ruslan/.spyder-py3')
Выберите тип поверхностного интенсификатора:
1---'Кольцевые выступы'
2---'Полусферические выступы'
3---'Сферические выемки'
4---'Капельные углубления'
5---'У-образные углубления'
6---'Эллиптические выемки'
7---'Подковообразные выемки'
8---'Спиральные выступы и спиральные проволочные вставки'
9---'Цилиндрические выемки'
Введите номер типа интенсификатора: 2
dataset Float64 (82, 1) [[1.7000e-01 7.4000e-01 1.0000e-02 ...
1.1700e+00 9.7200e+00 1.0000e+0 ...
dataset1 Float64 (82, 1) [[0.50751211]
[0.78125 ]
dataset2 Float64 (10, 1) [[5.0000e-04 0.0000e-01 1.0000e-02 ...
1.0300e+00 0.3000e+00 8.0000e+0 ...
dataset3 Float64 (16, 1) [[0.68811169]
[1.16042105]
err Float64 1 0.4295549904984863
error Float64 (16, 16) [[ 9.97202477e-02 5.61512121e-01
-4.86605364e-02 ... 7.03018732e-01 ...
i. int 1 35
```

Рисунок 2.19 – Запуск программного обеспечения

На первом этапе необходимо выбрать тип поверхностного интенсификатора, для которого будет разработана ИНС. Для этого необходимо ввести цифровое значение соответствующего типа интенсификатора. Введем значение 2, что соответствует полусферическим выступам. Далее после успешной загрузки входных и выходных, обучающих и тестовых выборок результатов экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена, программа информирует о выбранном параметре.

На **втором этапе** программное обеспечение определяет необходимое количество входных и выходных нейронов, скрытых слоев нейронной сети и требуемое количество обучаемых и тестируемых параметров на каждом слое. В

заклучении формируется исходная структура ИНС с информацией о выбранных параметрах структуры. Данные операции производятся в автоматическом режиме, по результатам анализа загружаемых входных и выходных параметров, при выборе типа поверхностного интенсификатора. На рисунке 2.20 представлен фрагмент программного обеспечения для данного этапа.

Layer (type)	Output Shape	Param #
dense_93 (Dense)	(None, 64)	768
dense_94 (Dense)	(None, 64)	4160
dense_95 (Dense)	(None, 1)	65

Total params: 4,993
Trainable params: 4,993
Non-trainable params: 0

None
Train on 73 samples, validate on 9 samples

dataset	float64 (82, 11)	[[1.2000e-03 7.4000e-01 1.0000e-02 ... 1.1700e+00 9.7200e+00 3.0000e+0 ... [0.50761421] [0.70125]]
dataset1	float64 (82, 1)	[[5.0000e-04 9.0000e-01 1.0000e-02 ... 1.0300e+00 8.1000e+00 8.0000e+0 ... [0.6881168] [1.16842105]
dataset2	float64 (10, 11)	[[5.0000e-04 9.0000e-01 1.0000e-02 ... 1.0300e+00 8.1000e+00 8.0000e+0 ... [0.6881168] [1.16842105]
dataset3	float64 (10, 1)	[[5.0000e-04 9.0000e-01 1.0000e-02 ... 1.0300e+00 8.1000e+00 8.0000e+0 ... [0.6881168] [1.16842105]
avr	float64 1	0.43614052295621736
error	float64 (10, 16)	[[0.05643023 -0.48648632 -0.06437909 ... 0 ...
l	int 1	15
max_y	float64 1	1.766195110800002

Рисунок 2.20 – Структура ИНС

Обучение ИНС производится на протяжении 300 эпох для всех типов поверхностных интенсификаторов. На третьем этапе работы программного обеспечения визуализируются результаты обучения для каждой эпохи, а также среднее значение выходных параметров тестовой выборки и средний модуль отклонения ошибки работы ИНС. На рисунке 2.21 представлены результаты обучения с 291 по 300 эпоху.

Epoch 291/300	- 8s - loss: 0.0017 - mean_absolute_error: 0.0276 - val_loss: 0.0022 - val_mean_absolute_error: 0.0340
Epoch 292/300	- 8s - loss: 0.0019 - mean_absolute_error: 0.0304 - val_loss: 0.0023 - val_mean_absolute_error: 0.0381
Epoch 293/300	- 8s - loss: 0.0017 - mean_absolute_error: 0.0273 - val_loss: 0.0015 - val_mean_absolute_error: 0.0296
Epoch 294/300	- 8s - loss: 0.0019 - mean_absolute_error: 0.0302 - val_loss: 0.0038 - val_mean_absolute_error: 0.0457
Epoch 295/300	- 8s - loss: 0.0021 - mean_absolute_error: 0.0313 - val_loss: 0.0028 - val_mean_absolute_error: 0.0398
Epoch 296/300	- 8s - loss: 0.0019 - mean_absolute_error: 0.0298 - val_loss: 0.0025 - val_mean_absolute_error: 0.0351
Epoch 297/300	- 8s - loss: 0.0020 - mean_absolute_error: 0.0295 - val_loss: 0.0041 - val_mean_absolute_error: 0.0483
Epoch 298/300	- 8s - loss: 0.0020 - mean_absolute_error: 0.0318 - val_loss: 0.0036 - val_mean_absolute_error: 0.0482
Epoch 299/300	- 8s - loss: 0.0021 - mean_absolute_error: 0.0310 - val_loss: 0.0051 - val_mean_absolute_error: 0.0644
Epoch 300/300	- 8s - loss: 0.0021 - mean_absolute_error: 0.0308 - val_loss: 0.0030 - val_mean_absolute_error: 0.0393
	0.43614052295621736 1.0389509923125

dataset	float64 (82, 11)	[[1.2000e-03 7.4000e-01 1.0000e-02 ... 1.1700e+00 9.7200e+00 3.0000e+0 ... [0.50761421] [0.70125]]
dataset1	float64 (82, 1)	[[5.0000e-04 9.0000e-01 1.0000e-02 ... 1.0300e+00 8.1000e+00 8.0000e+0 ... [0.6881168] [1.16842105]
dataset2	float64 (10, 11)	[[5.0000e-04 9.0000e-01 1.0000e-02 ... 1.0300e+00 8.1000e+00 8.0000e+0 ... [0.6881168] [1.16842105]
dataset3	float64 (10, 1)	[[5.0000e-04 9.0000e-01 1.0000e-02 ... 1.0300e+00 8.1000e+00 8.0000e+0 ... [0.6881168] [1.16842105]
avr	float64 1	0.43614052295621736
error	float64 (10, 16)	[[0.05643023 -0.48648632 -0.06437909 ... 0 ...
l	int 1	15
max_y	float64 1	1.766195110800002
mean	float64 (11,)	[[1.13695122e-07 1.08005858e-02 1.3073170e-04
min_y	float64 1	0.507614213
pred	float32 (16,)	[[0.7447819 -1.172708 0.6395326 ... 1.42825613 1.0382257 0.73110837
std	float64 (11,)	[[6.15868700e-04 2.19408283e-03 2.9951875e-10
w	float64 (1,)	[1.36652750]
user_input	str 1	2
x_test	float64 (16, 11)	[[1.03423202 -0.82851828 -1.82409506 ... -0 ... [0.26674597 -1.54925304 -1.82409506 ... -0 ... [0.68831169]
x_train	float64 (82, 11)	[[1.03423202 -0.82851828 -1.82409506 ... -0 ... [0.26674597 -1.54925304 -1.82409506 ... -0 ... [0.68831169]
y_test	float64 (16, 1)	[[0.68831169]

Рисунок 2.21 – Обучение ИНС

На четвертом этапе работы программного обеспечения производится тестирование обученной ИНС. Результаты тестирования выводятся в виде разности значения, спрогнозированного ИНС и реального значения тестового множества.

```

Выход ИНС (спрогнозированное значение): 0.7447419 , реальное значение: [0.68831169] ,разница:
[0.05643023]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 1.174798 , реальное значение: [1.16842105] ,разница:
[0.00637694]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 0.6239326 , реальное значение: [0.58461558] ,разница:
[0.03931722]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 1.4298862 , реальное значение: [0.98245614] ,разница:
[0.44663007]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 1.016907 , реальное значение: [0.91861931] ,разница:
[0.09735674]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 1.405443 , реальное значение: [1.51364764] ,разница:
[-0.10820564]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 1.0750573 , реальное значение: [1.12721727] ,разница:
[-0.139767]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 0.63072146 , реальное значение: [0.62412587] ,разница:
[0.00664558]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 0.8889588 , реальное значение: [0.81834483] ,разница:
[0.07061398]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 0.7886183 , реальное значение: [0.875] ,разница:
[-0.0863817]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 0.64984797 , реальное значение: [0.85784314] ,разница:
[-0.20799517]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 0.53341855 , реальное значение: [0.5529823] ,разница:
[-0.0205175]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 1.1729767 , реальное значение: [1.1271134] ,разница:
[0.0458637]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 1.4265611 , реальное значение: [1.45384615] ,разница:
[-0.02728504]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 1.898257 , реальное значение: [2.2788952] ,разница:
[-0.3755251]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 0.73118937 , реальное значение: [0.78832117] ,разница:
[-0.05712181]

```

Имя	Тип	Размер	Значение
dataset	Float64	[82, 11]	[[1.3088e-05 7.4080e-01 1.0000e-02 ... 1.3709e+00 9.7300e+00 1.0000e+0 ... [0.50761421 [0.78125 ...
dataset3	Float64	[82, 11]	[[5.0000e-04 9.0000e-01 1.0000e-02 ... 3.0000e+00 8.1000e+00 1.0000e+0 ... [0.68831169 [1.16842105]
dataset2	Float64	[16, 11]	[[0.03634852295621736
err	Float64	1	0.03634852295621736
error	Float64	[16, 18]	[[0.05643023 0.00637694 -0.06437908 ... 0 ...
i	int	1	35
max_y	Float64	1	1.7883031180000002
mean	Float64	[11,]	[[1.13891226e-03 1.00000000e-02 1.1871170e- 0.48 ...
min_y	Float64	1	0.30761421
pred	Float64	[16,]	[[0.7447419 1.174798 0.6239326 ... 1.4265611 1.016907 0.73118937 ... 1.89 ...
std	Float64	[11,]	[[0.1566708e-04 2.19401833e-05 2.9991075e- 1.89 ...
u	Float64	[1,]	[[1.36552794]
user_input	str	1	?
x_test	Float64	[16, 11]	[[-1.03423202 -0.02031028 -1.02409508 ... -0 ...
x_train	Float64	[82, 11]	[[0.26474397 -1.34925304 -1.02409508 ...

Рисунок 2.22 – Тестирование ИНС

Заключительным, **пятым** этапом работы программного обеспечения является вывод результатов НС–моделирования. Средняя абсолютная ошибка на обучающем и проверочном наборе, а также их визуализация на графике зависимости от количества эпох (рисунок 2.23 а), который характеризует ошибку обучения. Второй график, представленный на рисунке 2.23 б показывает точность работы ИНС в виде отношения реальных значений тестового множества к спрогнозированным значениям ИНС.

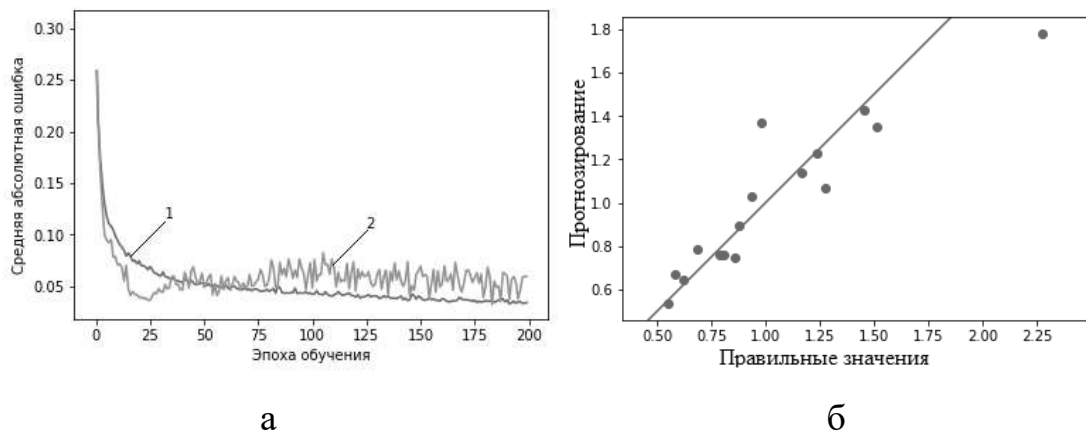


Рисунок 2.23 – Результаты тестирования нейросетевого моделирования поверхностной интенсификации теплообмена: 1, 2 – средняя абсолютная ошибка на обучающем и проверочном наборе

2.7. Выводы по 2 главе

Разработанный метод исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических

параметров трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы базируется на концепции формирования характерных логических взаимосвязей между геометрическими и режимными характеристиками поверхностных интенсификаторов, присущими определенному типу интенсификатора. Предложенный метод реализуется с помощью нейросетевого моделирования. Технология построения нейросетевой модели поверхностной интенсификации теплообмена включает в себя следующие этапы:

1) Сбор и подготовка исходных данных к анализу – экспериментальные исследования поверхностной интенсификации теплообменных устройств с трубчатыми и пластинчатыми теплообменными поверхностями, фазификация объекта исследования;

2) Разработка исходной ИНС поверхностной интенсификации теплообмена – нейросетевое моделирование интенсификации поверхностных теплообменных устройств на основе базы данных экспериментальных исследований;

3) Оптимизация структуры нейросетевой модели – установление оптимальных параметров нейросетевого моделирования поверхностной интенсификации теплообмена.

Реализация предложенной методики формирования базы данных экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена позволило сформировать базу данных, готовых для анализа, обучения, тестирования ИНС, выполнить фазификацию объекта исследования и разработать нейросетевую модель поверхностной интенсификации теплообмена. База данных для всех типов поверхностных интенсификаторов теплообмена сформирована на основе экспериментальных параметров, полученных в рамках исследований поверхностной интенсификации теплоотдачи и гидравлического сопротивления. В зависимости от типа поверхностных интенсификаторов, база данных представляет собой таблицу из 9 – 16 столбцов и более 1000 строк для каждого типа поверхностных интенсификаторов теплообмена. Общая база данных составила

более 10000 записей по 800 – 1200 записей для каждого типа поверхностных интенсификаторов.

Для нейросетевого моделирования поверхностной интенсификации теплообмена разработана методика построения структуры исходной модели поверхностной интенсификации теплообмена, методика определения ошибки и точности нейросетевого моделирования, методика поиска оптимальной точки отсечения классов решений, а также методика редукции исходной структуры ИНС.

Первые три этапа представленной методики позволяют построить исходную нейросетевую модель поверхностной интенсификации теплообмена. Исходная нейросетевая модель состоит из 10 – 14 входных нейронов (в зависимости от типа поверхностных интенсификаторов теплообмена), 10 нейронов скрытого слоя и единственного выходного нейрона, представляющий отношение тепловой и гидравлической эффективности в виде отношения $(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$.

Для реализации четвертого этапа проведен сравнительный анализ наиболее распространённых методов оптимизации ИНС при решении задач классификации и прогнозирования. По результатам оптимизации проведен сравнительный анализ, результаты которого показывают эффективность метода «стохастический градиентный спуск» для решения задачи нейросетевого моделирования поверхностной интенсификации трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств.

Разработано инструментальное программное обеспечение, которое позволяет построить нейросетевую модель поверхностной интенсификации теплообмена. Данное инструментальное программное обеспечение является эффективным инструментом для определения оптимальных характеристик (режимных и геометрических параметров) поверхностных интенсификаторов теплообмена. Может использоваться в качестве системы поддержки принятия решений при проектировании нового теплообменного оборудования и модернизации существующих теплообменных устройств.

Функционирование инструментального программного обеспечения состоит из шести основных этапов. На первом этапе производится подключение библиотек

и модулей. Второй этап состоит из команд, позволяющих загрузить параметры экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена в качестве обучающих и тестовых выборок. Третий этап заключается в нормализации загруженных данных. На четвертом этапе производится разработка архитектуры ИНС и настройка функции активации. Пятый этап состоит в обучении и тестировании разработанной структуры ИНС. Шестой этап – визуализация полученных результатов обучения и тестирования ИНС.

Разработанное инструментальное программное обеспечение имеет модульную структуру и состоит из двух отдельных инструментальных программ. Каждый этап функционирования программного обеспечения, описанный выше, представляет собой отдельный модуль. Таким образом, каждая программа состоит из шести модулей, отвечающих за подключение библиотек, загрузку параметров обучающих и тестовых выборок, нормализацию загруженных параметров, разработку архитектуры и настройку функции активации ИНС, обучение и тестирование ИНС и за визуализацию полученных результатов обучения и тестирования. Первая программа позволяет установить значение тепловой, гидравлической и теплогидравлической эффективности для определенного набора режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена. Определить оптимальный набор режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена для наилучшего значения тепловой эффективности, гидравлического сопротивления или теплогидравлической эффективности, что позволяет при имеющемся наборе режимных и геометрических параметров установить теплогидравлическую эффективность. Для работы с первой программой необходимо загрузить обучающую и тестовую выборку и выбрать тип поверхностного интенсификатора в окне стартовой загрузки.

Вторая программа позволяет определить оптимальное значение каждого режимного и геометрического параметра поверхностного интенсификатора теплообмена, что позволяет при заданных технических условиях требованиях к значению теплогидравлической эффективности, определить оптимальные

значения отдельных режимных и геометрических параметров. Для работы со второй программой необходимо загрузить обучающую и тестовую выборку и выбрать наименование режимного или геометрического параметра поверхностного интенсификатора, который необходимо определить.

Разработанное инструментальное программное обеспечение позволяет построить адекватную нейросетевую модель поверхностной интенсификации теплообмена для рассматриваемых в диссертационной работе типов поверхностных интенсификаторов, установить наиболее оптимальные характеристики режимных и геометрических параметров поверхностной интенсификации теплообмена, что в совокупности позволяет реализовать исследование однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы.

ГЛАВА 3. Программное обеспечение реализующий метод, результаты исследования и анализ согласования с экспериментальными значениями

В данной главе представлены полученные результаты исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы, анализ согласования полученных результатов с экспериментальными исследованиями, а также описание разработанного прикладного программного обеспечения, реализующего предложенный метод исследования. Результаты апробирования методов, предложенных в диссертационной работе. Представлены результаты нейросетевого моделирования эффективности теплообмена при поверхностной интенсификации, оптимизации поверхностной интенсификации теплообмена, а также режимных и геометрических характеристик для следующих типов поверхностных интенсификаторов теплообмена: кольцевые, полусферические выступы, сферические, капельные, V-образные, эллиптические, подковообразные, цилиндрические выемки и спиральные проволочные вставки. Для вышеописанных типов поверхностных интенсификаторов получены оптимальные характеристики в пределах и за пределами теплофизических и гидромеханических условий экспериментальных исследований. Выполнен анализ согласования полученных результатов с характеристиками поверхностных интенсификаторов экспериментальных исследований.

3.1. Прикладное программное обеспечение исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических характеристик теплообменных устройств

На основе предложенных во второй главе методов и алгоритмов, разработан комплекс прикладных программ, который позволяет реализовать исследование однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров трубчатых и

пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы. Каждая программа комплекса формирует собственную структуру ИНС с различными архитектурами, используя при этом различные комбинации параметров базы результатов экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена. Разработан набор следующих прикладных программ: «Нейросетевое моделирование тепловой, гидравлической и теплогидравлической эффективности при поверхностной интенсификации теплообмена», «Нейросетевое моделирование режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена» и «Оптимизация поверхностной интенсификации теплообмена в среде искусственных нейронных сетей».

3.1.1. Тепловая эффективность, гидравлическое сопротивление и теплогидравлическая эффективность

Реализация предложенного метода с помощью разработанного комплекса прикладных программ позволяет установить оптимальные значения тепловой, гидравлической и теплогидравлической эффективности для заданного набора геометрических и режимных характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена. Исследование теплообменной эффективности вне диапазона экспериментальных исследований реализуется путем анализа, установленных в процессе обучения нейронной сети, взаимосвязей между режимными и геометрическими характеристиками поверхностных интенсификаторов теплообмена на основе экспериментальных исследований интенсифицированных теплообменных устройств. Общая схема работы прикладного программного обеспечения при исследовании тепловой, гидравлической и теплогидравлической эффективности поверхностной интенсификации теплообмена представлена на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Этапы функционирования прикладного программного обеспечения, реализующего исследование тепловой, гидравлической и теплогидравлической эффективности в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена

Первый этап заключается в выборе типа поверхностного интенсификатора и исследуемого параметра (тепловая, гидравлическая или теплогидравлическая эффективность). На рисунке 3.2 представлена визуализация данного этапа.

```

Выберите тип поверхностного интенсификатора:
1--- 'Кольцевые выступы'
2--- 'Полусферические выступы'
3--- 'Сферические выемки'
4--- 'Капельные углубления'
5--- 'V-образные углубления'
6--- 'Эллиптические выемки'
7--- 'Подковообразные выемки'
8--- 'Спиральные выступы и спиральные проволочные вставки'
9--- 'Цилиндрические выемки'

Введите номер типа интенсификатора:3
Выберите параметр нейросетевого моделирования:
1--- 'Тепловая эффективность'
2--- 'Гидравлическая эффективность'
3--- 'Теплогидравлическая эффективность'

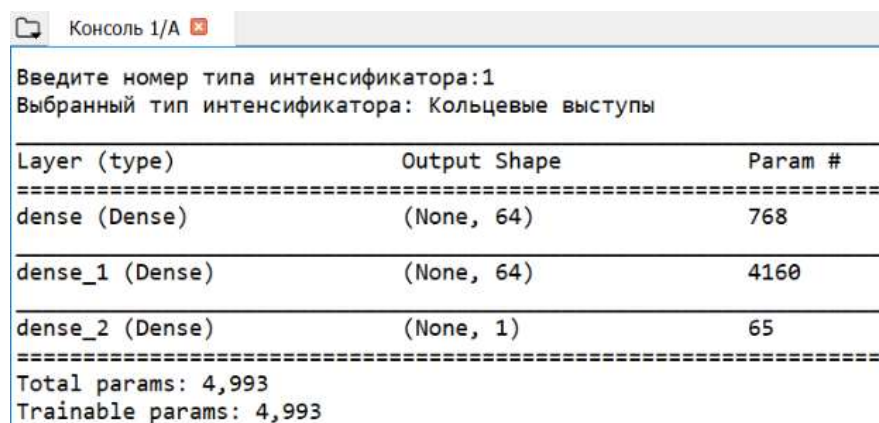
```

Рисунок 3.2 – Первый этап нейросетевого моделирования

Второй этап представляет собой загрузку базы данных, включающую в себя геометрические и режимные параметры экспериментальных исследований тепловой, гидравлической и теплогидравлической эффективности для выбранного типа поверхностного интенсификатора теплообмена. Далее производится нормализация входных и выходных параметров базы данных (метод нормализации

подробно описан в разделе 2.3.1). По результатам работы второго этапа формируется набор данных, представляющих собой входные, выходные, обучающие и тестовые выборки. Разделение на обучающую и тестовую выборку реализовано на основе метода 0,632 – бутстрэпа. Входная выборка состоит из набора режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена. Выходные выборки обучающих и тестовых данных для тепловой эффективности – это отношение числа Нуссельта интенсифицированной и гладкой теплообменной поверхности (Nu/Nu_0), для гидравлической эффективности – это отношение гидравлического сопротивления интенсифицированной и гладкой теплообменной поверхности (ξ/ξ_0) и для теплогидравлической эффективности – это эффективность по аналогии Рейнольдса $(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$ (формирование исходных данных и метод 0,632 – бутстрэпа подробно описан в разделе 2.3.3).

На **третьем этапе** формируется структура ИНС исследуемого параметра, производится ее обучение и оптимизация. Результаты формирования структуры ИНС визуализируются в консоли программного обеспечения (рисунок 3.3), где представлена информация о количестве формируемых слоев ИНС, используемых параметрах в каждом слое, а также общее количество параметров, используемых при исследовании теплообменной эффективности при поверхностной интенсификации.



```

Консоль 1/A
Введите номер типа интенсификатора:1
Выбранный тип интенсификатора: Кольцевые выступы

Layer (type)                Output Shape                Param #
=====
dense (Dense)                (None, 64)                  768
dense_1 (Dense)              (None, 64)                  4160
dense_2 (Dense)              (None, 1)                   65
=====
Total params: 4,993
Trainable params: 4,993
  
```

Рисунок 3.3 – Результаты формирования структуры ИНС

Количество эпох обучения устанавливается в соответствии с предложенным алгоритмом поиска оптимальной точки отсечения классов решений методом ROC

– анализа (данный метод подробно описан в разделе 2.4.4). Каждая эпоха обучения ИНС визуализируется и выводится на консоль программного обеспечения с информацией о текущих ошибках обучения (рисунок 3.4).

```

Epoch 1/300
- 0s - loss: 0.0291 - mean_absolute_error: 0.1383 - val_loss: 0.
0.1033
Epoch 2/300
- 0s - loss: 0.0156 - mean_absolute_error: 0.0928 - val_loss: 0.
0.0959
Epoch 3/300
- 0s - loss: 0.0132 - mean_absolute_error: 0.0826 - val_loss: 0.
0.0870
Epoch 4/300
- 0s - loss: 0.0120 - mean_absolute_error: 0.0774 - val_loss: 0.
0.0611
Epoch 5/300
- 0s - loss: 0.0114 - mean_absolute_error: 0.0746 - val_loss: 0.
0.0580
Epoch 6/300
- 0s - loss: 0.0112 - mean_absolute_error: 0.0719 - val_loss: 0.
0.0520
Epoch 7/300
- 0s - loss: 0.0112 - mean_absolute_error: 0.0716 - val_loss: 0.
0.0471
Epoch 8/300
- 0s - loss: 0.0109 - mean_absolute_error: 0.0698 - val_loss: 0.
0.0453

```

Рисунок 3.4 – Обучение ИНС исследуемого параметра

Тестирование и оценка точности работы ИНС исследуемого параметра производится в рамках **четвертого этапа** прикладного программного обеспечения. В процессе тестирования в консоли программного обеспечения выводится информация о значениях фактического экспериментального параметра и моделируемого ИНС выходного параметра тестовой выборки, средний модуль отклонения, а также средняя абсолютная ошибка на обучающем и тестовом наборах данных (рисунок 3.6). Также результаты тестирования представлены на графиках (рисунок 3.5), представляющие собой ошибки обучения (а) и разброс спрогнозированных значений относительно верных (б).

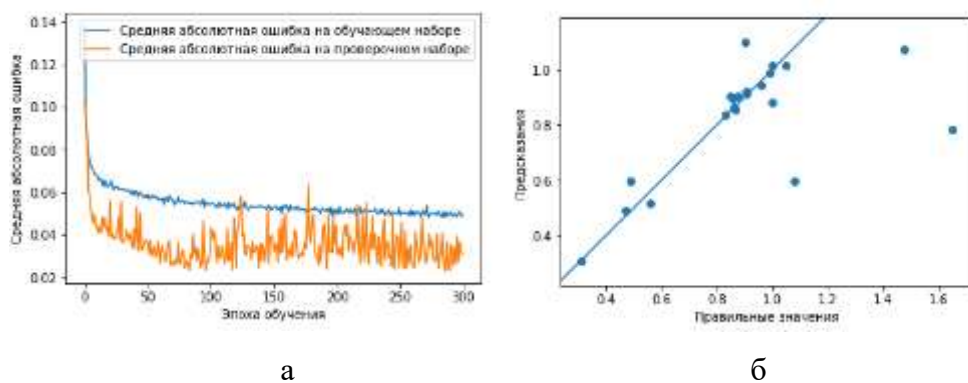
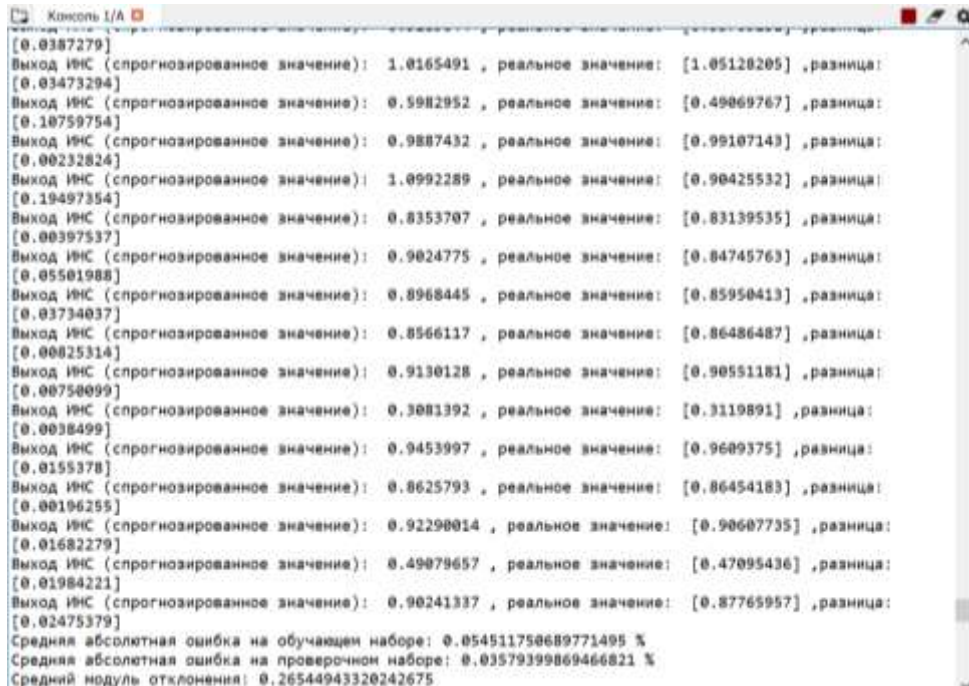


Рисунок 3.5 – Графики ошибок обучения (а) и разброс спрогнозированных значений относительно верных (б)



```

[0.0387279]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 1.0165491 , реальное значение: [1.05128205] , разница:
[0.03473294]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 0.5982952 , реальное значение: [0.49869767] , разница:
[0.10759754]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 0.9887432 , реальное значение: [0.99107143] , разница:
[0.00232824]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 1.0992289 , реальное значение: [0.90425532] , разница:
[0.19497354]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 0.8353707 , реальное значение: [0.83139535] , разница:
[0.00397537]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 0.9024775 , реальное значение: [0.84745763] , разница:
[0.05501988]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 0.8968445 , реальное значение: [0.85950413] , разница:
[0.03734037]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 0.8566117 , реальное значение: [0.86486487] , разница:
[0.00823114]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 0.9130128 , реальное значение: [0.90551181] , разница:
[0.00750099]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 0.3081392 , реальное значение: [0.3119891] , разница:
[0.0038499]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 0.9453997 , реальное значение: [0.9609375] , разница:
[0.0155378]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 0.8625793 , реальное значение: [0.86454183] , разница:
[0.00196255]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 0.92298014 , реальное значение: [0.90607735] , разница:
[0.01682279]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 0.49079657 , реальное значение: [0.47095436] , разница:
[0.01984221]
Выход ИНС (спрогнозированное значение): 0.90241337 , реальное значение: [0.87765957] , разница:
[0.02475379]
Средняя абсолютная ошибка на обучающем наборе: 0.054511750689771495 %
Средняя абсолютная ошибка на проверочном наборе: 0.03579399869466821 %
Средний модуль отклонения: 0.26544943320242675

```

Рисунок 3.6 – Тестирование ИНС и оценка точности

В ходе реализации **пятого этапа** формируется база данных, представляющая собой режимные и геометрические характеристики поверхностных интенсификаторов тестовой выборки, для которых ИНС установила наилучшие взаимосвязи между параметрами при нейросетевом моделировании тепловой, гидравлической или теплогидравлической эффективности. Данная операция позволяет зафиксировать наилучшие оптимальные взаимосвязи между всеми параметрами тестовой выборки характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена.

Разработанное прикладное программное обеспечение работает с входными и выходными данными преобразуя их в матричную форму. Матрица формируется таким образом, что одна строка матрицы представляет собой набор параметров режимных и геометрических характеристик интенсификаторов, полученных в рамках определенного экспериментального исследования. Следовательно, количество строк в матрице входных и выходных данных – это количество экспериментальных исследований. Таким образом, смысл определения набора данных с наилучшими взаимосвязями между геометрическими и режимными

параметрами заключается в определении наилучших результатов исследования тепловой, гидравлической и теплогидравлической эффективности поверхностной интенсификации теплообмена. На рисунке 3.7 представлен этап определения наилучших взаимосвязей между режимными и геометрическими параметрами тестовой выборки.

```

Минимальное значение разницы между реальным и спрогнозированным значением: [0.00196255]
--
Наилучшие взаимосвязи между параметрами поверхностных интенсификаторов установлены следующей строки
тестовой выборки: [5.700e-04 1.000e-02 1.000e+00 4.970e-03 9.430e-03 5.000e+00 9.430e-01
4.970e-01 8.719e+00 4.116e+01 3.160e+04]
--
Наилучшие взаимосвязи между значениями режимных и геометрических характеристик поверхностных
интенсификаторов в виде КОЛЬЦЕВЫХ ВЫСТУПОВ установлены для эксперимента со следующими значениями
параметров:
--
Высота кольцевых выступов, м: h= 0.00057
Внутренний диаметр трубы, м: D= 0.01
Длина трубы, м: L= 1.0
Расстояние между кольцевыми выступами, м: t= 0.0049700000000000005
Диаметр отверстия диафрагм, м: d= 0.00943
Тип теплоносителя: водоглицериновая_смесь
d/D= 0.943
t/D= 0.49700000000000005
t/h= 8.719
Число Прандтля: Pr= 41.16
Число Рейнольдса: Re= 31600.0
теплогидравлическая эффективность, (Nu/Nu0)(E/E0): [0.86454183]

```

Рисунок 3.7 – Наилучшие взаимосвязи между режимными и геометрическими параметрами тестовой выборки

Данный этап является заключительным в процессе формирования и подготовки ИНС (сбор и формирование исходных данных, обучение, оптимизация и тестирование ИНС). Далее разработанное программное обеспечение информирует пользователя о том, что ИНС готова нейросетевому моделированию и запрашивает геометрические и режимные параметры, для которых необходимо определить тепловую, гидравлическую или теплогидравлическую эффективность.

В рамках **шестого этапа** исследования эффективности теплообмена при поверхностной интенсификации в консоли формируется запрос ввода геометрических и режимных параметров (рисунок 3.8), характерных для выбранного типа поверхностного интенсификатора.

```

Консоль 1/A
ИНС готова к нейросетевому моделированию поверхностных интенсификаторов теплообмена в виде кольцевых выступов
Введите режимные и геометрические параметры кольцевых выступов :
-
Высота кольцевых выступов, м: h=0.00125
h= 0.00125

Внутренний диаметр трубы, м: D=0.01
D= 0.01

Длина трубы, м: L=1
L= 1.0

Расстояние между кольцевыми выступами, м: t=0.00496
t= 0.00496

Диаметр отверстия диафрагм, м: d=0.00875
d= 0.00875

Вид теплоносителя (1-вода; 3-газ; 5-водоглицериновая смесь): 5
Вид теплоносителя: водоглицериновая_смесь
d/D= 0.8750000000000001
t/D= 0.496
t/h= 3.968

Число Прандтля: Pr=32.34
Pr= 32.34

Число Рейнольдса: Re=15800
Re= 15800.0

```

Рисунок 3.8 – Ввод режимных и геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена

Седьмой этап представляет собой нейросетевое моделирование тепловой, гидравлической или теплогидравлической эффективности, на основе разработанной и обученной ИНС (этап 3), параметров наилучших взаимосвязей тестовой выборки (этап 5) и введенных пользователем значений режимных и геометрических характеристик (этап 6) поверхностных интенсификаторов теплообмена.

Восьмой этап заключается в выводе результата исследования - тепловой, гидравлической или теплогидравлической эффективности поверхностной интенсификации теплообмена.

Таким образом, данный комплекс прикладных программ позволяет получить результаты нейросетевого моделирования тепловой, гидравлической и теплогидравлической эффективности при поверхностной интенсификации теплообмена на основе заданных параметров режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов. Программа может использоваться при проектировании и модернизации теплообменных устройств, с целью повышения энергетической эффективности. Функциональные возможности

программы позволяют получить оптимальные значения тепловой, гидравлической или теплогидравлической эффективности для следующих типов поверхностных интенсификаторов теплообмена: кольцевые и полусферические выступы, сферические, капельные, V-образные, эллиптические, подковообразные, цилиндрические выемки и спиральные проволочные вставки.

3.1.2. Режимные и геометрические характеристики поверхностных интенсификаторов трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств

Для определения значений геометрических и режимных параметров при исследовании поверхностной интенсификации теплообмена в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров поверхностных интенсификаторов разработано прикладное программное обеспечение. Выявленные в процессе обучения ИНС характерные логические взаимосвязи между режимными и геометрическими параметрами поверхностных интенсификаторов теплообмена позволяют спрогнозировать значения режимных и геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена. Общая схема реализации данного этапа представлено на рисунке 3.9.



Рисунок 3.9 – Этапы функционирования прикладного программного обеспечения нейросетевого моделирования режимных и геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена

Этапы нейросетевого моделирования геометрических и режимных параметров поверхностной интенсификации теплообмена аналогичны этапам предыдущего прикладного программного обеспечения исследования теплообменной эффективности. За исключением первого этапа, где кроме выбора типа поверхностного интенсификатора предлагается выбрать геометрический или режимный параметр, значение которого необходимо определить. На рисунке 3.10 представлена визуализация первого этапа на консоли программного обеспечения.

```

Консоль 1/A
для заданного типа поверхностного интенсификатора и его режимных и геометрических параметров.

1 МОДУЛЬ

Выберите тип поверхностного интенсификатора:
1---'Кольцевые выступы'
2---'Полусферические выступы'
3---'Сферические выемки'
4---'Капельные углубления'
5---'V-образные углубления'
6---'Эллиптические выемки'
7---'Подковообразные выемки'
8---'Спиральные выступы и спиральные проволочные вставки'
9---'Цилиндрические выемки'

Введите номер типа интенсификатора:1
Выбранный тип интенсификатора: Кольцевые выступы
Выберите параметр поверхностных интенсификаторов теплообмена в виде кольцевых выступов , который необходимо определить
1---Высота кольцевых выступов, h
2---Внутренний диаметр трубы, D
3---Длина трубы, L
4---Расстояние между кольцевыми выступами, t
5---Диаметр отверстия диафрагм, d
6---Тип теплоносителя
7---Соотношение - d/D
8---Соотношение - t/D
9---Соотношение - t/h
10---Число Прандтля: Pr
11---Число Рейнольдса: Re

Введите номер параметра:|

```

Рисунок 3.10 – Первый этап: выбор типа и параметра поверхностного интенсификатора теплообмена

3.1.3. Оптимизация поверхностной интенсификации теплообмена

Задача установления оптимальных характеристик свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена является основной в данной диссертационной работе. Решение данной задачи становится возможным благодаря совместной реализации нейросетевой модели теплогидравлической эффективности, а также нейросетевого моделирования режимных и геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена. Общая схема функционирования данного прикладного программного обеспечения исследования оптимального диапазона

свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена представлена на рисунке 3.11.



Рисунок 3.11 – Этапы функционирования прикладного программного обеспечения нейросетевого моделирования оптимальных режимных и геометрических характеристик при поверхностной интенсификации теплообмена

С **первого по пятые этапы** функционирования прикладного программного обеспечения исследования оптимальных режимных и геометрических характеристик при поверхностной интенсификации теплообмена аналогичны этапам исследования гидравлической, тепловой и теплогидравлической эффективности и нейросетевого моделирования режимных и геометрических параметров, описанных выше в разделе 3.1.

Шестой этап исследования оптимального диапазона свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена заключается в нейросетевом моделировании теплогидравлической эффективности для набора режимных и геометрических параметров, соответствующих наилучшим взаимосвязям между всеми характеристиками поверхностных интенсификаторов теплообмена. Таким образом, результатом работы прикладного программного обеспечения является значение теплогидравлической эффективности для набора входных данных, представляющих собой режимные и геометрические параметры поверхностных интенсификаторов теплообмена с наилучшими взаимосвязями, установленными на пятом этапе нейросетевого моделирования. Данный этап предназначен для

определения таких наилучших взаимосвязей между режимными и геометрическими параметрами интенсификаторов теплообмена, которые позволят получить наиболее оптимальное значение теплогидравлической эффективности, а также для минимизации разницы между значениями фактической теплогидравлической эффективности, соответствующей набору входных данных с наилучшими взаимосвязями между параметрами тестовой выборки и теплогидравлической эффективности, полученной в процессе нейросетевого моделирования. Установление наилучших взаимосвязей между режимными и геометрическими параметрами продолжается до тех пор, пока разница между фактическим и моделируемым параметром теплогидравлической эффективности не будет менее 3%.

Седьмой этап направлен на формирование комплекса параметров, характеризующих наиболее оптимальные режимные и геометрические характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена. Для реализации седьмого этапа разработан коллектив нейронных сетей, где количество нейронных сетей зависит от количества характеристик, описывающих тип поверхностного интенсификатора. Задача каждой ИНС, входящих в состав коллектива, заключается в нейросетевом моделировании наиболее оптимального значения параметра. Таким образом, на выходе седьмого этапа формируется набор оптимальных параметров исследуемого типа поверхностного интенсификатора теплообмена.

В рамках **восьмого этапа** производится заключительное нейросетевое моделирование теплогидравлической эффективности. На вход ИНС подаются полученные в рамках седьмого этапа оптимальные параметры характеристик поверхностных интенсификаторов.

Девятый этап предназначен для вывода результатов исследования оптимальных характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена. На рисунке 3.12 представлена визуализация 7 – 9 этапов НС–моделирования.

```

оптимальные значения геометрических и режимных параметров [[1.01413185e-04 9.70629510e-03
1.00001907e-02 9.75970458e-03
6.01745863e-03 9.79958534e-01 9.99962568e-01 5.99988759e-01
1.00104392e+00 7.91432762e+00 9.59855408e+02]]
теплогидравлическая эффективность, (Nu/Nu0)(E/E0): 1.2929537

оптимальные значения геометрических и режимных параметров для поверхностных интенсификаторов в виде
ПОЛУСФЕРИЧЕСКИХ ВЫСТУПОВ установлены для эксперимента со следующими значениями параметров:
_
Высота полусферических выступов, м: h= 0.00010141318489331752
Диаметр полусферических выступов, м: d= 0.009706295095384121
Гидравлический диаметр канала, м: D= 0.010000190697610378
Продольный шаг выступов, м: t= 0.00975970458239317
Поперечный шаг выступов, м: s= 0.006017458625137806
d/D= 0.9799585342407227
t/D= 0.999962568283081
s/D= 0.5999887585639954
Увеличение площади поверхности: f= 1.0010439157485962
Число Прандтля: Pr= 7.914327621459961
Число Рейнольдса: Re= 959.8554077148438
теплогидравлическая эффективность, (Nu/Nu0)(E/E0): 1.2929537

```

Рисунок 3.12 – Оптимальные параметры режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов

3.2. Тестирование и верификация результатов исследований в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена

3.2.1. Тепловая эффективность

Сравнение полученных результатов исследования тепловой эффективности поверхностной интенсификации теплообмена произведено с результатами экспериментальных исследований тепловой эффективности [1 – 117, 128 – 152]. Тестирование сформированной ИНС показывает высокую точность обучения нейронной сети, что позволяет сделать вывод о возможности исследования тепловой эффективности поверхностной интенсификации. Результаты тестирования представлены на рисунке 3.13, где, a – ошибка обучения ИНС; b – разброс спрогнозированных значений относительно верных, позиции 1, 2 – средняя абсолютная ошибка на обучающем и тестовом наборе характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена.

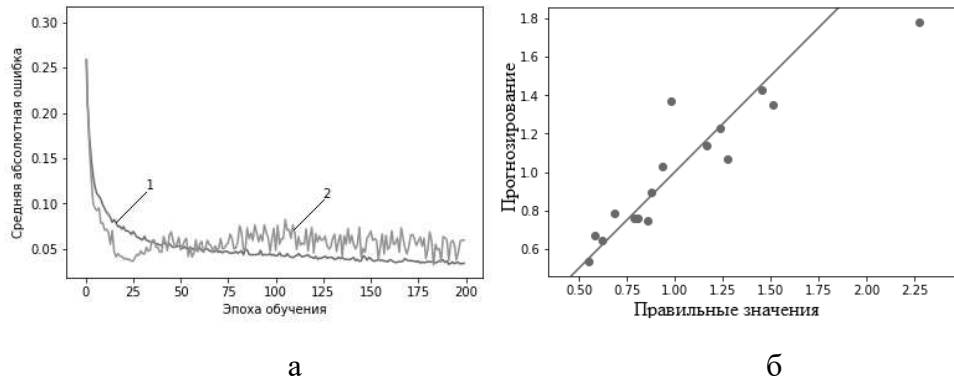


Рисунок 3.13 – Результаты тестирования нейросетевой модели тепловой эффективности

Для верификации полученных результатов исследования тепловой эффективности введем в форму ввода параметров прикладного программного обеспечения режимные и геометрические характеристики сферических выемок, полученных в рамках экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена в работе [64]. В экспериментальных исследованиях поверхностной интенсификации теплообмена сферических выемок авторами работы [64] получено значение тепловой эффективности $Nu/Nu_0 = 1,02$. Результаты исследования авторов [64] не использованы при обучении ИНС. Форма запроса ввода параметров, а также режимные и геометрические характеристики интенсификаторов полученных в рамках исследования [64] представлены на рисунке 3.14.

Результат исследования тепловой эффективности при поверхностной интенсификации теплообмена сферическими выемками - 1,023, что положительно согласовывается с результатами исследования [64], где экспериментальное значение тепловой эффективности, составляет 1,021. На рисунке 3.14 представлены полученные результаты исследования тепловой эффективности с помощью разработанного прикладного программного обеспечения.

С целью анализа согласования результатов исследования с экспериментальными значениями, аналогичные операции выполнены для всех рассматриваемых типов поверхностных интенсификаторов. Результаты сравнения значений нейросетевого моделирования и значений тепловой эффективности,

полученных по результатам экспериментальных исследований тепловой эффективности [1, 52, 64, 67, 87, 100, 117, 152] представлены в таблице 3.1.

```

Введите режимные и геометрические параметры сферических выемок :
-
Глубина сферических выемок, м: h=0.00071
h= 0.00071

Диаметр сферической выемки, м: d=0.00514
d= 0.00514

Высота теплообменной поверхности, м: H=0.005
H= 0.005

Гидравлический диаметр канала, м: D=0.00514
D= 0.00514
h/D= 0.13813229571984437
H/D= 0.972762645914397
h/H= 0.142

Число Прандтля: Pr=0.7
Pr= 0.7

Число Рейнольдса: Re=11500
Re= 11500.0
тепловая эффективность, Nu/Nu0: 1.023683

```

Рисунок 3.14 – Ввод режимных и геометрических параметров исследования [64] и результат нейросетевого моделирования тепловой эффективности

Таблица 3.1

Согласование полученных результатов исследования тепловой эффективности и значений экспериментальных исследований

Тип поверхностного интенсификатора	Nu/Nu ₀ Нейросетевое моделирование	Nu/Nu ₀ Экспериментальное значение	источник
Кольцевые выступы	1,0902	1,11	[67]
Полусферические выступы	1,0489	1,06	[1]
Сферические выемки	1,0236	1,02	[64]
Капельные углубления	1,9351	1,911	[117]
V-образные выемки	1,339	1,483	[152]
Эллиптические выемки	1,3513	1,432	[52]
Подковообразные выемки	1,5897	1,63	[52]
Спиральные проволочные вставки	0,4019	0,425	[100]
Цилиндрические выемки	0,9976	1,04	[87]

Сравнение фактических значений экспериментальных исследований с полученными результатами исследования тепловой эффективности при поверхностной интенсификации теплообмена свидетельствуют о том, что ИНС с достаточно высокой точностью прогнозирует значение тепловой эффективности для заданного набора параметров геометрических и режимных характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена.

3.2.2. Гидравлическое сопротивление

Полученные результаты исследования анализируются с экспериментальными исследованиями гидравлической эффективности [1 – 117, 128 – 152]. Результаты тестирования представлены на рисунке 3.15, где, а – ошибка обучения ИНС; б – разброс спрогнозированных значений относительно верных; позиции 1, 2 – средняя абсолютная ошибка на обучающем и тестовом наборе характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена.

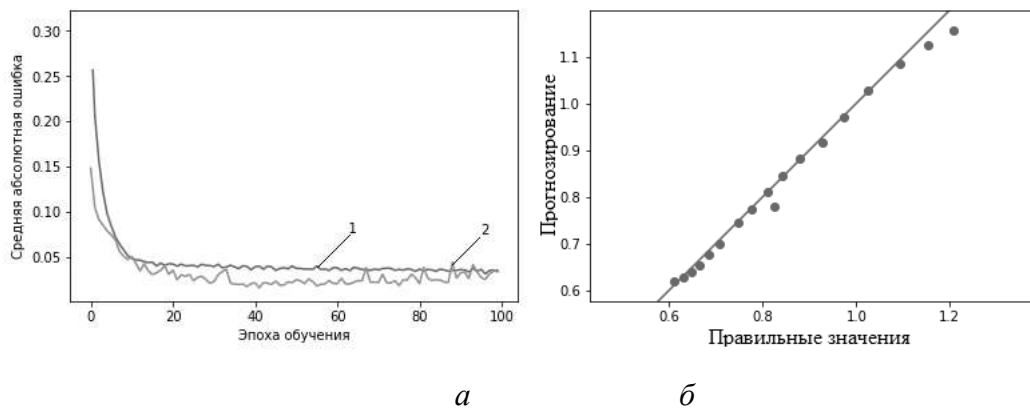


Рисунок 3.15 – Результаты тестирования нейросетевой модели гидравлической эффективности

В целях верификации и анализа согласования полученных результатов гидравлической эффективности поверхностной интенсификации теплообмена введем в формируемую в консоли прикладного программного обеспечения форму ввода режимные и геометрические характеристики цилиндрических выемок, представляющие собой результаты опытных исследований поверхностной интенсификации теплообмена. В экспериментальных исследованиях гидравлической эффективности при поверхностной интенсификации теплообмена цилиндрическими выемками авторами работы [87] получено значение гидравлической эффективности $\xi/\xi_0 = 1,17$. Необходимо отметить, что результаты исследования авторов [87] не использованы в обучающих и тестовых выборках. Форма запроса ввода и значения вводимых режимных и геометрических характеристик исследования авторов [87] представлены на рисунке 3.16.

```

Консоль 1/A
тип готова к нейросетевому моделированию поверхностных интенсификаторов теплообмена в виде
цилиндрических выемок
Введите режимные и геометрические параметры цилиндрических выемок :
-
Длина пластины, м: L=0.19
L= 0.19

Ширина теплообменной пластины, м: B=0.096
B= 0.096

'Высота теплообменной пластины, м: H=0.01
H= 0.01

Глубина выемки, м: h=0.0032
h= 0.0032

Диаметр выемки, м: d=0.016
d= 0.016

Продольный шаг выемок: t=0.042
t= 0.042

Поперечный шаг выемок:s=0.024
s= 0.024
h/d= 0.2

Число Прандтля: Pr=0.7
Pr= 0.7

Число Рейнольдса: Re=750
Re= 750.0
гидравлическая эффективность, E/E0: 0.9367406

```

Рисунок 3.16 – Ввод режимных и геометрических параметров авторов исследования [87] и результат НС-моделирования гидравлической эффективности

НС-моделирование значения гидравлической эффективности, соответствующее режимным и геометрическим параметрам исследования [87] при поверхностной интенсификации теплообмена цилиндрическими выемками, составило 1,147, что положительно согласовывается с результатами исследования [87], где экспериментальное значение гидравлической эффективности, составляет 1,171. На рисунке 3.16 представлено значение нейросетевого моделирования гидравлической эффективности.

В таблице 3.2 представлено сравнение фактических экспериментальных и результаты нейросетевого моделирования гидравлической эффективности для всех типов поверхностных интенсификаторов теплообмена, рассматриваемых в данной диссертационной работе. Экспериментальные значения сформированы по результатам исследований [1, 52, 64, 67, 87, 100, 117, 152].

Сравнение экспериментальных и прогнозных значений НС–моделирования гидравлической эффективности

Тип поверхностного интенсификатора	ξ/ξ_0 Нейросетевое моделирование	ξ/ξ_0 Экспериментальное значение	источник
Кольцевые выступы	1,2864	1,28	[67]
Полусферические выступы	1,9904	2,04	[1]
Сферические выемки	1,9164	1,92	[64]
Капельные углубления	1,943	1,945	[117]
V–образные выемки	1,108	1,123	[152]
Эллиптические выемки	1,5975	1,61	[52]
Подковообразные выемки	1,614	1,63	[52]
Спиральные проволочные вставки	4,9112	4,859	[100]
Цилиндрические выемки	1,147	1,17	[87]

Анализ согласования экспериментальных результатов исследований гидравлического сопротивления и полученных результатов исследования гидравлической эффективности в среде ИНС при поверхностной интенсификации теплообмена показал, что разница между фактическими и прогнозными значениями для гидравлической эффективности меньше, чем для тепловой. Так как, в основе предложенного метода исследования используются характерные взаимосвязи между входными параметрами (режимные и геометрические характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена), это объясняется тем, что зависимость тепловой эффективности от режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена выражается в меньшей степени, чем от гидравлической эффективности. Для описания тепловой эффективности требуется большее число экспериментальных параметров, чем для гидравлического сопротивления. Сложный характер зависимости коэффициента теплоотдачи от геометрических и режимных характеристик также подтверждается выводами исследования автора [1]. Кроме того, следует учитывать то, что разброс в выборке данных, связанных с погрешностью базовых экспериментальных данных для тепловой эффективности больше, чем для гидравлической.

Увеличение погрешности НС-моделирования тепловой эффективности, обусловлено погрешностью в выборке результатов экспериментальных

исследований. Значение погрешности НС-моделирования тепловой эффективности и гидравлического сопротивления не превышает 3%, что позволяет применять разработанную ИНС при прогнозировании тепловой и гидравлической эффективности по заданным параметрам режимных и геометрических характеристик.

3.2.3. Теплогидравлическая эффективность

Анализ согласования полученных результатов исследования теплогидравлической эффективности при поверхностной интенсификации теплообмена произведен с результатами экспериментальных исследований теплогидравлической эффективности [1 – 117,128 – 152]. Результаты тестирования НС-моделирования теплогидравлической эффективности поверхностной интенсификации теплообмена представлены на рисунке 3.17, где, а – ошибка обучения ИНС, б – разброс спрогнозированных значений относительно верных, позиции 1, 2 – средняя абсолютная ошибка на обучающем и тестовом наборе характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена.

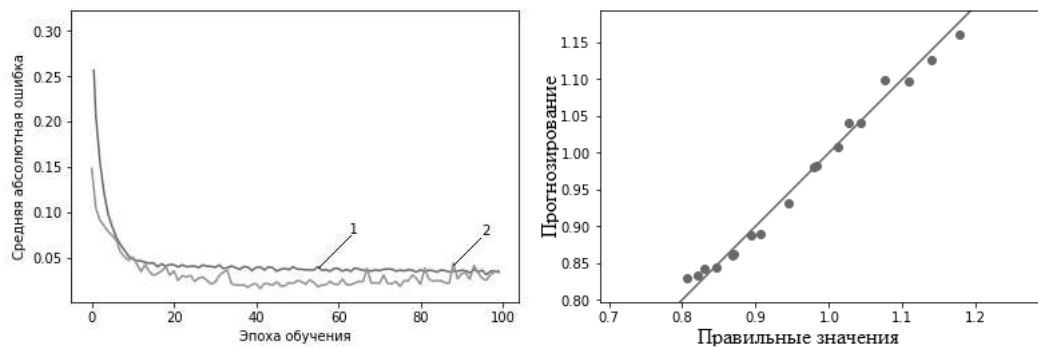


Рисунок 3.17 – Результаты тестирования нейросетевой модели теплогидравлической эффективности

С целью верификации результатов исследования введем в форму ввода прикладного программного обеспечения режимные и геометрические параметры кольцевых выступов, полученных в рамках экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена в работе [67]. В экспериментальных исследованиях теплогидравлической эффективности при поверхностной

интенсификации теплообмена кольцевыми выступами авторами работы [67] получено значение теплогидравлической эффективности равно $(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0) = 0,311$. Форма запроса ввода режимных и геометрических параметров, результат исследования теплогидравлической эффективности, а также экспериментальные значения режимных и геометрических характеристик исследования авторов [67] представлены на рисунке 3.18.

```

Консоль 1/A
ИНС готова к нейросетевому моделированию поверхностных интенсификаторов теплообмена в виде кольцевых выступов
Введите режимные и геометрические параметры кольцевых выступов :
-
Высота кольцевых выступов, м: h=0.00125
h= 0.00125
Внутренний диаметр трубы, м: D=0.01
D= 0.01
Длина трубы, м: L=1
L= 1.0
Расстояние между кольцевыми выступами, м: t=0.00496
t= 0.00496
Диаметр отверстия диафрагм, м: d=0.00875
d= 0.00875
Вид теплоносителя (1-вода; 3-газ; 5-водоглицериновая смесь): 5
Вид теплоносителя: водоглицериновая_смесь
d/D= 0.8750000000000001
t/D= 0.496
t/h= 3.968
Число Прандтля: Pr=32.34
Pr= 32.34
Число Рейнольдса: Re=15800
Re= 15800.0
теплогидравлическая эффективность, (Nu/Nu0)(E/E0): 0.3081392
  
```

Рисунок 3.18 – Ввод режимных и геометрических параметров авторов исследования [67]. Результат НС–моделирования – спрогнозированное ИНС значение теплогидравлической эффективности

НС-моделирование теплогидравлической эффективности для режимных и геометрических параметров исследования [67] при поверхностной интенсификации теплообмена кольцевыми выступами составило 0,308, что положительно согласовывается с результатами исследования [67], где значение теплогидравлической эффективности, полученное экспериментальным путем составляет 0,311. Аналогичные операции произведены для остальных типов поверхностных интенсификаторов теплообмена, рассматриваемых в данной диссертационной работе. Сравнения полученных результатов исследования теплогидравлической эффективности и экспериментальных значений

теплогидравлической эффективности представлены в таблице 3.3. Экспериментальные значения сформированы по результатам исследований [1, 52, 64, 67, 87, 100, 117, 152].

Таблица 3.3

Сравнение полученных результатов исследования теплогидравлической эффективности с результатами экспериментальных исследований

Тип поверхностного интенсификатора	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$ Нейросетевое моделирование	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$ Экспериментальное значение	источник
Кольцевые выступы	0,3081	0,31	[67]
Полусферические выступы	0,6219	0,624	[1]
Сферические выемки	1,9413	1,95	[64]
Капельные углубления	0,8699	0,87	[117]
V-образные выемки	1,1419	1,133	[152]
Эллиптические выемки	0,8594	0,878	[52]
Подковообразные выемки	1,2602	1,25	[52]
Спиральные проволочные вставки	0,3293	0,323	[100]
Цилиндрические выемки	1,5253	1,155	[87]

По результатам анализа сравнения фактических значений экспериментальных исследований теплогидравлической эффективности с полученными результатами НС-моделирования теплогидравлической эффективности при поверхностной интенсификации теплообмена выявлено минимальное значение погрешности моделирования по сравнению с погрешностью моделирования тепловой и гидравлической эффективности, что свидетельствует о выявлении в выборке оптимальных характерных взаимосвязей между геометрическими и режимными параметрами поверхностных интенсификаторов теплообмена, которые позволяют спрогнозировать значения теплогидравлической эффективности при поверхностной интенсификации теплообмена с наименьшей погрешностью относительно экспериментальных значений. Установление оптимальных взаимосвязей между параметрами режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена позволяет сделать вывод о значительной зависимости теплогидравлической эффективности от геометрических и режимных характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена.

3.2.4. Режимные и геометрические характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена

С целью верификации полученных результатов НС-моделирования режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена используем экспериментальные значения характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена по результатам исследований [67]. На первом этапе НС-моделирования режимных и геометрических характеристик выбран тип поверхностного интенсификатора – кольцевые выступы, в качестве моделируемого параметра – высота кольцевых выступов. На рисунке 3.19 представлены результаты НС-моделирования и значения введенных параметров экспериментальных исследований.

```

ИНС готова к нейросетевому моделированию поверхностных интенсификаторов теплообмена в виде кольцевых выступов
Введите режимные и геометрические параметры кольцевых выступов :

Внутренний диаметр трубы, м: D=0.01
D= 0.01

Длина трубы, м: L=1
L= 1.0

Расстояние между кольцевыми выступами, м: t=0.00496
t= 0.00496

Диаметр отверстия диафрагм, м: d=0.00875
d= 0.00875

Вид теплоносителя (1-вода; 3-газ; 5-водоглицериновая смесь): 5
Вид теплоносителя: водоглицериновая_смесь
d/D= 0.8750000000000001
t/D= 0.496
t/h= 4.96

Число Прандтля: Pr=32.34
Pr= 32.34

Число Рейнольдса: Re=15800
Re= 15800.0
Оптимальное значение высоты кольцевых выступов, h= 0.0011891654

```

Рисунок 3.19 – Первый этап нейросетевого моделирования: выбор типа и параметра поверхностного интенсификатора теплообмена

Аналогичные операции произведены для всех параметров режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена, рассматриваемых в данной диссертационной работе. Результаты анализа согласования значений нейросетевого моделирования режимных и геометрических

характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена с экспериментальными значениями характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Сравнение значений нейросетевого моделирования характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена с экспериментальными

	Параметр поверхностного интенсификатора	Нейросетевое моделирование	Экспериментальное значение	Источник, теплообменная поверхность
Кольцевые выступы	Высота кольцевых выступов, м (h)	0,00131	0,00125	[67] трубчатые
	Диаметр теплообменной трубы, м (D)	0,017	0,01	
	Длина теплообменной трубы, м, (L)	0,975	1	
	Расстояние м/у кольцевыми выступами, м (t)	0,00463	0,00496	
	Диаметр диафрагм, м (d)	0,00894	0,00875	
	Тип теплоносителя	4,865	5	
	Относительная высота d/D	0,844	0,875	
	Относительный шаг t/D	0,499	0,496	
	Относительный параметр t/h	3,787	3,968	
	Число Прандтля (Pr)	31,46	32,34	
	Число Рейнольдса (Re_D)	13998	15800	
Полусферические выступы	Высота выступов, м (h)	0,00047	0,0005	[1, 132] трубчатые, пластинчатые
	Диаметр выступов, м (d)	0,0088	0,009	
	Гидравлический диаметр, м (D)	0,0096	0,01	
	Продольный шаг выступов, м (t)	0,0064	0,006	
	Поперечный шаг выступов, м (s)	0,0036	0,004	
	Относительная высота d/D	0,91	0,9	
	Относит. продольный шаг t/D	0,57	0,6	
	Относит. поперечный шаг s/D	0,5	0,4	
	Относит. плотность расположения выступов, f	1,021	1,038	
	Число Прандтля (Pr)	8,12	8,3	
Число Рейнольдса (Re_D)	945	800		
Сферические выемки	Глубина сферических выемок, м (h)	0,003	0,003	[64] трубчатые, пластинчатые
	Диаметр выемки, м (d)	0,00968	0,00916	
	Высота теплообменной поверхности, м (H)	0,006	0,008	
	Относительный параметр, h/D	0,319	0,327	
	Относительный параметр, H/D	0,793	0,873	
	Относительный параметр, h/H	0,356	0,375	
	Число Прандтля (Pr)	0,67	0,7	
	Число Рейнольдса (Re_D)	232	240	

Капельные углубления	Высота теплообменной пластины, м (H)	0,037	0,02	[117] трубчатые
	Ширина теплообменной пластины, м (B)	1,09	1	
	Длина теплообменной пластины, м (L)	3,34	3,38	
	Глубина капельных углублений, м (h)	0,00314	0,003	
	Диаметр капельных углублений, м (d)	0,016	0,015	
	Поперечный шаг капельных углублений, м (s)	0,01851	0,01875	
	Продольный шаг капельных углублений, м (t)	0,0333	0,0324	
	Относительный параметр, h/d	0,16	0,2	
	Относительный продольный шаг, t/D	2,13	2,16	
	Относительный поперечный шаг, s/D	1,24	1,25	
	Число Прандтля (Pr)	0,689	0,7	
	Число Рейнольдса (Re_D)	8349	8500	
V-образные выемки	Высота пластины, м (H)	0,094	0,1	[152] пластинчатые
	Ширина пластины, м (B)	0,11	0,15	
	Длина пластины, м (L)	0,13	0,15	
	Глубина выемки, м (h)	0,0024	0,0026	
	Диаметр выемки, м (d)	0,012	0,013	
	Поперечный шаг выемок, м (s)	0,01610	0,01625	
	Продольный шаг выемок, м (t)	0,01533	0,01625	
	Относительный параметр, h/d	0,179	0,2	
	Относительный продольный шаг t/D	1,19	1,25	
	Относительный поперечный шаг s/D	1,29	1,25	
	Число Прандтля (Pr)	0,712	0,7	
	Число Рейнольдса (Re_D)	25701	27500	
Эллиптические выемки	Высота пластины, м (H)	0,02	0,02	[52] трубчатые, пластинчатые
	Ширина пластины, м (B)	0,94	1	
	Длина пластины, м (L)	3,15	3,38	
	Глубина выемки, м (h)	0,002	0,003	
	Диаметр выемки, м (d)	0,013	0,015	
	Поперечный шаг выемок, м (s)	0,01703	0,01875	
	Продольный шаг выемок, м (t)	0,0313	0,0324	
	Угол к встречному потоку, ° (ϕ)	0	0	
	Относительный параметр, h/d	0,186	0,2	
	Относительный продольный шаг t/D	2,16	2,16	
	Относительный поперечный шаг s/D	1,23	1,25	
	Число Прандтля (Pr)	0,677	0,7	
Число Рейнольдса (Re_D)	13476	13900		

Подковообразные выемки	Диаметр трубы, м (D)	0,14	0,15	[52] трубчатые
	Длина трубы, м (L)	1,253	1,275	
	Угол к встречному потоку, ° (ϕ)	54	52	
	Глубина выемки, м (h)	0,00117	0,00119	
	Диаметр выемки, м (d)	0,0081	0,0085	
	Поперечный шаг выемок, м (s)	0,0489	0,05	
	Продольный шаг выемок, м (t)	0,051	0,05	
	Относительный параметр, h/d	0,138	0,14	
	Относительный продольный шаг t/D	5,74	5,88	
	Относительный поперечный шаг s/D	5,86	5,88	
	Число Прандтля (Pr)	0,712	0,7	
	Скорость потока, м\с, (ω)	12	14	
Спиральные провололочные	Относительный параметр, h/D	0,103	0,107	[100] трубчатые
	Относительный параметр, t/h	0,0778	0,075	
	Относительный параметр, h/s	0,0068	0,007	
	Относительный поперечный шаг s/D	2,82	2,82	
	Количество заходов оребрения, шт. (z)	0,932	1	
	Относительная высота d/D	0,0789	0,08	
	Относительный продольный шаг t/D	0,621	0,637	
	Угол спир. оребрения, ° (ϕ)	73	72	
	Число Прандтля (Pr)	0,699	0,7	
Число Рейнольдса (Re_D)	24848	25000		
Цилиндрические выемки	Длина пластины, м (L)	0,17	0,19	[82, 87] трубчатые, пластинчатые
	Ширина теплообменной пластины, м (B)	0,093	0,096	
	Высота пластины, м (H)	0,0099	0,01	
	Глубина выемки, м (h)	0,0015	0,0016	
	Диаметр выемки, м (d)	0,018	0,016	
	Поперечный шаг выемок, м (s)	0,041	0,042	
	Продольный шаг выемок, м (t)	0,022	0,024	
	Соотношение h/d	0,13	0,1	
	Число Прандтля (Pr)	0,73	0,7	
	Число Рейнольдса (Re_D)	292	300	

3.3. Согласование установленных оптимальных характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена с результатами экспериментальных исследований

Произведено сравнение результатов НС–моделирования оптимальных характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена различного типа с результатами экспериментальных исследований. Анализ согласования с экспериментальными исследованиями результатов НС–моделирования оптимальных характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена

выполнен для интенсификаторов в виде сферических, цилиндрических, V-образных, эллиптических, и подковообразных выемок, полусферических, кольцевых и спиральных выступов, спиральных проволочных вставок. Все результаты НС-моделирования положительно согласуются с результатами экспериментальных исследований. Результаты представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6

**Оптимальные параметры режимных и геометрических характеристик
поверхностных интенсификаторов теплообмена**

Кольцевые выступы										
<i>d/D</i>	<i>t/D</i>	<i>t/h</i>	<i>Pr</i>	<i>Re_D</i>	<i>d/D</i>	<i>t/D</i>	<i>t/h</i>	<i>Pr</i>	<i>Re_D</i>	Положительно согласовывается с результатами исследований [1, 57, 58, 67, 72, 75, 76, 133]
Фактические значения					НС – моделирование					
Ламинарный режим (<i>Re_D</i> < 600)										
0,97	1	66,6	3,56	650	0,967	1,07	66,4	3,43	647	Nu/Nu ₀
0,978	0,25	22,73	3,56	650	0,974	0,24	22,7	3,51	651	ξ/ξ ₀
0,97	0,25	22,73	3,56	650	0,971	0,22	22,64	3,59	648	(Nu/Nu ₀)/(ξ/ξ ₀)
Переходной режим (<i>Re_D</i> = 700 ÷ 3,5 · 10³)										
0,875	0,496	3,968	8,82	2510	0,877	0,499	4,01	8,76	2487	Nu/Nu ₀
0,983	0,496	29,17	2,94	1580	0,985	0,488	29,05	2,72	1563	ξ/ξ ₀
0,94	0,99	18,5	11,76	3160	0,942	0,991	18,61	11,82	3154	(Nu/Nu ₀)/(ξ/ξ ₀)
Турбулентный режим (<i>Re_D</i> > 3,5 · 10³)										
0,74	1	7,5	3,56	4000	0,739	0,99	7,61	3,53	3985	Nu/Nu ₀
0,967	0,944	28,6	20,58	6300	0,967	0,93	28,05	20,01	6257	ξ/ξ ₀
0,983	0,496	29,1	47	50000	0,989	0,492	29,24	46,8	49967	(Nu/Nu ₀)/(ξ/ξ ₀)
Полусферические выступы										
<i>d/D</i>	<i>t/D</i>	<i>s/D</i>	<i>Pr</i>	<i>Re_D</i>	<i>d/D</i>	<i>t/D</i>	<i>s/D</i>	<i>Pr</i>	<i>Re_D</i>	Положительно согласовывается с результатами исследований [1, 12, 39, 41, 63, 129 – 133]
Фактические значения					НС – моделирование					
Ламинарный режим (<i>Re_D</i> < 800)										
0,98	1	0,6	3,56	300	0,978	0,99	0,62	3,84	297	Nu/Nu ₀
0,98	1	0,6	3,56	400	0,949	0,97	0,57	3,55	412	ξ/ξ ₀
0,98	1	0,6	3,56	400	0,899	1	0,583	3,56	391	(Nu/Nu ₀)/(ξ/ξ ₀)
Переходной режим (<i>Re_D</i> = 800 ÷ 2,1 · 10³)										
0,74	0,9	0,4	3,56	2000	0,76	0,88	0,44	3,55	1980	Nu/Nu ₀

0,98	1	0,6	3,56	1200	0,972	0,99	0,593	3,57	2581	ξ/ξ_0
0,761	0,863	0,556	3,56	1400	0,768	0,861	0,549	3,54	1408	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$
Турбулентный режим ($Re_D > 2,1 \cdot 10^3$)										
0,761	0,863	0,556	3,56	2600	0,754	0,861	0,559	3,5	2598	Nu/Nu_0
0,98	1	0,6	3,56	2600	0,981	0,995	0,598	3,61	2609	ξ/ξ_0
0,9	0,6	0,4	3,56	2600	0,899	0,6	0,39	3,54	2601	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$
Сферические выемки										
<i>h/D</i>	<i>H/D</i>	<i>h/H</i>	<i>Pr</i>	<i>Re_D</i>	<i>h/D</i>	<i>H/D</i>	<i>h/H</i>	<i>Pr</i>	<i>Re_D</i>	Положительно согласовывается с результатами исследований [8,18, 24–29, 32–53, 134, 135]
Фактические значения				НС – моделирование						
Ламинарный режим										
0,327	0,873	0,375	0,7	240	0,322	0,854	0,371	0,69	231	Nu/Nu_0
0,138	1,556	0,088	0,7	560	0,129	1,542	0,086	0,68	557	ξ/ξ_0
0,5	1,2	0,416	0,7	800	0,439	1,214	0,424	0,71	781	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$
Переходной режим										
0,5	1	0,5	0,7	1300	0,48	0,47	0,491	0,69	1297	Nu/Nu_0
0,5	0,8	0,625	0,7	2000	0,51	0,77	0,59	0,7	1976	ξ/ξ_0
0,138	1,556	0,088	0,7	2100	0,131	1,524	0,083	0,71	2121	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$
Турбулентный режим										
0,5	0,2	2,5	0,7	20700	0,5	0,21	2,43	0,72	20651	Nu/Nu_0
0,327	0,545	0,6	0,7	10000	0,327	0,54	0,6	0,68	10023	ξ/ξ_0
0,5	1	0,5	0,7	6200	0,5	0,98	0,504	0,69	6197	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$
Капельные углубления										
<i>h/d</i>	<i>t/d</i>	<i>s/d</i>	<i>Pr</i>	<i>Re_D</i>	<i>h/d</i>	<i>t/d</i>	<i>s/d</i>	<i>Pr</i>	<i>Re_D</i>	Положительно согласовывается с результатами исследования [52]
Фактические значения				НС – моделирование						
Ламинарный режим										
0,2	2,16	1,25	0,7	350	0,19	2,15	1,24	0,69	347	Nu/Nu_0
0,2	2,16	1,25	0,7	550	0,21	2,17	1,22	0,69	541	ξ/ξ_0
0,2	2,16	1,25	0,7	540	0,2	2,14	1,27	0,71	537	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$
Переходной режим										
0,2	2,16	1,25	0,7	950	0,202	2,151	1,243	0,69	976	Nu/Nu_0
0,2	2,16	1,25	0,7	1500	0,209	2,149	1,251	0,701	1514	ξ/ξ_0
0,2	2,16	1,25	0,7	2400	0,993	2,157	1,242	0,68	2421	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$

Турбулентный режим										
0,2	2,16	1,25	0,7	4500	0,211	2,157	1,247	0,7	4540	Nu/Nu ₀
0,2	2,16	1,25	0,7	19000	0,198	2,161	1,252	0,68	19032	ξ/ξ_0
0,2	2,16	1,25	0,7	38000	0,207	2,149	1,249	0,71	38051	(Nu/Nu ₀)/(ξ/ξ_0)
V-образные углубления										
<i>h/d</i>	<i>t/d</i>	<i>s/d</i>	Pr	Re _D	<i>h/d</i>	<i>t/d</i>	<i>s/d</i>	Pr	Re _D	Положительно согласовывается с результатами исследования [152]
Фактические значения				НС – моделирование						
Ламинарный режим										
0,2	1,25	1,25	0,7	210	0,21	1,24	1,19	0,69	193	Nu/Nu ₀
0,3	1,25	1,25	0,7	300	0,29	1,23	1,21	0,701	298	ξ/ξ_0
0,3	1,25	1,25	0,7	650	0,28	1,26	1,26	0,68	624	(Nu/Nu ₀)/(ξ/ξ_0)
Переходной режим										
0,2	1,25	1,25	0,674	950	0,21	1,25	1,25	0,69	890	Nu/Nu ₀
0,2	1,251	1,251	0,675	2000	0,197	1,27	1,24	0,69	1976	ξ/ξ_0
0,2	1,253	1,253	0,677	2500	0,203	1,213	1,253	0,71	2438	(Nu/Nu ₀)/(ξ/ξ_0)
Турбулентный режим										
0,5	1,251	1,251	0,694	27500	0,5	1,241	1,26	0,7	27428	Nu/Nu ₀
0,5	1,252	1,252	0,695	38000	0,5	1,25	1,23	0,71	38046	ξ/ξ_0
0,5	1,253	1,253	0,696	13500	0,5	1,223	1,25	0,7	13479	(Nu/Nu ₀)/(ξ/ξ_0)
Эллиптические выемки										
<i>h/d</i>	<i>t/d</i>	<i>s/d</i>	Pr	Re _D	<i>h/d</i>	<i>t/d</i>	<i>s/d</i>	Pr	Re _D	Положительно согласовывается с результатами исследования [52]
Фактические значения				НС – моделирование						
Ламинарный режим										
0,22	2,162	1,252	0,679	300	0,218	2,161	1,243	0,71	297	Nu/Nu ₀
0,23	2,163	1,253	0,685	550	0,229	2,159	1,239	0,68	541	ξ/ξ_0
0,21	2,16	1,25	0,7	700	0,211	2,162	1,252	0,7	672	(Nu/Nu ₀)/(ξ/ξ_0)
Переходной режим										
0,23	2,163	1,253	0,678	950	0,224	2,157	1,251	0,7	947	Nu/Nu ₀
0,21	2,161	1,251	0,68	1450	0,216	2,16	1,25	0,72	1511	ξ/ξ_0
0,2	2,16	1,25	0,7	2500	0,212	2,162	1,247	0,67	2553	(Nu/Nu ₀)/(ξ/ξ_0)
Турбулентный режим										
0,23	2,163	1,253	0,678	9850	0,228	2,162	1,252	0,71	9901	Nu/Nu ₀
0,21	2,161	1,251	0,695	17500	0,215	2,158	1,253	0,69	17485	ξ/ξ_0

0,2	2,16	1,25	0,7	57550	0,199	2,158	1,251	0,7	57523	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$
Спиральные проволочные вставки										
d/D	t/D	$\phi, ^\circ$	Pr	Re_D	d/D	t/D	$\phi, ^\circ$	Pr	Re_D	Положительно согласовывается с результатами исследований [65, 71, 91, 93]
Фактические значения				НС – моделирование						
Ламинарный режим										
0,8	0,66	0	202	50	0,78	0,64	0,01	197	53	Nu/Nu_0
0,8	0,66	45	202	500	0,73	0,665	44	212	510	ξ/ξ_0
0,8	0,66	0	202	650	0,81	0,65	0,09	189	648	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$
Переходной режим										
0,8	0,63	45	0,7	1200	0,82	0,63	43	0,69	1113	Nu/Nu_0
0,8	1,873	0	0,7	900	0,8	1,873	0	0,77	897	ξ/ξ_0
0,8	0,66	45	202	2300	0,77	0,66	0,004	203	2248	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$
Турбулентный режим										
0,8	0,637	0	0,7	50000	0,78	0,617	1,1	0,7	50092	Nu/Nu_0
0,8	0,63	45	0,7	5000	0,8	0,631	42	0,7	5015	ξ/ξ_0
0,8	0,63	45	0,7	10000	0,69	0,623	47	0,7	10135	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$
Цилиндрические выемки										
$s, м$	$t, м$	h/d	Pr	Re_D	$s, м$	$t, м$	h/d	Pr	Re_D	Положительно согласовывается с результатами исследований [48, 78 – 87, 112, 113, 136 – 144]
Фактические значения				НС – моделирование						
Ламинарный режим										
0,042	0,024	0,1	0,7	300	0,042	0,024	0,1	0,7	297	Nu/Nu_0
0,042	0,024	0,2	0,7	450	0,042	0,024	0,2	0,63	443	ξ/ξ_0
0,042	0,024	0,5	0,7	650	0,042	0,024	0,5	0,71	654	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$
Переходной режим										
0,042	0,024	0,5	0,7	1200	0,042	0,024	0,5	0,7	1194	Nu/Nu_0
0,042	0,024	0,5	0,7	1800	0,042	0,024	0,5	0,71	1743	ξ/ξ_0
0,042	0,024	0,5	0,7	2100	0,042	0,024	0,5	0,64	2146	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$
Турбулентный режим										
0,042	0,024	0,2	0,7	4000	0,042	0,024	0,15	0,69	4002	Nu/Nu_0
0,042	0,024	0,2	0,7	10000	0,042	0,024	0,19	0,7	10038	ξ/ξ_0
0,042	0,024	0,2	0,7	18000	0,042	0,024	0,22	0,7	18194	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$

3.4. Выводы по 3 главе

Таким образом, полученные результаты исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы положительно согласовываются с результатами исследований в экспериментальных диапазонах режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена. Это позволяет сделать вывод, что результаты НС-моделирования для геометрических и режимных характеристик вне диапазона проведенных экспериментальных исследований с достаточно высокой точностью характеризуют эффективность пассивной поверхностной интенсификации теплообмена.

Разработанный комплекс прикладных программ предназначен для НС-моделирования параметров режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена и позволяет получить оптимальные характеристики по заданным пользователем параметрам, а также спрогнозировать значения тепловой, гидравлической и теплогидравлической эффективности при поверхностной интенсификации теплообмена. Разработанный комплекс прикладных программ позволяет получить результаты исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена, а также использоваться при проектировании новых и повышении энергетической эффективности эксплуатируемых теплообменных устройств. Функциональные возможности комплекса прикладных программ позволяют получить прогнозные значения оптимальных характеристик для следующих типов поверхностных интенсификаторов теплообмена: кольцевые и полусферические выступы, сферические, капельные, V-образные, эллиптические, подковообразные, цилиндрические выемки и спиральные проволочные вставки.

Анализ согласования экспериментальных результатов исследований гидравлического сопротивления и полученных результатов исследования гидравлической эффективности в среде ИНС при поверхностной интенсификации теплообмена показал, что разница между фактическими и прогнозными значениями для гидравлической эффективности меньше, чем для тепловой. Это объясняется тем, что зависимость тепловой эффективности от режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена выражается в меньшей степени, чем от гидравлической эффективности. Для описания тепловой эффективности требуется большее число экспериментальных параметров, чем для гидравлического сопротивления.

По результатам НС-моделирования теплогидравлической эффективности выявлено минимальное значение погрешности моделирования по сравнению с погрешностью моделирования тепловой и гидравлической эффективности, что свидетельствует о выявлении в выборке оптимальных характерных взаимосвязей между геометрическими и режимными параметрами поверхностных интенсификаторов теплообмена, которые позволяют спрогнозировать значения теплогидравлической эффективности при поверхностной интенсификации теплообмена с наименьшей погрешностью.

Получены оптимальные характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена за пределами теплофизических и гидромеханических условий экспериментальных исследований. Оптимальные параметры режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена, обеспечивающих наилучшую тепловую, гидравлическую и теплогидравлическую эффективность, полученные в результате нейросетевого моделирования, представлены в приложении 3. Необходимо отметить, что представленные в приложении 3 результаты нейросетевого моделирования оптимальных характеристик не исчерпывающие. Предложенный комплекс прикладных программ позволяет получить оптимальные характеристики по заданным пользователем параметрам.

ГЛАВА 4. Энергоэффективность теплообменных устройств с трубчатыми и пластинчатыми теплообменными поверхностями и способ их интенсификации

В данной главе представлены результаты исследования энергоэффективности поверхностных теплообменных устройств с пассивными интенсификаторами различной формы, а также оптимальные геометрические и режимные характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена для проектирования энергоэффективных теплообменных поверхностей. Рассмотрены трубчатые и пластинчатые поверхности теплообмена с теплоносителем в виде воды и воздуха. Оптимальные характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена получены по результатам предложенного метода исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена. Предложен метод интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования, который позволяет регулировать режимные характеристики теплообменного оборудования в автоматическом режиме в процессе эксплуатации.

4.1. Методика оценки энергоэффективности поверхностных теплообменных устройств

Предложенный метод исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена позволяет определить оптимальное соотношение между теплообменной эффективностью, гидравлическим сопротивлением и геометрическими характеристиками поверхностных интенсификаторов теплообмена. Известно, что поверхностная интенсификация теплообмена сопровождается увеличением гидравлического сопротивления, что значительно снижает энергоэффективность теплообменного оборудования. Поэтому эффект поверхностной интенсификации теплообмена

достигается только при опережающем росте тепловой эффективности. Таким образом, при оценке энергоэффективности необходимо одновременно учитывать гидравлические потери и изменение количества тепла при поверхностной интенсификации относительно не интенсифицированной поверхности.

В научно-технической литературе для определения оптимальных соотношений между гидравлическим сопротивлением и интенсивностью теплообмена используется коэффициент Кирпичева E [159]:

$$E = \frac{Q}{N}, \quad (4.1)$$

где Q – количество тепла, отданного поверхностью, Вт; N – мощность, затраченная на перекачивание теплоносителя, Вт.

В работе [160] представлен критерий, который учитывает относительную эффективность теплообмена при одинаковых затратах мощности на прокачку теплоносителя через единицу поверхности [160]:

$$N = \frac{\alpha}{\alpha_0}, \quad (4.2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи интенсифицированной поверхности Вт/(м²·К), α_0 – коэффициент теплоотдачи гладкостенной поверхности Вт/(м²·К).

Как уже отмечалось в данной диссертационной работе, тепловая эффективность оценивается соотношением коэффициентов средней теплоотдачи для интенсифицированной и гладкостенной поверхности, выраженное критерием Нуссельта [88]:

$$N = \frac{Nu}{Nu_0}, \quad (4.3)$$

где Nu – число Нуссельта для интенсифицированной поверхности; Nu_0 – число Нуссельта для гладкостенной поверхности. Следует отметить, что в данном выражении определяющим критерием эффективности является увеличение количества тепла, передаваемого теплообменной поверхностью, в независимости от увеличения гидравлического сопротивления. При этом при оценке энергоэффективности теплообменных процессов важно учитывать гидравлические

потери, вызванные в результате поверхностной интенсификации теплообмена. Для этого используем следующее выражение [88]:

$$\Delta\xi = \frac{\xi}{\xi_0}, \quad (4.4)$$

где ξ и ξ_0 – коэффициенты гидравлического сопротивления для интенсифицированной и гладкостенной поверхности.

Таким образом, для оценки эффективности теплообменной поверхности используем фактор аналогии Рейнольдса – соотношение увеличения теплоотдачи к увеличению гидравлических потерь:

$$\eta = \frac{Nu / Nu_0}{\xi / \xi_0}, \quad (4.5)$$

где η – коэффициент теплогидравлической эффективности.

4.2. Энергоэффективность теплообменного оборудования с трубчатыми теплообменными поверхностями

Одним из основных достоинств трубчатых теплообменных поверхностей является возможность обеспечения оптимальной скорости потока теплоносителя в результате изменения диаметра труб. В силу простоты конструкции, реконструкции и чистке, широко используются в промышленности. К недостаткам можно отнести уменьшение теплообменной поверхности в единице объема теплообменного аппарата, что приводит к увеличению габаритов теплообменного устройства.

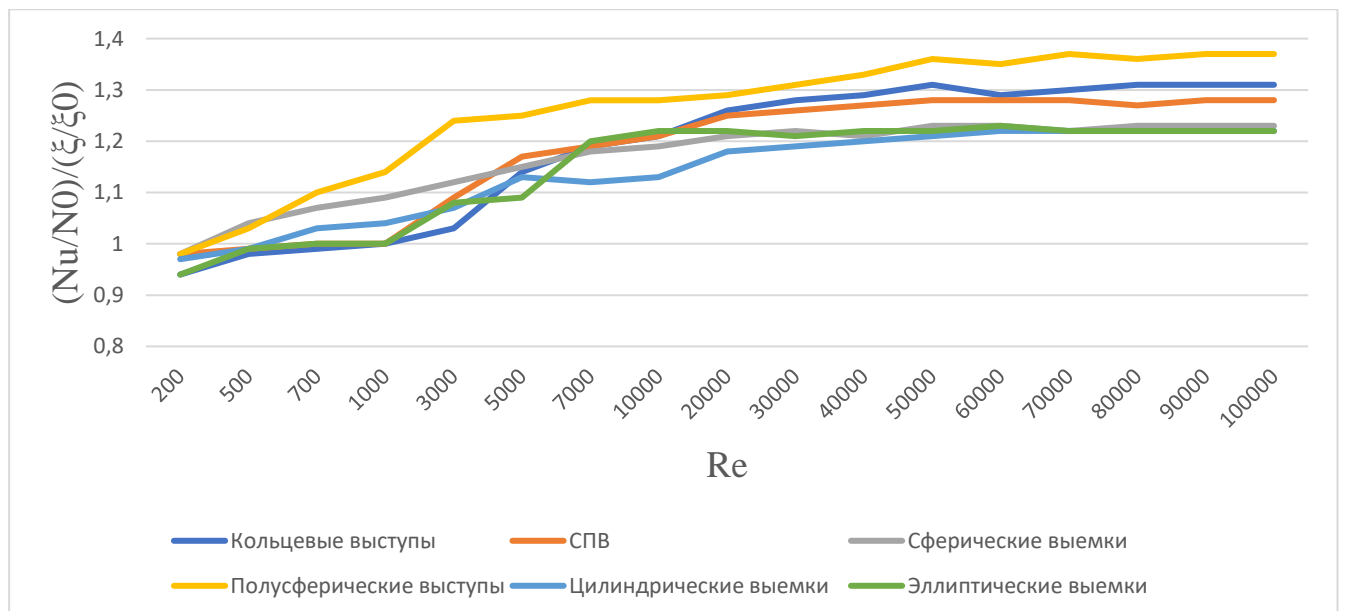
Разработанный метод исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена позволяет получить оптимальные геометрические и режимные характеристики пассивных поверхностных интенсификаторов теплообмена для трубчатых теплообменных поверхностей в широком диапазоне свойств теплоносителей и характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена. Полученные оптимальные

характеристики интенсификаторов обеспечивают энергоэффективность трубчатых теплообменных поверхностей.

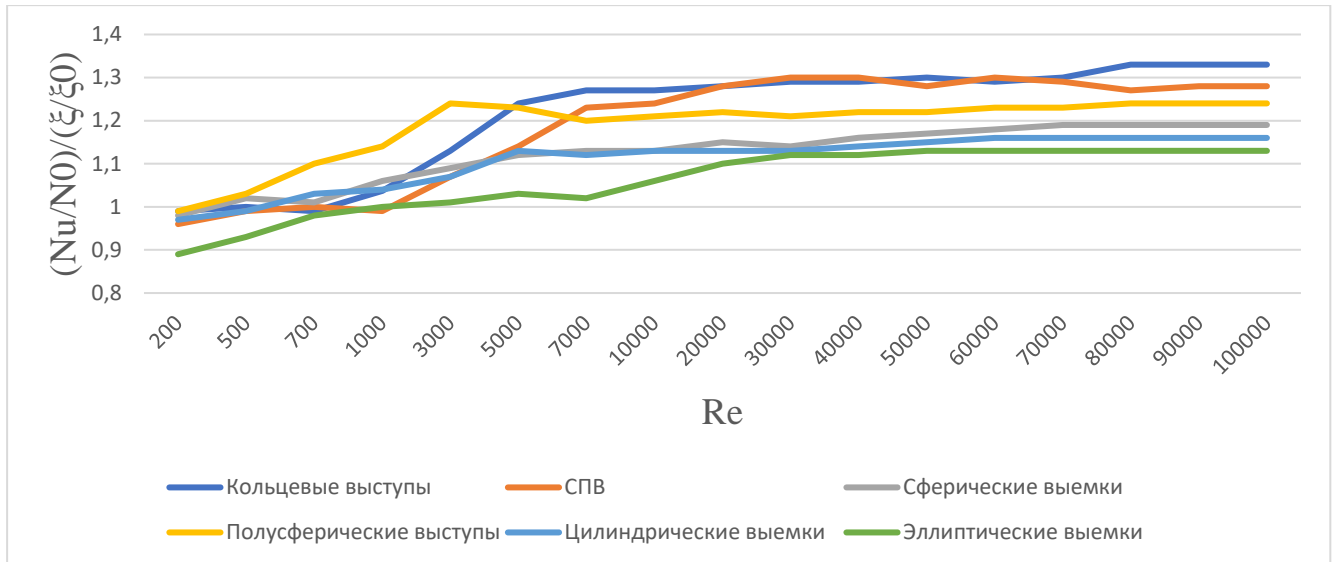
Оптимальные характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена и расширение диапазона за пределы экспериментальных исследований получены на основе обобщения результатов следующих исследований поверхностной интенсификации теплообмена [1–118,128, 129, 131–152].

Обобщающие характеристики получены в виде нейросетевой модели поверхностной интенсификации теплообмена для следующих типов поверхностных интенсификаторов: кольцевые и полусферические выступы, сферические, эллиптические, цилиндрические выемки и спиральные проволочные вставки. Разработка метода исследования представлена во второй главе данной диссертационной работы.

Результаты исследования теплогидравлической эффективности при поверхностной интенсификации теплообмена в широком диапазоне свойств режимных характеристик для теплоносителей в виде жидкости и газа представлены на рисунках 4.1.



А



Б

Рисунок 4.1 – Результаты исследования по теплогидравлической эффективности трубчатых теплообменных поверхностей, а – вода; б – воздух.

Диапазон оптимальных относительных геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена, использованных в исследовании теплогидравлической эффективности теплообменных поверхностей представлен в таблице 4.1. Оптимальные геометрические характеристики для каждого типа поверхностного интенсификатора теплообмена получены по результатам нейросетевого моделирования с помощью разработанного прикладного программного обеспечения. Этапы работы прикладного программного обеспечения подробно описаны в главе 3.

Таблица 4.1

Оптимальные относительные параметры режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена для трубчатых теплообменных поверхностей

Кольцевые выступы			Спиральные проволочные вставки		
d/D	t/D	t/h	h/D	t/h	h/s
0,94÷0,98	0,5÷1	42÷84	0,74÷0,8	0,9÷0,94	0,4÷0,5
Сферические выемки			Полусферические выступы		
h/D	H/D	h/H	d/D	t/D	s/D
0,32÷0,5	0,97÷1,9	0,41÷0,6	0,83÷0,92	0,86÷0,9	0,55÷0,6

Цилиндрические выемки			Эллиптические выемки		
$s, \text{ м}$	$t, \text{ м}$	h/d	h/d	t/d	s/d
0,1÷0,2	0,7÷0,9	1÷2	0,2÷0,5	2÷3	1,25÷2
Подковообразные выемки			Капельные углубления		
h/d	t/d	s/d	h/d	t/d	s/d
0,17÷0,19	4,3÷5	1,1÷2,1	0,1÷0,2	2,16÷2,3	1,25÷2

Диапазон режимных характеристик для всех типов поверхностных интенсификаторов изменялся следующим образом:

- Для воды – $Pr = 1,75 \div 13,67$, $Re = 200 \div 100000$
- Для воздуха – $Pr = 0,703 \div 0,715$, $Re = 200 \div 100000$

По результатам исследования теплогидравлической эффективности в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена в трубчатых теплообменных поверхностях видно, что полусферические выступы по аналогии Рейнольдса наиболее эффективны при жидком теплоносителе. Для воздуха наилучший результат показали кольцевые выступы и спиральные проволочные вставки. Установлено, что полусферические выступы значительно уменьшают критическое число Рейнольдса.

4.3. Энергоэффективность теплообменного оборудования с пластинчатыми поверхностями теплообмена

Пластинчатые теплообменные поверхности по сравнению с трубчатыми позволяют проектировать теплообменные аппараты с меньшими массогабаритными характеристиками. Также теплообменные устройства с пластинчатыми поверхностями отличаются быстрой сборкой и разборкой, что позволяет реализовать удобное техническое обслуживание и чистку теплообменных поверхностей. Основное достоинство данных теплообменных поверхностей заключается в возможности объединения в одном теплообменном аппарате несколько пластинчатых теплообменных поверхностей с отдельным теплоносителем, что значительно повышает энергоэффективность технологического процесса в целом. Существенным недостатком является то, что данный тип теплообменной поверхности не позволяет увеличивать давление

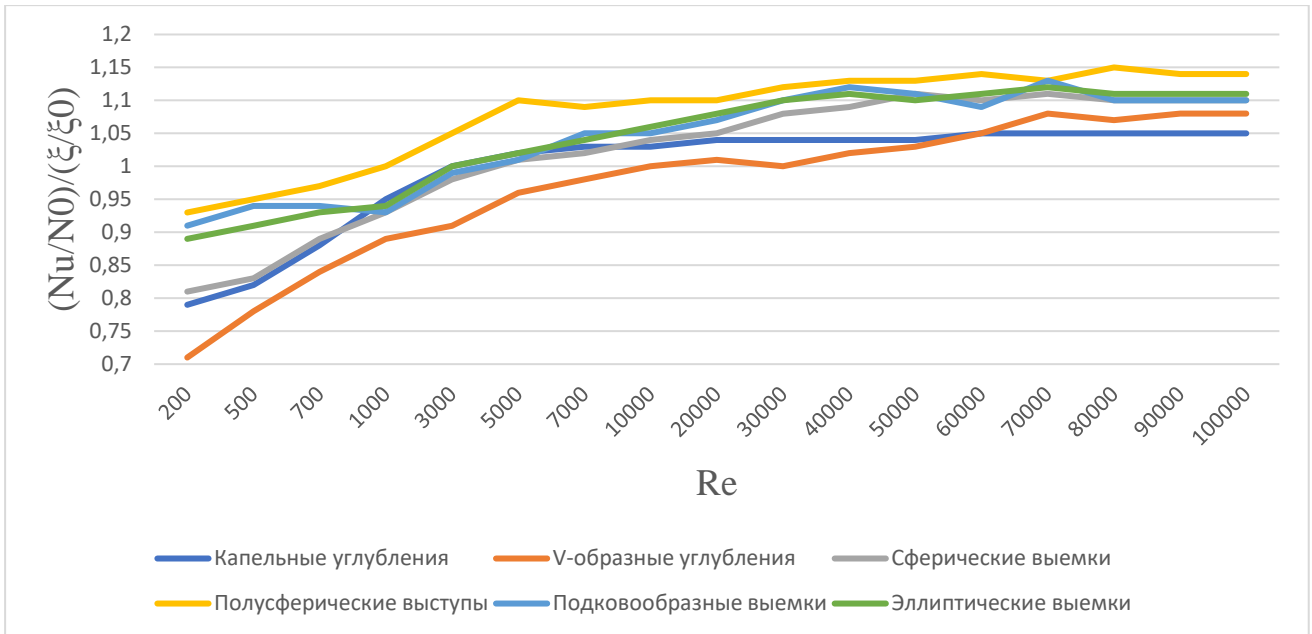
теплоносителя. Это связано с риском разгерметизации уплотнений между пластинами теплообменного устройства.

Разработанный метод исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена позволяет получить оптимальные геометрические и режимные характеристики пассивных поверхностных интенсификаторов теплообмена для пластинчатых теплообменных поверхностей в широком диапазоне свойств теплоносителей и характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена. Полученные оптимальные характеристики интенсификаторов обеспечивают энергоэффективность пластинчатых теплообменных поверхностей.

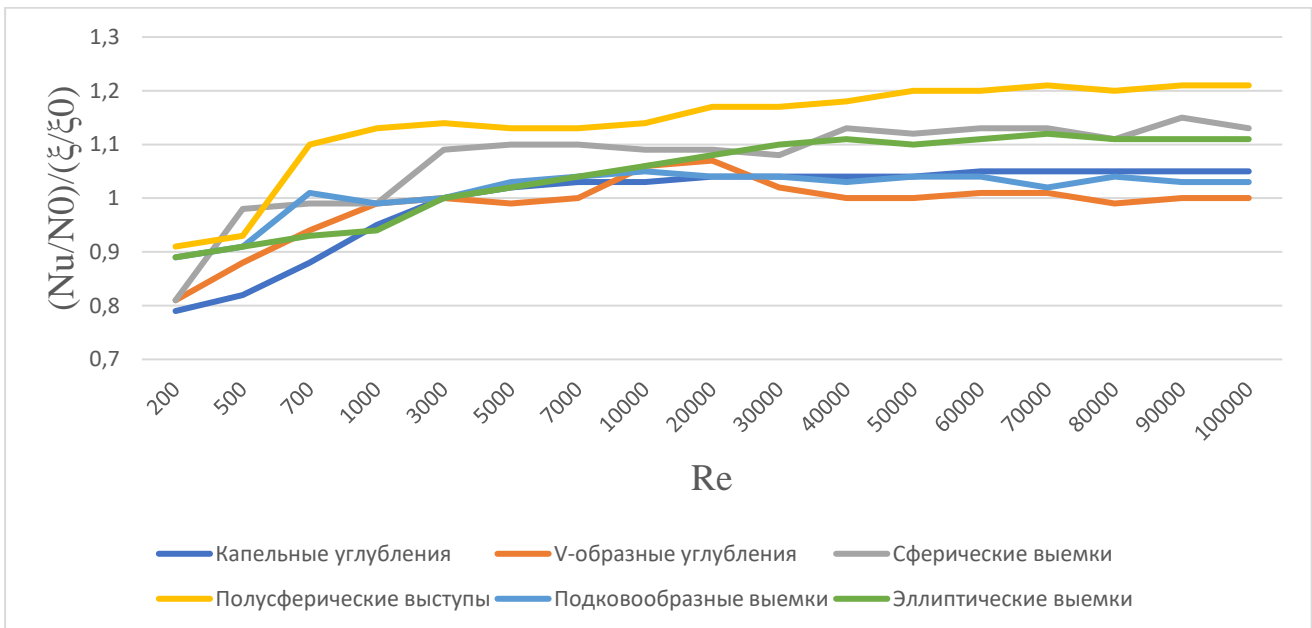
Оптимальные характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена и расширение диапазона за пределы экспериментальных исследований получены на основе обобщения результатов следующих исследований поверхностной интенсификации теплообмена [1–118,128, 129, 131–152].

Обобщающие характеристики получены в виде нейросетевой модели поверхностной интенсификации теплообмена для следующих типов поверхностных интенсификаторов: кольцевые и полусферические выступы, сферические, капельные, V-образные, эллиптические, подковообразные, цилиндрические выемки и спиральные проволочные вставки. Разработка метода исследования представлено во второй главе данной диссертационной работы.

Результаты исследования теплогидравлической эффективности при поверхностной интенсификации теплообмена в широком диапазоне свойств режимных характеристик для теплоносителей в виде жидкости и газа представлены на рисунках 4.2.



А



Б

Рисунок 4.2 – Результаты исследования по теплогидравлической эффективности пластинчатых теплообменных поверхностей, а – вода; б – воздух.

Диапазон оптимальных относительных геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена, использованных в исследовании теплогидравлической эффективности теплообменных поверхностей представлен в таблице 4.2. Оптимальные геометрические характеристики для каждого типа поверхностного интенсификатора теплообмена получены по результатам

нейросетевого моделирования с помощью разработанного прикладного программного обеспечения. Этапы работы прикладного программного обеспечения подробно описаны в главе 3.

Таблица 4.2

Оптимальные относительные параметры режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена для пластинчатых теплообменных поверхностей

Сферические выемки			Полусферические выступы		
h/D	H/D	h/H	d/D	t/D	s/D
0,13÷0,38	1,9÷2,3	1,7÷2,1	0,74÷0,84	0,9÷0,98	0,4÷0,5
V – образные углубления			Эллиптические выемки		
h/d	t/d	s/d	h/d	t/d	s/d
0,2÷0,3	1,25÷1,3	1,6÷2,3	0,2÷0,25	2,1÷2,2	1÷2
Цилиндрические выемки			Эллиптические выемки		
$s, м$	$t, м$	h/d	h/d	t/d	s/d
0,1÷0,2	0,7÷0,9	1÷2	0,2÷0,5	2÷3	1,25÷2

Диапазон режимных характеристик для всех типов поверхностных интенсификаторов изменялся следующим образом:

- Для воды – $Pr = 2,45 ÷ 12,47$, $Re = 200 ÷ 100000$
- Для воздуха – $Pr = 0,703 ÷ 0,715$, $Re = 200 ÷ 100000$

По результатам исследования теплогидравлической эффективности в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена видно, что для пластинчатых теплообменных поверхностей полусферические выступы для жидких и газообразных теплоносителей наиболее эффективны по аналогии Рейнольдса.

4.4. Анализ установленных взаимосвязей между режимными и геометрическими характеристиками поверхностных интенсификаторов теплообмена.

По результатам исследования в среде ИНС (рисунок 4.1 и рисунок 4.2) видно, что для пластинчатых и трубчатых теплообменных устройств максимальный эффект поверхностной интенсификации достигается для теплообменных поверхностей с интенсификаторами в виде кольцевых и полусферических

выступов, а также спиральных проволочных вставок. Предложенный метод исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических характеристик интенсификаторов поверхностных теплообменных устройств с помощью разработанного комплекса прикладных программ позволяет установить взаимосвязи между всеми параметрами режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена. Рассмотрим влияние основных геометрических и режимных характеристик на тепловую эффективность, гидравлическое сопротивление и теплогидравлическую эффективность при поверхностной интенсификации трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств кольцевыми, полусферическими выступами и спиральными проволочными вставками. Взаимосвязи установлены путем поочередного нейросетевого моделирования всех режимных и геометрических параметров исследуемого типа интенсификатора и анализа значений тепловой эффективности, гидравлического сопротивления или теплогидравлической эффективности для диапазона относительных значений моделируемого параметра. Этапы нейросетевого моделирования и установления взаимосвязей подробно описаны во второй главе данной диссертационной работы.

Для ламинарного режима ($Re_D < 600$) в каналах трубчатых теплообменных устройств с кольцевыми выступами и спиральными проволочными вставками не установлена зависимость значения теплоотдачи Nu/Nu_0 и гидравлического сопротивления ξ/ξ_0 от числа Рейнольдса Re_D . Для пластинчатых теплообменных поверхностей с полусферическими выступами установлен более ранний ламинарно-турбулентный переход ($Re_{кр} = 300$), однако влияние числа Рейнольдса Re_D на теплоотдачу и гидравлическое сопротивление также не выявлено. Установлено, что при увеличении высоты полусферических выступов h уменьшается $Re_{кр}$. Для кольцевых выступов установлено, что при изменении относительного параметра t/h результаты НС-моделирования не изменяются. Это позволяет сделать вывод, что данный относительный параметр также не влияет на теплоотдачу и гидравлическое сопротивление при ламинарном режиме, что

положительно согласуется с результатами исследования [1]. Не выявлена зависимость значения гидравлического сопротивления ξ/ξ_0 от относительного шага полусферических выступов пластинчатых теплообменных устройств.

Значительное влияние на значения теплоотдачи, гидравлического сопротивления и теплогидравлической эффективности оказывает увеличение площади поверхности f и высота h кольцевых и полусферических выступов пластинчатых и трубчатых теплообменных устройств. Увеличение относительной высоты кольцевых выступов d/D приводит к одновременному повышению теплоотдачи Nu/Nu_0 и гидравлического сопротивления ξ/ξ_0 . Для полусферических выступов выявлено значительное уменьшение гидравлического сопротивления при уменьшении относительной высоты выступов d/D . Это связано с тем, что полусферические выступы позволяют меньше сужать обтекаемой теплоносителем пространство. При увеличении высоты кольцевых и полусферических выступов h (уменьшении d/D) увеличивается гидравлическое сопротивление ξ/ξ_0 , так как выступы начинают выступать из пристеночного слоя. При изменении относительного шага кольцевых выступов $1,2 > t/D > 0,44$ выявлено увеличение теплоотдачи $Nu/Nu_0 = 1,7$, при этом уменьшение установлено при $t/D < 0,44$, что согласуется с данными [1,67,75]. Для полусферических выступов установлено, что уменьшение s/D приводит к увеличению гидравлического сопротивления.

Анализ результатов НС-моделирования поверхностной интенсификации теплообмена трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств при переходных режимах ($Re_D = 700 \div 3,5 \cdot 10^3$ – для кольцевых выступов и спирально проволочных вставок и $300 \div 2,5 \cdot 10^3$ – для полусферических выступов) показал, что значения теплоотдачи Nu/Nu_0 и гидравлического сопротивления ξ/ξ_0 в большей степени зависят от относительной высоты выступов d/D . Это удовлетворительно согласуется с данными [1,67,75]. Для кольцевых выступов и спирально проволочных вставок в диапазоне чисел Рейнольдса $Re_D = 2 \cdot 10^3 \div 2,7 \cdot 10^3$ выявлено максимальное увеличение теплоотдачи $Nu/Nu_0 = 3,7$, что превышает эффективность от интенсификации теплоотдачи при турбулентном режиме. Гидравлическое сопротивление при этом увеличивается в 4 раза $\xi/\xi_0 = 4$, что

положительно согласуется с результатами экспериментальных исследований [1,67]. Влияние относительного шага кольцевых выступов и спирально проволочных вставок при $t/D < 0,45$ на результаты НС–моделирования теплоотдачи и гидравлического сопротивления не установлено. Увеличение относительного шага кольцевых выступов $0,45 < t/D < 1$ приводит к увеличению интенсификации. Не выявлена зависимость гидравлического сопротивления от относительного шага полусферических выступов. Для кольцевых выступов и спирально проволочных вставок установлено, что увеличение высоты выступов h , приводит к увеличению гидравлического сопротивления. Максимальное увеличение гидравлического сопротивления $\xi/\xi_0 = 13$, при этом увеличение теплоотдачи $Nu/Nu_0 = 10$, что согласуются с результатами экспериментального исследования [1]. При $0,22 < t/D < 0,47$ гидравлическое сопротивление уменьшается $\xi/\xi_0 = 1,6$. Увеличение t/D приводит к увеличению гидравлического сопротивления $\xi/\xi_0 = 1,9$. Параметр t/h на результаты НС–моделирования поверхностной интенсификации кольцевыми, полусферическими выступами и спирально проволочными вставками не влияет.

Результаты исследования поверхностной интенсификации теплообмена кольцевыми выступами и спирально проволочными вставками при турбулентном режиме ($Re_D > 3,5 \cdot 10^3$) позволило установить, что значительное влияние на теплоотдачу Nu/Nu_0 и гидравлическое сопротивление ξ/ξ_0 оказывают высота h и шаг выступов t . Данная зависимость проявляется при изменении относительной высоты кольцевых выступов. Для спирально проволочных вставок установлено, что данная зависимость также проявляется при изменении угла спирального оребрения θ интенсификаторов для трубчатых теплообменных устройств. Увеличение относительного параметра кольцевых выступов t/h до 90 приводит к повышению теплоотдачи Nu/Nu_0 . При $t/h < 8,4$ коэффициент теплоотдачи значительно уменьшается, что удовлетворительно согласуется с экспериментальными исследованиями [74]. Необходимо отметить, что влияние относительного параметра t/h кольцевых выступов и спирально проволочных вставок для ламинарного и турбулентного режимов течения не выявлено. Для полусферических выступов установлено, что максимальная теплогидравлическая

эффективность достигается при относительной высоте полусферических выступов $d/D = 0,9-0,92$ – для переходного режима течения, $d/D = 0,97-0,98$ – для турбулентного режима. Также значительное влияние на теплогидравлическую эффективность при турбулентном режиме оказывает значение угла между выступом и осью трубы ϕ . Максимальная теплогидравлическая эффективность достигается при $\phi = 45^\circ$ - для воды и $\phi = 55^\circ$ - для воздуха. При относительном параметре $t/h < 2,5$ результаты исследования интенсификации спиральными проволочными вставками аналогичны результатам интенсификации кольцевыми выступами. Это позволяет сделать вывод, что кольцевые выступы наиболее эффективны относительно спиральных проволочных вставок. Однако, при значении относительного параметра $s/D = 3$ и единичном заходе спирального оребрения в условиях турбулентного режима течения теплоносителя теплогидравлическая эффективность выше относительно кольцевых выступов.

Таким образом, по результатам исследования установлено, что при низких числах Рейнольдса Re_D (ламинарный режим) кольцевые выступы и спиральные проволочные вставки приводят к увеличению теплоотдачи Nu/Nu_0 при опережающем росте гидравлического сопротивления ξ/ξ_0 . Это приводит к тому, что в некоторых случаях, уровень теплоотдачи ниже, чем в гладкой трубе. В области переходных числах Рейнольдса Re_D выявлена значительная зависимость теплогидравлической эффективности $(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$ поверхностной интенсификации от высоты выступов h . Полусферические выступы позволяют значительно уменьшить критическое число числах Рейнольдса $Re_{кр}$. Для получения положительного эффекта необходимо увеличивать высоту кольцевых выступов и спиральных проволочных вставок h до 0,00033 м. Увеличение высоты кольцевых и полусферических выступов приводит к увеличению гидравлического сопротивления. Однако, увеличение относительного шага t/D приводит к падению гидравлической эффективности. Выявлено увеличение тепловой эффективности при сопоставимом увеличении гидравлического сопротивления. Максимальное увеличение теплогидравлической эффективности трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств при интенсификации теплообменной поверхности

кольцевыми и полусферическими выступами, а также спиральными проволочными вставками наблюдается при турбулентном режиме.

В приложении 3 представлены результаты исследования оптимальных параметров режимных и геометрических характеристик кольцевых, полусферических выступов и спиральных проволочных вставок. Полученные оптимальные характеристики режимных и геометрических характеристик обеспечивают наилучшее значение теплообменной эффективности при поверхностной интенсификации теплообмена. Необходимо отметить, что анализ установленных взаимосвязей показал, что динамика тепловых и гидромеханических процессов в интенсифицированных поверхностях сложна и зависит многих факторов. Теплогидравлическая эффективность зависит от режима течения (число Рейнольдса Re), природы теплоносителя (число Прандтля Pr), геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов. Кроме того, необходимо учитывать изменение каждого параметра режимных и геометрических характеристик относительно друг друга. Именно поэтому табличные данные оптимальных характеристик не позволяют охватить широкий диапазон свойств теплоносителя, режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена, что значительно ограничивает практическое применение результатов исследования. Обобщение результатов исследований в виде эмпирических зависимостей также ограничивается диапазоном параметров, в которых проведены исследования. Для решения данной проблемы и расширения практического применения результатов исследования необходимо учитывать все тепловые и гидромеханические факторы, описывающие текущее состояние теплообменного устройства или требуемые характеристики при проектировании нового теплообменного оборудования. Разработанный метод исследования и его практическая реализация с помощью комплекса прикладных программ позволяет решить данные задачи, обеспечивая максимальную энергоэффективность теплообменного оборудования, учитывая все факторы, характеризующие его работу. Таким образом, обобщение полученных результатов исследования представлены в виде компьютерной модели. Кроме того, разработанный комплекс

прикладных программ на основе нейросетевого моделирования, позволяет работать с параметрами за пределами диапазонов экспериментальных исследований. Подробное описание этапов функционирования и разработанного комплекса прикладного программного обеспечения реализующего метод исследования представлено в третьей главе данной диссертационной работы. Для проектирования новых энергоэффективных пластинчатых и трубчатых теплообменных устройств предлагается использовать разработанный комплекс прикладных программ. Для повышения энергоэффективности эксплуатируемого теплообменного оборудования разработан способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного устройства. Далее представлено описание предлагаемого способа интенсификации теплообмена.

4.5. Способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования

Разработанный метод исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена, позволяющий установить взаимосвязи между геометрическими и режимными характеристиками пассивных поверхностных интенсификаторов теплообмена, позволяет реализовать метод интенсификации теплообмена, основанный на интеллектуальном управлении режимными характеристиками теплообменного оборудования. Это позволяет поддерживать энергоэффективность теплообменных устройств при изменении внешних условий, свойств теплоносителей и режимов работы технологического оборудования.

Интеллектуальное управление является обобщением семиотического [162], когнитивного [163] и информационного управления [164]. Интенсификация теплообмена на основе интеллектуального управления основана на анализе характерных логических взаимосвязей между режимными и геометрическими

характеристиками, установленными в процессе обучения искусственной нейронной сети по результатам экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена [1–118,128, 129, 131–152]. Интеллектуальное управление по результатам обучения ИНС предполагает, что система управления обладает вычислительными возможностями, позволяющими извлекать и обобщать знания с целью порождения математической модели управляемой системы и модифицировать свое собственное управляющее воздействие на основе этих знаний [165]. Это обеспечивает автоматическую настройку управляющей системой оптимальных режимных характеристик теплообменного оборудования, реализует адаптивную самоорганизацию при изменении свойств теплоносителя и внешней среды. Обучение искусственной нейронной сети может рассматриваться как процесс, посредством которого система управления может модифицировать свои функции для повышения качества функционирования управляемого объекта на основе извлечения релевантной информации (знаний) [166]. Особенностью предлагаемого интеллектуальной интенсификации поверхностной интенсификации теплообмена, отличающей его от других систем управления и регулирования, является возможность изменения структуры управления, применяемых моделей и даже принципов управления, а не только параметров [166].

Эффективность предложенного метода интенсификации при изменении во времени режимных характеристик теплообменного оборудования достигается использованием многоуровневой архитектуры интеллектуальной системы управления, которая состоит из концептуального, информационного и операционного уровня. На рисунке 4.3 представлена архитектура интеллектуальной системы управления, на которой основывается предложенный метод интенсификации теплообмена. Система, построенная по такой архитектуре, управляет поведением сложных технических объектов в условиях автономного и коллективного взаимодействия [166].

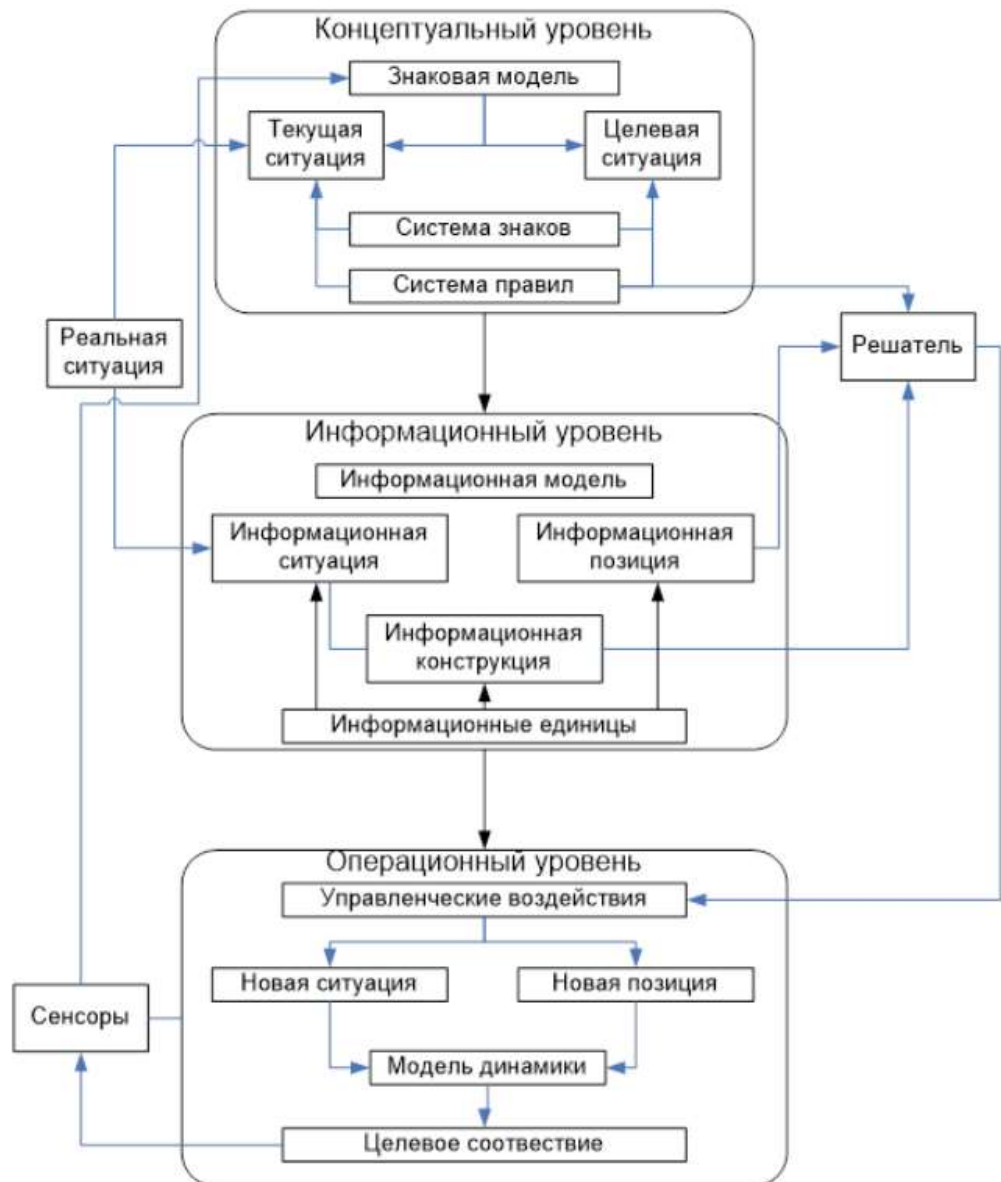


Рисунок 4.3 – Многоуровневое интеллектуальное управление [166]

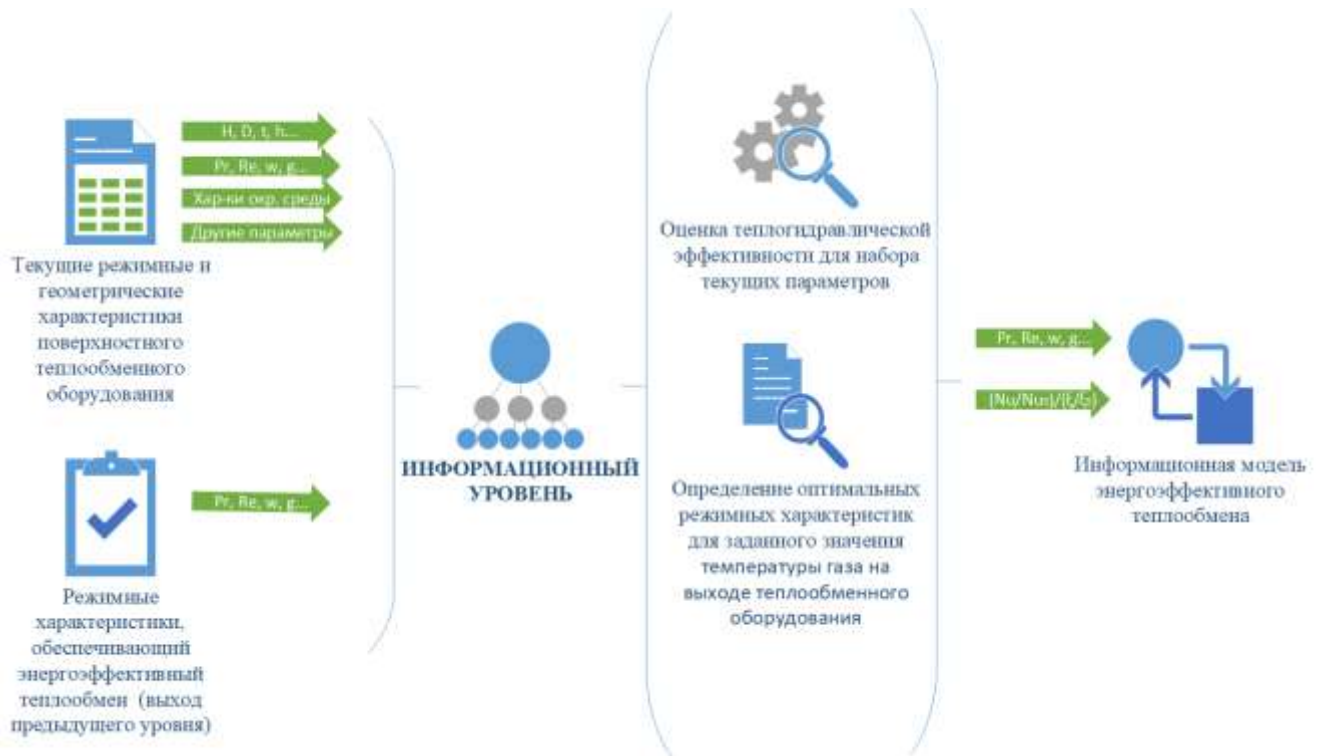
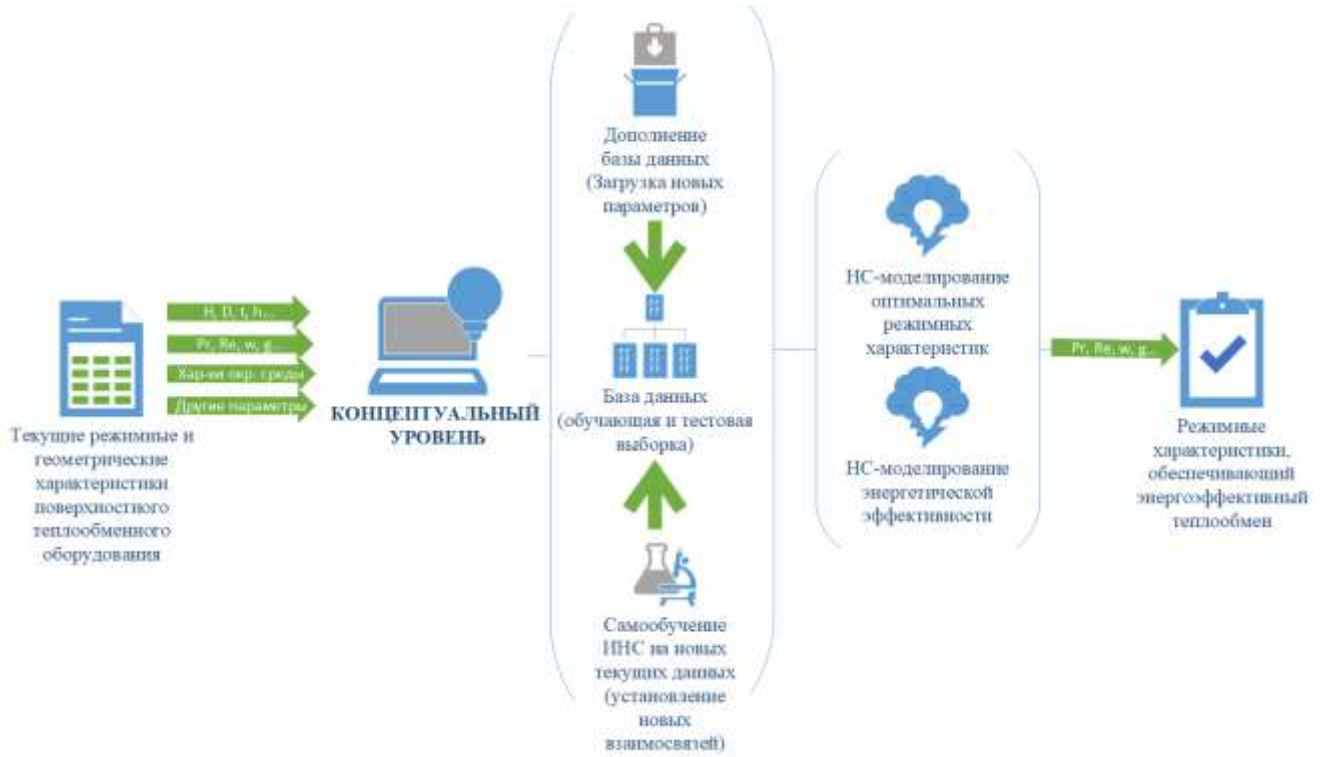
Учитывая архитектуру многоуровневого интеллектуального управления, определим функциональное назначение каждого уровня для реализации предлагаемого метода интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования:

- Концептуальный уровень - хранение, использование и формирование новых знаний о характерных логических взаимосвязях между параметрами геометрических и режимных характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена, обеспечивающих теплогидравлическую эффективность. Данный уровень реализуется на основе методов и

алгоритмов, предложенных во второй главе данной диссертационной работы. Таким образом, концептуальный уровень предлагаемого метода интенсификации теплообмена представляет собой искусственную нейронную сеть, обученную по результатам экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена сферическими, цилиндрическими, V-образными, эллиптическими и подковообразными выемками, полусферическими, кольцевыми и спиральными выступами;

- Информационный уровень – формируется информационная модель поверхностной интенсификации теплообмена на основе текущих значений геометрических и режимных характеристик поверхностных интенсификаторов. Реализация данного уровня возможна благодаря комплексу прикладных программ, этапы функционирования которых подробно описаны в третьей главе данной диссертационной работы;
- Операционный уровень – формируется управленческое воздействие на основе разработанной информационной модели поверхностной интенсификации теплообмена с оптимальными характеристиками. Управленческое воздействие заключается в изменении режима работы теплообменного оборудования или в изменении физических свойств теплоносителя (изменение температуры и расходов нагреваемой и греющей среды).

Схема функционирования предлагаемого метода интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования представлена на рисунке 4.4.



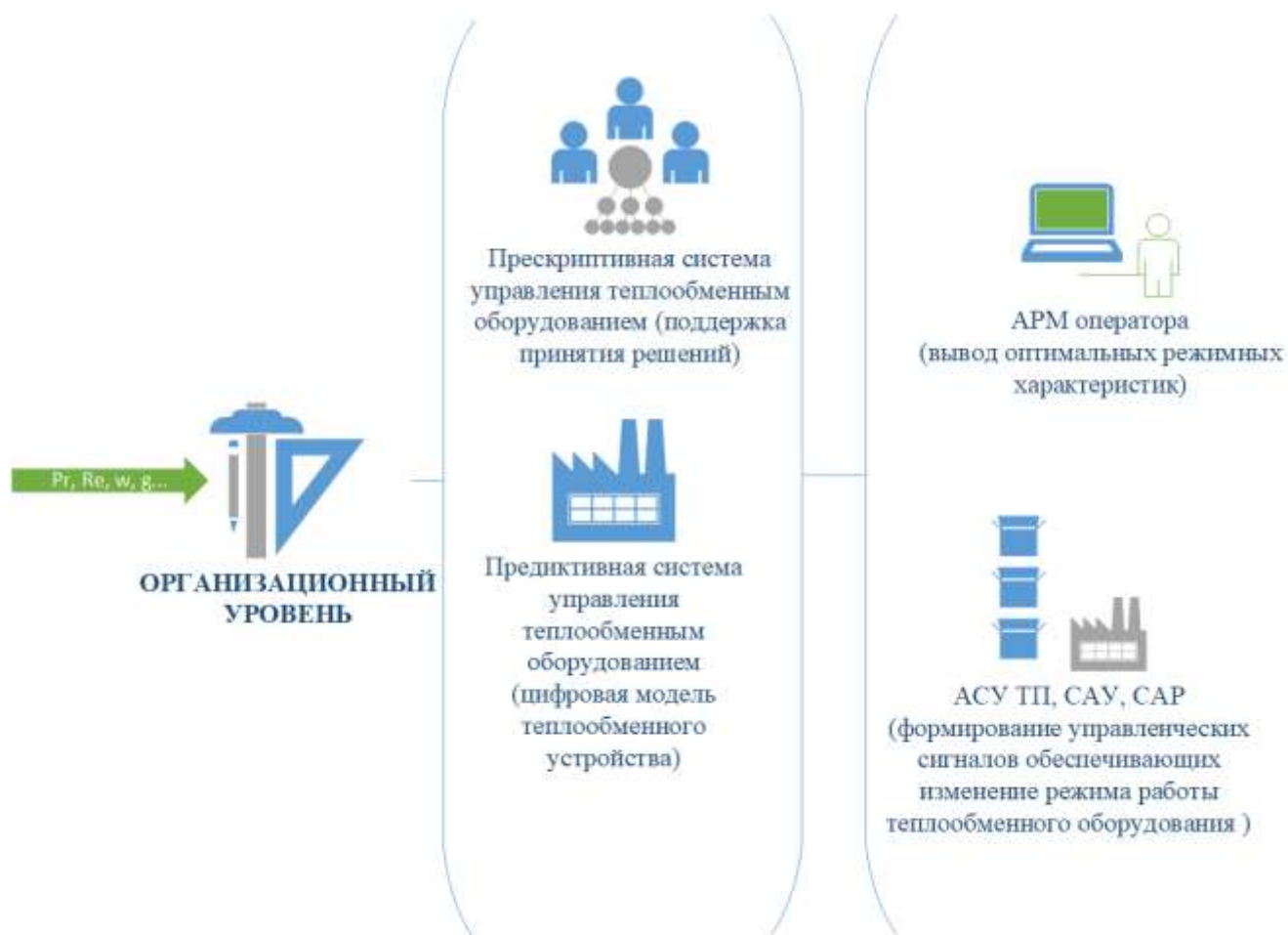


Рисунок 4.4 – Способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования

Таким образом, разработан способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования. Предложенный способ интенсификации теплообмена оперирует только с режимными характеристиками теплообменного оборудования, обеспечивая энергоэффективный теплообмен с минимальными затратами на реализацию способа, т.к. не требуется замена теплообменной поверхности или изменение геометрических характеристик теплообменного оборудования. Это позволяет повысить энергоэффективность эксплуатируемых теплообменников независимо от срока их эксплуатации, что для многих отраслей отечественной промышленности является ключевым фактором при выборе способа интенсификации. Необходимо отметить, что разработанный способ интенсификации позволяет реализовать как прескриптивный способ управления,

так и предиктивный. Прескриптивный способ позволяет реализовать систему поддержки принятия решения, путем вывода на АРМ оператора рекомендаций по изменению режима работы теплообменного оборудования для обеспечения максимальной энергоэффективности теплообменного процесса. Данный подход позволяет реализовать способ для теплообменных устройств, эксплуатируемых без системы автоматического управления. Предиктивный способ управления позволяет прогнозировать режимные характеристики теплообменных устройств, апробировать множество различных режимов работы оборудования (с помощью цифровой модели теплообменника), что позволяет выбрать наилучший режим, исключая воздействие на основной технологический процесс. Важной особенностью метода, которая отличает его от других систем регулирования, является то, что предлагаемый метод позволяет не только поддерживать регулируемые параметры теплообменника на заданном уровне, но и адаптировать управляющие воздействия при изменении во времени режимных параметров теплообменного оборудования. В зависимости от изменений параметров объекта управления, меняется управляющее воздействие. Это изменение происходит в тех случаях, когда качество регулирования становится неудовлетворительным вследствие изменения свойств объекта управления, или в результате воздействия на объект управления возмущений. Это позволяет обеспечить необходимый запас устойчивости системы и повысить качество переходных процессов. Необходимо отметить, что предложенный способ не требует реализации отдельной системы автоматического регулирования. Способ представляет собой модуль, который интегрируется в существующую систему регулирования теплообменного оборудования. В системах регулирования, где проектом не предусмотрено автоматическое управляющее воздействие на режимы работы теплообменного оборудования, способ реализуется в качестве системы поддержки принятия решений (СППР). Это позволяет рекомендовать наиболее оптимальный режим работы теплообменного оборудования. Далее рассмотрим практическую реализацию предложенного способа на интенсификации теплообменного устройства охлаждения компримированного природного газа.

4.6. Интенсификация теплообменного устройства охлаждения природного газа

Аппарат воздушного охлаждения (далее - АВО) – это система теплообменного устройства, предназначенная для охлаждения жидкостей и газа (рисунок 4.5) [167].

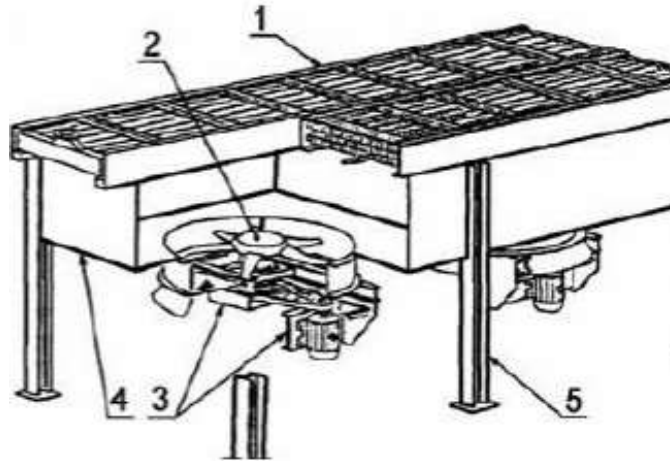


Рисунок 4.5 – Конструкция АВО газа: 1 – теплообменная секция; 2 – вентилятор; 3 – электропривод вентилятора; 4 - диффузор [167]

Для охлаждения природного газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов используется АВО газа. При компримировании природного газа его температура увеличивается, что приводит к риску разрушения изоляции трубопровода, а также требует значительного увеличения мощности на его транспортировку. Охлаждение природного газа после компримирования на компрессорной станции позволяет увеличить пропускную способность магистрального газопровода и существенно повысить его надежность. Кроме того, в мерзлых грунтах, требуется охлаждать природный газ до отрицательных значений температуры. Увеличение температуры стенок трубопровода приводит к оттаиванию грунта, что приводит к риску смещения расположения трубопровода.

Принцип работы АВО газа заключается в следующем: на опорных металлоконструкциях закреплены трубчатые теплообменные секции. Газ движется по трубам теплообменных секций, в межтрубное пространство электродвигателями начинает нагнетаться воздух. В результате происходит теплообмен между газом,

движущимся по трубам и наружным воздухом в межтрубном пространстве. Таким образом, происходит охлаждение газа на КС.

При оптимизации режимов работы аппарата воздушного охлаждения должны соблюдаться условия минимальных суммарных энергозатрат на охлаждение и сжатие газа на данном участке работы газопровода.

АВО газа представляет собой распределенный теплообменник. Передача тепловой энергии происходит следующим образом: компримированный природный газ после компрессорной станции подается на вход АВО газа, где распределяется по теплообменным секциям, с определенными значениями массового расхода g_0 и температуры газа t_0 . Теплообменные секции представляют множеством трубчатых теплообменных поверхностей с интенсификаторами в виде кольцевых выступов (рисунок 4.6).



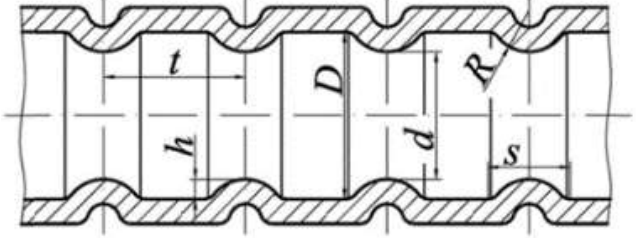
Рисунок 4.6 – Трубчатые теплообменные поверхности АВО газа

Компримированный природный газ, поступая на теплообменные секции АВО, передает наружному воздуху тепловую энергию Q , в результате чего температура природного газа понижается относительно значения температуры входного газа t_0 . При этом температура охлаждающего воздуха повышается относительно температуры воздуха окружающей среды. Далее нагретый воздух принудительно продувается через теплообменные секции с помощью электроприводных вентиляторов, которые характеризуются частотой вращения вентиляторов, углом наклона лопастей вентиляторов.

Основные факторы, влияющие на температуру природного газа на выходе теплообменного устройства (АВО газа) представлены в таблице 4.3

Таблица 4.3

Оптимальные относительные параметры режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена для пластинчатых теплообменных поверхностей

№	Фактор	Характеристика
1.	D – внутренний диаметр теплообменной трубы h – высота кольцевых выступов, d – диаметр отверстия диафрагм t – расстояние между кольцевыми выступами s – ширина кольцевых выступов R – радиус закругления кольцевых выступов	<p>Н - геометрические характеристики теплообменной поверхности (кольцевые выступы [1])</p> 
2.	R - термическое сопротивление	Степень загрязнения теплообменной поверхности
3.	g_0 - массовый расход природного газа	Степень компримирования газа на компрессорной станции
4.	k - режим транспорта природного газа	Количество работающих газоперекачивающих агрегатов
5.	t_b - температура охлаждающего воздуха	Температура окружающей среды
6.	g_l – массовый расход	Степень загрузки электроприводных вентиляторов

	охлаждающего воздуха	
7.	w_k - частота вращения вентилятора АВО	n - производительность электроприводных вентиляторов
	α_k – угол наклона лопастей вентилятора	

Зависимость температуры газа на выходе из теплообменного устройства можно представить в следующем виде:

$$t_1 = f(N, t_0, t_e, g_0, k, R, g_1, n) \quad (4.5)$$

где t_1 – температура на выходе АВО газа; N – геометрические характеристики поверхностного интенсификатора (кольцевые выступы); t_0 – температура на входе АВО газа (на выходе компрессорной станции); t_e – температура охлаждающего воздуха; g_0 – массовый расход природного газа на входе АВО газа; R – термическое сопротивление; g_1 – массовый расход охлаждающего воздуха; n – производительность электроприводных вентиляторов.

Таким образом, к основным причинам нестабильного поддержания оптимального значения температуры природного газа на выходе АВО можно отнести следующее:

- нестабильность температуры охлаждающего воздуха t_1 ;
- тепловая инерция АВО (2-4 часа по данным исследования [170]);
- термическое сопротивление теплообменных труб R и различными значениями коэффициентов теплопередачи АВО. Данные показатели зависят от степени и равномерности загрязнения теплообменных труб, которые не поддаются расчету [168].

Для поддержания оптимального режима транспорта природного газа, обеспечения условий безопасности и энергоэффективности данного технологического процесса на компрессорной станции, а также предотвращения гидратообразований на линейной части магистральных трубопроводах, температура природного газа после теплообменного устройства должна

соответствовать требованиям технологического регламента. Изменение параметров, описанных в таблице 4.3 с различной скоростью, приводит к отклонению значения температуры на выходе АВО от заданных регламентом. Так, изменение термического сопротивления в результате загрязнения теплообменной поверхности характеризуется меньшей частотой, чем изменение имеют температуры охлаждающего воздуха, обусловленное температурой окружающей среды.

Способ управления АВО газа, заключается в ручном или дистанционном включении-отключении вентиляторов, число которых определяется оператором исходя из его профессионального опыта. На рисунке 4.7

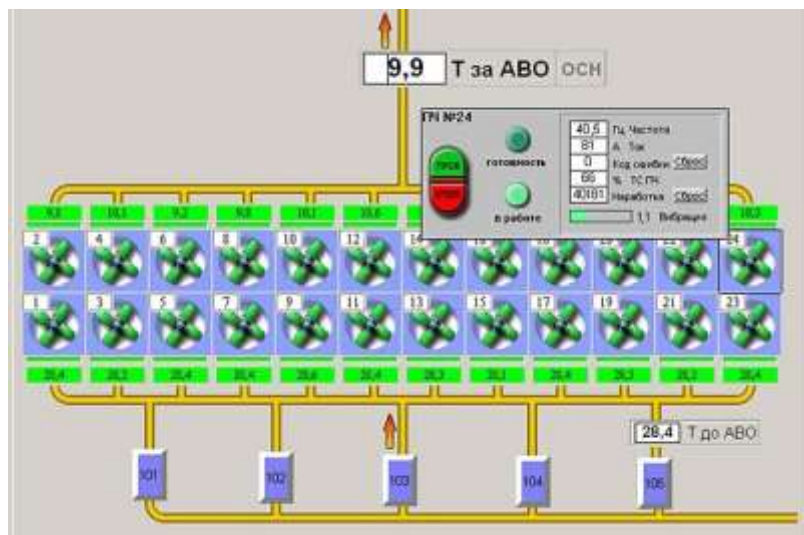


Рисунок 4.7 – САУ АВО

Автоматическое регулирование температуры природного газа на выходе АВО заключается во включении или отключении электроприводных вентиляторов, в результате чего нестабильность термодинамических процессов приводит к стресс-коррозионным дефектам, разрушающим трубопровод [167]. Частотно-регулируемые электроприводы позволяют решить данную проблему, обеспечивая плавное переключение между режимами, что предотвращает колебания температуры природного газа в магистральном газопроводе.

Также необходимо отметить, что для обеспечения наиболее эффективного режима магистрального транспорта газа используются статистические методы на

основе диспетчерских тепловых расчетов, позволяющие регулировать температуру газа на выходе АВО [168]:

$$t_1 = t_k + \frac{q_L}{Q \cdot \rho \cdot C_p}, \quad (4.6)$$

где ρ и C_p – плотность и изобарная теплоемкость газа; q_L – тепловой поток магистрального газопровода; Q – производительность газопровода; t_k – температура газа в конце газопровода.

При расчете значения температуры на выходе АВО газа используются текущие данные, поступающие в диспетчерскую службу. Поток тепла q_L , теряемого магистральным газопроводом, определяется по уравнению множественной регрессии [168,169]:

$$q_L = a + b_1 \cdot Q + b_2 \cdot (t_n - t_k) + b_3 \cdot (t_{mp} - t_e) + b_4 \cdot m + b_5 \cdot (P_n - P_k), \quad (4.7)$$

где t_n и t_{mp} – температура газа в начале газопровода и среднее значение; t_e – температура грунта на глубине заложения оси трубопровода в ненарушенном тепловом состоянии; m – месяц года; P_n и P_k – давление в начале и в конце газопровода.

Для обеспечения энергоэффективного процесса охлаждения природного газа на выходе компрессорной станции необходимо учитывать множество различных факторов, постоянно изменяющихся во времени. Большинство из них зависят от случайных внешних воздействий, кроме того значения данных факторов различны на каждом участке теплообменной поверхности. Разработанный способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования позволяет решить данную задачу с минимальными затратами. Концептуальный уровень предлагаемого способа позволяет сформировать нейросетевую модель трубчатой теплообменной поверхности АВО газа, что позволяет установить оптимальные режимные характеристики, обеспечивающие теплогидравлическую эффективность при охлаждении компримированного природного газа. В рассматриваемом типе АВО газа используются трубчатые теплообменные поверхности с

интенсификаторами в виде кольцевых выступов (рисунок 1.14, рисунок 4.6). Обучение исходной ИНС произведено на базе экспериментальных исследований в области поверхностной интенсификации теплообмена кольцевыми выступами [1, 57, 58, 67, 72, 75, 76, 133], что позволяет обобщить результаты данных исследований и установить характерные логические взаимосвязи между режимными и геометрическими характеристиками для данного типа интенсификатора. Реализация самообучения ИНС учитывает новые значения режимных характеристик и влияние внешних факторов на энергоэффективность теплообмена в процессе эксплуатации АВО, что позволяет постоянно улучшать данный способ интенсификации. Необходимо отметить, что обучение ИНС произведено для трубчатых и пластинчатых теплообменных поверхностей с интенсификаторами в виде сферических, цилиндрических, V-образных, эллиптических и подковообразных выемок, а также полусферических, кольцевых и спиральных выступов. Это позволяет применить данный способ интенсификации теплообмена для других модификаций АВО газа с различными теплообменными поверхностями.

Структурная схема модифицированной системы автоматического управления АВО газа, реализующая предложенный способ интенсификации, представлена на рисунке 4.8.

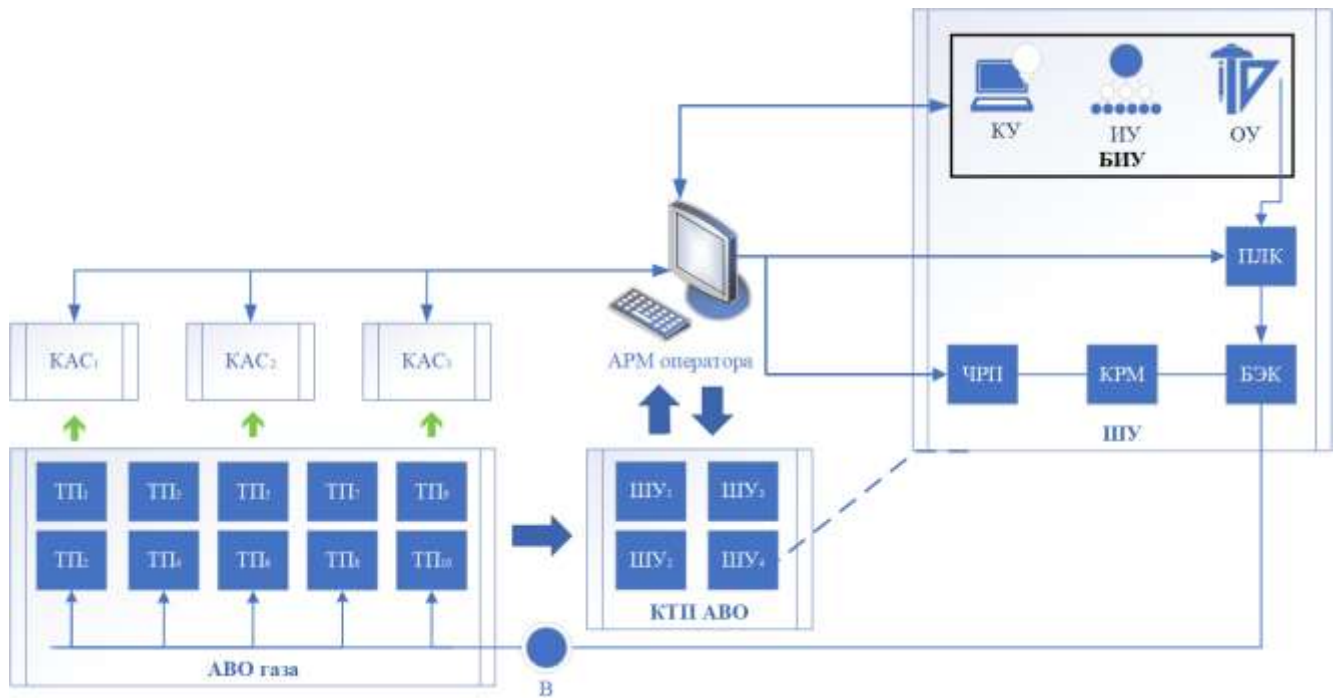


Рисунок 4.8 – Структурная схема САУ АВО при реализации способа интенсификации теплообмена

На рисунке 4.8: АРМ оператора – автоматизированное рабочее место оператора; АВО газа – аппарат воздушного охлаждения газа; КТП АВО газа – комплектная трансформаторная подстанция; КАС – концентраторы аналоговых сигналов; ШУ – шкаф управления; ТП – теплообменная поверхность; ЧРП – частотно – регулируемый привод; КРМ – компенсаторы реактивной мощности; БЭК – блок электромагнитных контакторов; ПЛК – программируемый логический контроллер; В – электроприводный вентилятор; БИУ – блок интеллектуального управления; КУ – концептуальный уровень; ИУ – информационный уровень; ОУ – организационный уровень.

Новым в предложенной структурной схеме САУ АВО является то, что в существующую САУ АВО внедряется блок интеллектуального управления, в котором реализован разработанный способ интенсификации теплообмена.

Схема реализации прескриптивной системы управления АВО газа на базе предложенного способа интенсификации теплообмена представлена на рисунке 4.9.

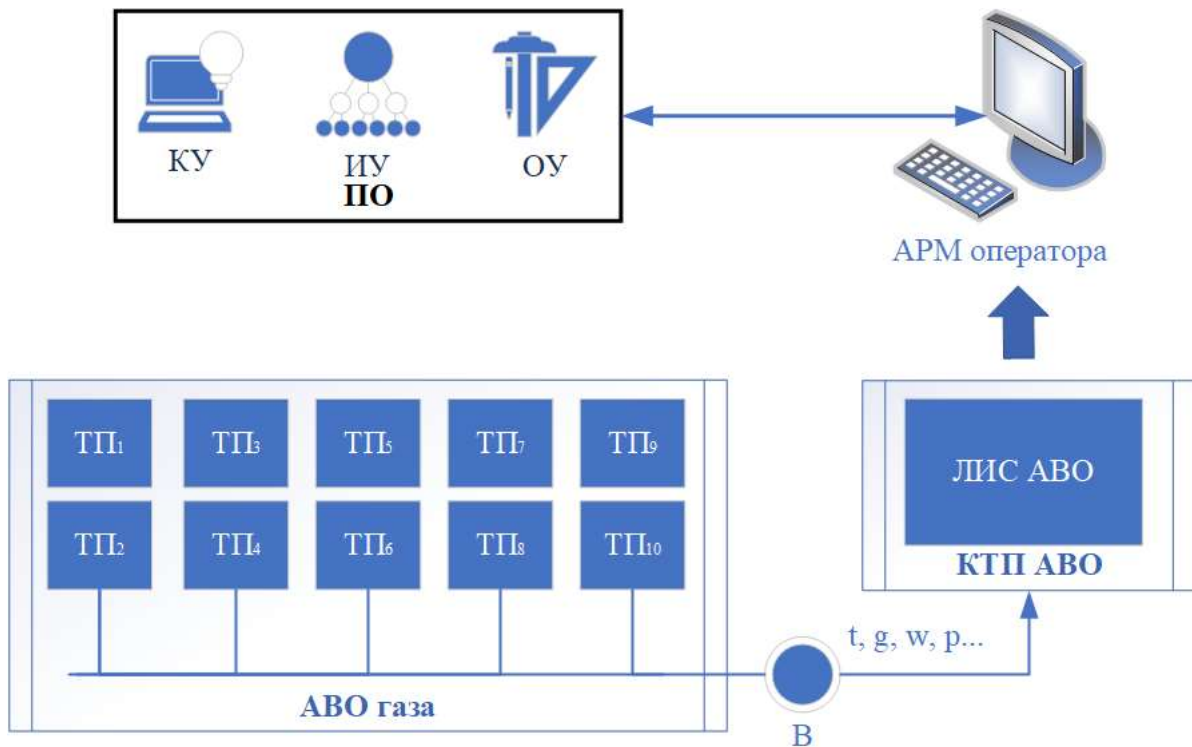


Рисунок 4.9 – Структурная схема предскриптивной системы управления АВО при реализации способа интенсификации теплообмена

На рисунке 4.9: АРМ оператора – автоматизированное рабочее место оператора; АВО газа – аппарат воздушного охлаждения газа; КТП АВО газа – комплектная трансформаторная подстанция; ТП – теплообменная поверхность; В – электроприводный вентилятор; ЛИС АВО – локальная интеллектуальная станция; ПО – программное обеспечение; КУ – концептуальный уровень; ИУ – информационный уровень; ОУ – организационный уровень.

Данный вариант реализации способа позволяет интенсифицировать теплообменное оборудование, эксплуатируемое на базе АСУ (без САУ). Новым в данном варианте реализации способа является то, что в существующее программное обеспечение внедряется модуль интеллектуального управления, реализующий предложенный способ в форме рекомендаций оптимальных режимов эксплуатации АВО, выводимых на АРМ оператора, обеспечивающих энергоэффективный теплообмен.

Характеристики работы АВО газа с реализацией предложенного способа интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления

режимными характеристиками теплообменного оборудования представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4

Характеристики работы АВО газа (КС «Ординская», КЦ-2 «Уренгой – Центр-1»)

1 – не интенсифицированный АВО; 2 – интенсифицированный АВО.

t_0 (температура газа до АВО)		t_1 (температура газа после АВО)		t_b (температура охлажд. воздуха)	
1	2	1	2	1	2
49,5	49,2	37,7	32,4	22,4	21,7
51,2	50,9	38,2	32,7	21,3	21,8
47,9	47,1	37,8	31,6	20,1	19,8
44,3	44,7	31,1	27,2	13,4	13,1
46,5	46,3	32,1	24,9	14,4	14,7
46,6	46,1	38,3	32,2	22,3	22,1
38,3	37,9	26,7	21,4	2,9	3
37,4	37,7	25,9	21,1	3,1	2,9
36	36,3	24,9	20,2	-11,1	-11,7
37	36,8	22,2	20,1	-8,1	-7,8
35,8	36,1	23,1	20,4	-7,4	-7,1
41,7	42,1	30,1	22,1	7,9	8,2

Таким образом, по температурному режиму работы АВО газа видно, что изменение температуры охлаждающего воздуха приводит к значительным колебаниям температуры природного газа на выходе АВО. В условиях, когда температура окружающего воздуха может меняться в течение дня на 10-15 °С, а в летнее время и зимнее сильно отличаться - это значительно ухудшает качество регулирования. По фактическим результатам интенсификации АВО газа предложенным способом видно, что АВО газа обеспечивает стабильный теплообмен как в летнее время в условиях повышенной температуры окружающей среды, так и в зимнее при пониженной температуре охлаждающего воздуха. Если при повышенной температуре окружающего воздуха необходимо обеспечить максимальное охлаждение компримированного природного газа для повышения эффективности магистрального транспорта газа, то в зимнее время и в межсезонье необходимо снизить температуру выходного газа, при этом учитывая условия

гидратообразования в трубопроводах. Нейросетевое моделирование теплогидравлической эффективности и оптимальных характеристик теплообменного оборудования, применяемое в предложенном способе интенсификации, позволяет учитывать множество различных факторов, которые численно учесть невозможно (направление и изменение скорости ветра, свободную и вынужденную конвекцию в теплообменных поверхностях, изменение свойств природного газа, режима работы КС и др.). Самообучение ИНС позволяет своевременно обновлять характерные логические взаимосвязи и учитывать при определении оптимальных режимных характеристик обеспечивающих энергоэффективность АВО газа. Сравнение годовой потребляемой мощности АВО газа показывает, что реализация предложенного способа позволяет сократить потребление электроэнергии от 34 до 77 % в зависимости от режима работы КС и температуры окружающей среды. Интеллектуальное управление режимными характеристиками АВО газа, реализованное в предложенном способе интенсификации теплообмена, позволяет значительно минимизировать затраты при магистральном транспорте природного газа в результате снижения электропотребления АВО при охлаждении компримированного природного газа. Разработанный способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования обеспечивает стабильный теплообмен при охлаждении природного газа, а также позволяет снизить энергопотребление и удельные энергозатраты работы АВО газа.

4.7. Выводы по 4 главе

Разработанный метод исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена в виде сферических, цилиндрических, V-образных, эллиптических и подковообразных выемок, а также полусферических, кольцевых и спиральных выступов позволяет оценить энергоэффективность трубчатых и пластинчатых теплообменных поверхностей. Предложенный метод исследования основывается на обобщении результатов

экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена. Разработанный метод позволяет работать с параметрами за пределами диапазонов экспериментальных исследований. По результатам исследования разработанным методом установлено, что для пластинчатых теплообменных поверхностей при жидких и газообразных теплоносителях наиболее эффективны теплообменные поверхности с интенсификаторами в виде полусферических выступов. Для поверхностных теплообменных устройств с трубчатыми теплообменными поверхностями при жидком теплоносителе максимальная теплогидравлическая эффективность получена для полусферических выступов. При газообразных теплоносителях – кольцевые выступы. При этом установлено, что полусферические выступы значительно уменьшают критическое число Рейнольдса.

Полученные результаты исследования и установленные при нейросетевом моделировании поверхностной интенсификации теплообмена характерные логические взаимосвязи между геометрическими и режимными характеристиками поверхностных интенсификаторов, позволяют оценить влияние каждого геометрического и режимного параметра поверхностного интенсификатора на энергоэффективность теплообменного оборудования. Анализ установленных взаимосвязей положительно согласовывается с экспериментальными исследованиями в данном диапазоне режимных и геометрических характеристик.

Реализация полученных результатов диссертационной работы в форме прикладных программ и нейросетевой модели поверхностной интенсификации теплообмена трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств позволяет разработать новый способ интенсификации теплообмена, основанный на интеллектуальном управлении режимными характеристиками поверхностных теплообменных устройств. Новым в предложенном способе интенсификации теплообмена является то, что способ позволяет не только поддерживать регулируемые параметры теплообменника на заданном уровне, но и адаптировать управляющие воздействия при изменении во времени внешних возмущающих воздействий и режимных параметров теплообменного оборудования. В

зависимости от изменений параметров объекта управления, меняется управляющее воздействие. Это изменение происходит в тех случаях, когда качество регулирования становится неудовлетворительным вследствие изменения свойств объекта управления, или в результате воздействия на объект управления возмущений. Это позволяет обеспечить необходимый запас устойчивости системы и повысить качество переходных процессов. Предложенный способ интенсификации теплообмена оперирует только с режимными характеристиками теплообменного оборудования, обеспечивая энергоэффективный теплообмен с минимальными затратами на реализацию способа, т.к. не требуется замена теплообменной поверхности или изменение геометрических характеристик теплообменного оборудования. Это позволяет повысить энергоэффективность эксплуатируемых теплообменников независимо от срока их эксплуатации, что для многих отраслей отечественной промышленности является ключевым фактором при выборе способа интенсификации.

Эффективность разработанного способа подтверждена практической реализацией способа на примере интенсификации теплообмена при охлаждении компримированного природного газа на выходе компрессорной станции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанные методы и алгоритмы в данной диссертационной работе позволяют реализовать метод исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы, который позволяет работать с параметрами за пределами диапазонов экспериментальных исследований, а также способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного устройства.

1. По результатам анализа литературных источников в области поверхностной интенсификации теплообменного оборудования выполнена фазификация объекта исследования. Определены геометрические и теплофизические факторы пассивной поверхностной интенсификации теплообмена, действующие на тепловые и гидромеханические характеристики теплообменных устройств. Для трубчатых теплообменных поверхностей с интенсификаторами в виде кольцевых и полусферических выступов, а также спиральных проволочных вставок - d/D , t/D , t/h , h/D , h/s , s/D , Re , Pr . Для пластинчатых теплообменных поверхностей со сферическими, капельными, V -образными, эллиптическими, подковообразными и цилиндрическими выемками - h/d , t/d , s/d , H/d , h/H , Re , Pr .

2. Разработана методика сбора и подготовки исходных данных к анализу. Сформирована обширная база данных, включающая 3500 значений параметров поверхностных интенсификаторов трубчатых и пластинчатых теплообменных поверхностей с учетом конкретных теплофизических и гидромеханических условий экспериментальных исследований.

3. Разработана методика обобщения результатов экспериментальных исследований пассивной интенсификации поверхностных теплообменных устройств, который позволяет значительно расширить рабочий диапазон

геометрических и теплофизических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена. Методика основана на анализе изменений установленных взаимосвязей между характеристиками поверхностных интенсификаторов теплообмена трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств.

4. Реализован алгоритм обучения и формирования ИНС пассивной интенсификации теплообмена для исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы. Разработанная ИНС позволяет сформировать характерные взаимосвязи между всеми тепловыми и гидромеханическими параметрами поверхностных интенсификаторов теплообмена.

5. Разработан комплекс прикладных программ (далее – ПП), позволяющих реализовать предложенный метод исследования. ПП позволяют получить прогнозные значения тепловой, гидравлической или теплогидравлической эффективности, значения параметров режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена, а также их оптимальные значения для исследованных в диссертационной работе типов поверхностных интенсификаторов теплообмена. ПП могут использоваться при проектировании и модернизации теплообменных устройств, с целью повышения энергоэффективности. Предложенный комплекс программ позволяет получить оптимальные характеристики по заданным пользователем параметрам.

6. Выполнен анализ согласования полученных результатов в диапазоне параметров экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена. Результаты исследования положительно согласовываются с результатами экспериментальных исследований в установленных диапазонах режимных и геометрических характеристик. Это позволяет сделать вывод, что результаты НС-моделирования для геометрических и режимных характеристик вне диапазона проведенных экспериментальных исследований с достаточно высокой

точностью характеризуют эффективность пассивной поверхностной интенсификации теплообмена.

7. Разработанный способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования применяется при охлаждении компримированного природного газа на выходе компрессорной станции с помощью АВО газа. Установлено, что реализация предложенного способа позволяет сократить потребление электроэнергии АВО от 34 до 77 %.

8. Предложена компьютерная модель оптимальных поверхностей в целом и геометрических характеристик для каждого типа поверхностных интенсификаторов теплообменных поверхностей трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств. Сравнение полученных оптимальных характеристик с результатами экспериментальных исследований различных авторов показало удовлетворительное согласование. Получены оптимальные характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена за пределами теплофизических и гидромеханических условий экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щелчков А.В. Физическое и численное моделирование интенсификации теплообмена поверхностными генераторами вихрей в трактах систем охлаждения // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Казань, КНИТУ – КАИ им. А.Н. Туполева, 2017. 306 с.
2. Рейнольдс А.Дж. Турбулентные течения в инженерных приложениях М.: Энергия, 1979. – 408 с.
3. Мигай В.К. Моделирование теплообмена энергетического оборудования. Л.: Энергоатомиздат, 1981, – 263 с.
4. Калинин, Э. К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1990. – 208
5. Кикнадзе Г.И., Краснов Ю.К., Подьмако Н.Ф., и др. Самоорганизация вихревых структур при обтекании водой полусферической лунки // Докл. АН СССР. 1986. – Т.291, N6. – с. 1315 – 1318
6. Гачечиладзе И.А., Кикнадзе Г.И., Краснов Ю.К. и др. Теплообмен при самоорганизации смерчеобразных структур // Минский международный форум. Проблемные доклады, секция 1 – 2. 1988. – с.83 – 125.
7. Федоров И.Г., Щукин В.К., Мухачев Г.А., Идиатуллин Н.С. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление щелевых каналов со сферическими выштамповками // Изв.Вузов.Авиационная техника. 1961.N4.с. 120 – 127.
8. Афанасьев В.Н. Теплообмен и трение на поверхностях, профилированных сферическими углублениями [Текст] / Афанасьев В.Н., Леонтьев А.И., Чудновский Я.П. // МГТУ им.Н.Э.Баумана: Препринт №1 – 90. – М.: Изд – во МГТУ, 1990. – 118 с.
9. Chyu M.K. Soechting F.O. Concavity enhanced heat transfer in an internal cooling passage [Electronic resource] / Chyu M.K., Yu Y., Ding H., Downs J.P. // Proc. of ASME Paper №97 – GT – 437. ASME 42nd International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Orlando, USA, – 1997. 7p. 1 эл. опт. диск (CD – ROM).

10. Терехов, В.И. Экспериментальное исследование развития течения в канале с полусферической каверной [Текст] / В.И. Терехов, С.В. Калинина, Ю.М. Мшвидобадзе // Сибир. физ. – техн. Журн. 1992. №. 1. С.77 – 86.
11. Щукин, А.В. Интенсификация теплообмена сферическими выемками. Обзор. [Текст] / А.В. Щукин, А.П. Козлов, Я.П. Чудновский, Р.С. Агачев // Изв. АН: Энергетика. – 1998. – №3. – С.47 – 64.
12. Гортышов, Ю.Ф. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Интенсификация теплообмена: монография [Текст] / Ю.Ф. Гортышов, И.А. Попов, В.В. Олимпиаев, А.В. Щелчков, С.И. Каськов; под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 531 с.
13. Ligrani P. M. Comparison of heat transfer augmentation techniques [Текст] / Ligrani P. M., Oliveira M. M., and Blaskovich T. // AIAA Journal. – 2003. – Vol.41 (3). – Pp. 337 – 362.
14. Хабибуллин И.И. Интенсификация теплообмена двухполостными диффузорными выемками [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / Хабибуллин Ильмир Ильдарович – Казань: 2016. – 124 с.
15. Кесарев В.С., Козлов А.П. Структура течения и теплообмен при обтекании полусферического углубления турбулизированным потоком воздуха // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. 1993. №1. С106 – 115.
16. Федоров, И.Г., Теплоотдача и гидравлическое сопротивление каналов со сферическими выштамповками [Текст] / И.Г. Федоров, В.К. Щукин, Г.А. Мухачев, Н.С. Идиатуллин // Известия ВУЗов: Авиационная техника. – 1961. – № 4. – С. 120 – 127.
17. Terekhov V.I. Heat transfer coefficient and aerodynamic resistance on a surface with a single dimple [Текст] / Terekhov V.I., Kalinina S.V. and Mshvidobadze Yu.M. // Enhanced Heat Transfer. – 1997. – Vol. 4. Pp 131 – 145.
18. Кикнадзе, Г.И. Самоорганизация смерчеобразных вихревых структур в потоках газов и жидкостей и интенсификация тепло – и массообмена [Текст] / Г.И.

Кикнадзе, В.Г. Олейников // Ин – т теплофизики СО АН СССР: Препринт №227. – Новосибирск, 1990. – 45 с.

19. Presser, K.H. Empirische Gleichungen zur Berechnung der Stoff – und Wärmeübertragung für den Spezialfall Der abgerissenen Strömung [Text] / K. H. Presser // Int. J. Heat .Mass Transfer. – 1972. – Vol. 15. – Pp. 2447 – 2471.

20. Griffith T.S., Al – Hadhrami L, and Han, J.C. Heat Transfer in Rotating Rectangular Cooling Channels (AR = 4) with Dimples // Journal of Turbomachinery, Vol. 125, 2003. Pp. 555 – 564.

21. Mahmood G.I., Hill M.L., Nelson D.L., Ligrani P.L., Moon H. – K., Glezer B. Local heat and flow structure on and above a dimpled surface in a channel. Journal of Turbomachinery 2001. Vol. 123. P.115 – 123.

22. Кесарев В.С. Структура течения и теплообмен при обтекании полусферического углубления турбулизированным потоком воздуха [Текст] / Кесарев В.С., Козлов А.П. // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. – 1993. – № 1. С.106 – 115.

23. Кесарев В.С. Конвективный теплообмен в полусферическом углублении при обтекании турбулизированным потоком [Текст] / Кесарев В.С., Козлов А.П. // Современные проблемы гидродинамики и тепломассообмена и пути повышения эффективности энергетических установок: тезисы докл. IX школы – семинара молод. ученых и специалистов / Под ред. А.И. Леонтьева. М.: Изд – во МГТУ. – 1993. С.12 – 13.

24. Нагога Г.П. Гидравлическое сопротивление в плоских каналах со сферическими углублениями [Текст / Нагога Г.П., Рукин М.В., Ануров Ю.М.] // Охлаждаемые газовые турбины двигателей летательных аппаратов: Межвуз. сб. Казань: Казан. авиац. Ин – т. – 1990. – С.40 – 44.

25. Нагога Г.П. Эффективные способы охлаждения лопаток высокотемпературных газовых турбин [Текст] / Нагога Г.П. – М.: Изд – во МАИ. – 1996. – 100 с.

26. Афанасьев В.Н, Чудновский Я.П. Самогенерация вихрей как метод интенсификации теплообмена // Теплообмен — ММФ: Минский международный форум. Минск. 1988. Ч. 1. С. 8 – 9.

27. Почуев В.П., Луценко Ю.Н., Мухин А.А. Теплообмен в охлаждаемых лопатках высокотемпературных газовых турбин // Труды Перв. Рос. Нац. Конф. по теплообмену. М.: Изд – во МЭИ; 1994. Т.8. – С.178—183.

28. Баяев С.В. Судовые компактные теплообменники. Л.: Судостроение. 1965. – 324с.

29. Беленький, М.Я. Интенсификация теплообмена при использовании поверхностей, формованных сферическими лунками [Текст] / М.Я. Беленький, М.А. Готовский, Б.М. Леках, Б.С. Фокин, К.С. Долгушин // Минский международный форум ММФ – 92: Теплообмен. – Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова. – 1992. – Т. 1, ч. 1. – С. 90 – 93.

30. Кикнадзе Г.И., Гачечиладзе И.А., Алексеев В.В. Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках вязких сплошных сред и интенсификация теплообмена, сопровождающая это явление. – М.: Издательство МЭИ, 2005. 84с.

31. Leontiev A.I., Kaskov S.I., Gortyshov Yu.F., Schelchkov A.V., Popov I.A., Olimpiev V.V. Hydrodynamics and heat transfer in heat exchanger channels with spherical holes // American Society of Mechanical Engineers, Heat Transfer Division, (Publication) HTD 2006 ASME International Mechanical Engineers Congress and Exposition, IMECE2006. Сер. “Proceedings of 2006 ASME International Mechanical Engineers Congress and Exposition, IMECE2006 – Heat Transfer”Chicago, IL,2006

32. Александров А.А. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление при обтекании поверхностей с развитой шероховатостью в виде сферических углублений [Текст] / Александров А.А., Горелов Г.М., Данильченко В.П., Резник В.Е. // Пром. теплотехника. – 1989. Т.11. №6. – С.57 – 61.

33. Почуев В.П. Теплообмен в охлаждаемых лопатках высокотемпературных газовых турбин [Текст] / Почуев В.П., Луценко Ю.Н.,

Мухин А.А. // Труды Перв. Рос. Нац. Конф. по теплообмену. М.: Изд – во МЭИ. – 1994. Т.8. С.178 – 183.

34. Туркин А.В. Экспериментальное исследование влияния переменности физических свойств газа на теплоотдачу поверхности покрытой лунками [Текст] / Туркин А.В., Сорокин А.Г., Брагина О.Н. Яковлева Н.Н, Алешина И.Б. // Труды Перв. Рос. Нац. Конф. по теплообмену. М.: Изд – во МЭИ. – 1994. Т.8. – С.202 – 206.

35. Туркин А.В. Экспериментальное исследование влияния переменности физических свойств газа на теплоотдачу поверхности покрытой лунками [Текст] / Туркин А.В., Сорокин А.Г., Брагина О.Н. Яковлева Н.Н, Алешина И.Б. // Минский международный форум ММФ – 92. Минск: ИТМО им.А.В.Лыкова. – 1992. Т.1. Ч.1. – С.18 – 21.

36. Sudarev A.V. Application of Three – Dimensional Relief for Heat Exchange Enhancement along Paths of Gas – to – Gas heat Exchangers for Small – Size GTU's [Текст] / Sudarev A.V. Sudurev R.V., Kondrat'ev V.V. // Proc. of 5th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows. Gdansk, Poland. – 2001. – Pp. 607 – 618.

37. Маскинская А.Ю. Повышение эффективности теплообменных аппаратов за счет интенсификации теплообмена на поверхности с лунками [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.14 / Маскинская, Анна Юрьевна. Москва: МЭИ. 2004. – 139 с.

38. Шрадер И.Л. Интенсифицированные трубчатые воздухоподогреватели [Текст] / Шрадер И.Л., Дашчян А.А., Готовский М.А. // Теплоэнергетика. – 1999. № 9. – С.54 – 56.

39. Мунябин, К.Л. Эффективность интенсификации теплообмена углублениями и выступами сферической формы [Текст] / К.Л. Мунябин // Теплофизика и аэромеханика. – 2003. – Т.10, №2. – С. 235 – 247.

40. Беленький, М.Я. Экспериментальное исследование тепловых и гидравлических характеристик теплообменных поверхностей, формованных

сферическими лунками [Текст] / М.Я. Беленький, М.А. Готовский, Б.М. Леках, Б.С.Фокин, В.Б.Хабенский // ТВТ. – 1991. – Т. 29, №. 6. – С. 1142 – 1147.

41. Готовский, М.А. Теплоотдача и сопротивление при течении в круглой трубе с интенсификацией регулярной системой сферических выемок и сферических выступов [Текст] / М.А. Готовский, М.Я. Беленький, Б.С. Фокин // Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Тезисы докладов 2 – ой Российской конф. – М.: Изд – во МЭИ, 2005. – С. 49 – 50.

42. Burgess N.K., Ligrani P.M. Effects of dimple depth on Nusselt numbers and friction factors for internal cooling in a channel [Текст]/ Burgess N.K., Ligrani P.M. // Proc. of Turbo Expo 2004: Power for land, sea and air. – Vienna, Austria. – 2004. Paper GT2004 – 54232.

43. Hwang, S.D. Heat transfer enhancement of internal passage using dimple/protrusion [Text] / S.D. Hwang, H.H. Cho // Annals of the Assembly for International Heat Transfer Conference 13. – Sydney, Australia, 2006. – HTE, №24. – Pp 10 – 17.

44. Moon, H.K. Heat Transfer Enhancement Using a Convex – Patterned Surface [Text] / H.K. Moon, T. O’Connell, R. Sharma // Proc. of ASME Turbo Expo 2002 (Amsterdam, The Netherlands, Jun. 3 – 6 2002). – Amsterdam, The Netherlands, 2002. – Pp. № GT – 2002 – 30476.

45. Zhou F. Studies on the heat/mass transfer characteristics and fluid structure in a square internal cooling channel with dimpled surfaces [Текст] / Zhou F. // A Thesis for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering. Louisiana State University. USA. – 2007. – 90 p.

46. Халатов, А.А. Тепломассообмен и теплогидравлическая эффективность вихревых и закрученных потоков [Текст] = Heat and mass transfer, thermal – hydraulic performance of vortex and swirling flows / А.А. Халатов, И.И. Борисов, С. В. Шевцов. – Киев: Институт технической теплофизики НАН Украины, 2005. – 500 с.

47. Шанин Ю.И. Интенсификация теплоотдачи нанесением сферических лунок на стенки каналов [Electronic resource] / Шанин Ю.И., Шанин О.И. Минск,

Беларусь.: Доклады V Минского Международного Форума по тепло – и массообмену (MIF – 5) – 2004. 1 эл. опт. диск (CD – ROM).

48. Bunker, R.S. Heat transfer and pressure loss for flows inside converging and diverging channels with surface convexity shape effects [Text] / R.S. Bunker, M. Gotovskii, M. Belen'kiy, B. Fokin. // Proc. of the 4th International Conference Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology (Sept.29 – Oct.3.2003, Crete Island, Greece) – Report No 2003GRC016.

49. Гортышов Ю.Ф. Гидродинамика и теплообмен в каналах с поверхностными интенсификаторами [Текст] / Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Амирханов Р.Д. // Материалы докладов 2 – го Международного симпозиума по энергетике, окружающей среде и экономике ЭЭЭ – 2. Т.1. – Казань: Изд – во КФМЭИ. – 1998. С.56 – 58.

50. Щелчков А.В. Теплогидравлическая эффективность интенсификации теплоотдачи в каналах со сфероидальными выемками [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / Щелчков Алексей Валентинович. – Казань: 2004. – 169 с.

51. Анисин А.А. Интенсификация теплообмена в каналах сложной формы поперечно обтекаемых трубчатых и пластинчатых поверхностей [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.05 / Анисин, Андрей Александрович. Брянск. 2000. 132 с.

52. Yu Rao1. Experimental and Numerical Study of Heat Transfer and Flow Friction in Channels With Dimples of Different Shapes [Текст] / Yu Rao1, Yan Feng, Bo Li, Bernhard Weigand // J. Heat Transfer. – 2015. Vol. 137. – Pp. 031901 – 10.

53. Бурцев С. А., Васильев В. К., Киселёв Н. А., Стронгин М. М. Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик поверхностей с коридорным расположением лунок [Текст] / Бурцев С. А., Васильев В. К., Киселёв Н. А., Стронгин М. М. // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2013. № 1. – С. 348 – 369.

54. Mahmood G.I. Heat transfer in a dimpled channel: combined influences of aspect ratio, temperature ratio, Reynolds number, and flow structure [Текст] / Mahmood G.I., Ligrani P.M. // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 2002. – Vol. 45. Pp.2011 – 2020.

55. Bergles, A.E. Performance evaluation criteria for enhanced heat transfer surfaces [Text] / A.E. Bergles, A.R. Blumenkrantz, J. Taborek // Heat Transfer. – 1974. – Vol. 2. – Pp. 239 – 243.
56. Дрейцер Г.А. Проблемы создания высокоэффективных трубчатых ТА [Текст] / Г.А. Дрейцер // Теплоэнергетика. – 2006. – №4. – С. 5 – 9.
57. Мигай, В.К. Повышение эффективности современных теплообменников [Текст] / В.К. Мигай. – Л.: Энергия. Ленингр. отд – ние, 1980. – 144 с.
58. Koch, R. Druckverlust und Wärmeübergang bei verwirbelter Strömung [Text] / R. Koch // VDI – Forschungsheft. – 1958. – № 469. – P. 44
59. Hwang, S.D. Heat transfer enhancement of internal passage using dimple/protrusion [Text] / S.D. Hwang, H.H. Cho // Annals of the Assembly for International Heat Transfer Conference 13. – Sydney, Australia, 2006. – HTE, №24. – Pp 10 – 17.
60. Миронов, О.Н. Теплообмен и трение в канале квадратного сечения с одной ребренной полукруглыми выступами стенкой [Текст] / О.Н. Миронов // Минский международный форум ММФ – 92: Тепломассообмен. – Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова. – 1992. – Т. 1, ч. 1. – С. 146 – 148.
61. Легкий, В.М. Исследование теплообмена и аэродинамического сопротивления пластинчатых теплообменных поверхностей с турбулизаторами в виде полусферических выступов [Текст] / В.М. Легкий, Ю.А. Бабенко, В.А. Дикий // Изв. ВУЗов: Энергетика. – 1977. – № 12. – С. 81 – 89. 288
62. Il'inkov, A.V. Heat Transfer on Hemispherical Protrusions at Their Different Arrangement Density on the Channel Wall [Text] / A.V. Il'inkov, V.G. Il'inkova, A.V. Shchukin // Russian Aeronautics. – 2011. – Vol. 54, № 2. – Pp. 179 – 184.
63. Chen, J. Heat transfer enhancement in dimpled tubes [Text] / J. Chen, H. Müller – Steinhagen, G.G. Duffy // Applied Thermal Engineering. – 2001. – Vol. 21. – Pp. 535 – 547.
64. Гортышов Ю.Ф. Теплогидравлические характеристики теплообменных аппаратов с поверхностной интенсификацией теплообмена в виде сферических

выемок и выступов // Третья международная конференция «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках». 21 – 23 октября 2008г. Москва

65. Леонтьев А.И., Олимпиев В.В., Анализ эффективности пристенных закручивателей потока (обзор), ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА, 2013, № 1, с. 68 – 78

66. Thome J.R. Engineering Data Book III. Web based book. Wolverine Tube, Inc., 2004.

67. Калинин, Э. К. Эффективные поверхности теплообмена [Текст] / Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, И.З. Копп [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 407 с.

68. Möbius, H. Experimentelle Untersuchung des Widerstandes und der Geschwindigkeitsverteilung in Rohren mit regelmäßig angeordneten Rauigkeiten bei turbulenter Strömung [Text] / H. Möbius // Physikal. Zeitschrift. – Leipzig: Physikalische Institut der Universität, 1940. – № 41. – Pp. 202 – 225.

69. Webb R.L. Generalized heat transfer and friction correlations for tubes with repeated – rib roughness [Text] / R.L. Webb, E.R.G. Eckert, R.J. Goldstein. // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – Vol. 15, Issue 1. – Pp. 180 – 184.

70. Щербаченко, И.К. Исследование интенсификации теплообмена в трубах с кольцевыми турбулизаторами плавной конфигурации [Текст] / И.К. Щербаченко // Труды XIV Школы – семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. – М.: Изд – во МЭИ, 2003. – Т.1. – С. 151 – 154.

71. Леонтьев, А.И. Эффективные интенсификаторы теплоотдачи для ламинарных (турбулентных) потоков в каналах энергоустановок [Текст] / А.И. Леонтьев, Ю.Ф. Гортышов, В.В. Олимпиев, И.А. Попов // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2005. – № 1. – С. 75 – 91.

72. Закиров, С.Г. Применение двухмерной шероховатости для увеличения теплоотдачи вязкой среды [Текст] / С.Г. Закиров, К.Ф. Каримов, Т. Саттаров // Тр. 2 – й Российской нац. конф. по теплообмену. – М.: Изд – во МЭИ, 1998. – Т.6. – С. 114 – 116.

73. Гортышов, Ю.Ф. Эффективность промышленно перспективных интенсификаторов теплоотдачи [Текст] / Ю.Ф. Гортышов, В.В. Олимпиев, И.А.

Попов // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2002. – № 3. – С. 102 – 110.

74. Ван – Дайк, М. Альбом течений жидкости и газа [Изоматериал] / М. Ван – Дайк; пер. с англ. Л.В. Соколовская; под ред. Г.И. Баренблатта, В.П. Шидловского – М.: Мир, 1986. – 184 с.

75. Nunner, W. Wärmeübergang und Druckabfall in rauchen Rohren [Text] / W. Nunner // VDI – Forschungscheft. – 1956. – № 455 – Pp. 5 – 39.

76. Олимпиев, В.В. Расчетное и опытное моделирование теплоотдачи и гидросопротивления дискретно шероховатых каналов теплообменного оборудования [Текст]: дис. ... д – ра техн. наук: 05.14.05 / Олимпиев Вадим Владимирович. – Казань, 1993. – 475 с. 12

77. Bunker, R.S. Heat transfer and pressure loss for flows inside converging and diverging channels with surface convexity shape effects [Text] / R.S. Bunker, M. Gotovskii, M. Belen'kiy, V. Fokin. // Proc. of the 4th International Conference Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology (Sept.29 – Oct.3.2003, Crete Island, Greece) – Report No 2003GRC016.

78. Авторское св – во №80063 СССР, Класс 17f 12/10, 17f 12/03. Поверхность теплообмена между теплоносителем и потребляющей средой с применением интенсификации нагрева или охлаждения [Текст] / Кубанский П.Н. (СССР). №351216; заявлено 20.01.1947. – С.3.

79. Lau, S.C. Effect of Dimple Geometry on Flow and Heat Transfer in a Square Channel with a Dimpled Wall [Text] / S.C. Lau, S.W. Moon // Journal of Energy, Heat and Mass Transfer. – 2001. – Vol. 23. – Pp. 393 – 416.

80. Chakroun, W. Heat transfer measurements for smooth and rough tilted semi – cylindrical cavities [Text] / W. Chakroun, M.M.A. Quadri // Int. J. Therm. Sci. – 2002. – Vol. 41, № 2. – Pp. 163 – 172.

81. Халатов, А.А. Тепломассообмен и теплогидравлическая эффективность вихревых и закрученных потоков [Текст] = Heat and mass transfer, thermal – hydraulic performance of vortex and swirling flows / А.А. Халатов, И.И.

Борисов, С. В. Шевцов. – Киев: Институт технической теплофизики НАН Украины, 2005. – 500 с.

82. Халатов А.А. Нестационарные явления в потоке около плоской поверхности с мелкими сферическими и цилиндрическими углублениями [Электронный ресурс] / А.А.Халатов // Вторая российская конференция «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках. Секция 1. Теплообмен и гидродинамика для поверхностей с луночным рельефом. Докл. № 3. – М., 2005 – 1 эл. опт. диск (CD – ROM №0320500321).

83. Ochoa, A.D. A new technique for dynamic heat transfer measurements and flow visualization using liquid crystal thermography [Text] / A.D. Ochoa, J.W. Vaughn, A.R. Byerley // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2005. – Vol.26. – Pp. 264 – 275.

84. Hering, T. Turbulent boundary layer flow over circular cavities [Text] / T. Hering, E. Savory, J. Dybenko // 25th International congress of the aeronautical sciences. – Hamburg, Germany, 3 – 8 September 2006. – ICAS 2006 – 2.7.2. – Pp. 1 – 16.

85. Hering, T. Experimental Verification of CFD Modeling of Turbulent Flow over Circular Cavities using FLUENT [Text] / T. Hering, E. Savory, J. Dybenko // CSME Forum. – Kananaskis, Canada, 21 – 24 May 2006.

86. Gaudet, L. Measurements of the drag of some characteristic aircraft excrescences immersed in turbulent boundary layers [Text] / L. Gaudet, K.G. Winter // R.A.E. Technical Memorandum Aero. – Vol. 1538 – 1973.

87. Халатов, А.А. Гидравлическое сопротивление системы многорядных углублений цилиндрической формы на плоской поверхности [Текст] / А.А. Халатов, В.Н. Онищенко // Восточно – Европейский журнал передовых технологий. – 2009 – Т.4, №5 (40). – С.34 – 36

88. Скрышник А.Н. Гидравлическое сопротивление и теплоотдача труб с внутренним спиральным оребрением при однофазном течении теплоносителя [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / Скрышник Артём Николаевич. – Казань: 2020. – 195 с.

89. Garc'ia, A. Flow pattern assessment in tubes with wire coil inserts in laminar and transition regimes / A. Garc'ia, J. P. Solano, P. G. Vicente, A. Viedma // *International journal of heat and fluid flow*. — 2007. — Vol. 28, no. 3. — Pp. 516 – 525.
90. Mayo, I. Aerothermal Investigation on the Flow and Heat Transfer in a Helically Corrugated Cooling Channel / I. Mayo, B. C. Cernat, M. Virgilio, T. Pappa, A. and Arts // *ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition / American Society of Mechanical Engineers Digital Collection*.
91. Леонтьев А.И., Олимпиев В.В. Потенциал энергосбережения различных способов закрутки потока и дискретно шероховатых каналов // *Изв. РАН. Энергетика*. 2010. № 1. С. 13 – 49.
92. Олимпиев В.В. Интенсификация теплообмена и потенциал энергосбережения в охладителях технических масел // *Теплоэнергетика*. 2010. № 8. С. 40 – 46.
93. Леонтьев А.И., Олимпиев В.В. Теплофизика и теплотехника перспективных интенсификаторов теплообмена // *Изв. РАН. Энергетика*. 2011. № 1. С. 7 – 31.
94. Gee D.L., Webb R.L. Forced convection heat transfer in helically ribroughened tubes // *Intern. J. Heat & Mass Transfer*. 1980. V. 23. P. 1127 – 1136.
95. Олимпиев В.В. Теплоотдача и гидросопротивление в трубе со спиральными выступами // *Изв. вузов. Авиационная техника*. 1992. № 2. С. 68 – 70.
96. Sethumadhavan R., Raja Rao M. Turbulent flow heat transfer and fluid friction in helical wire coil inserted tubes // *Intern. J. Heat & Mass Transfer*. 1983. V. 26. P. 1833 – 1845.
97. Скотт Уэбб. Параметрический анализ рабочих характеристик теплообменных труб с внутренним оребрением // *Теплопередача*. 1980. Т. 102. № 1. С. 40 – 48.
98. Webb R.L., Kim N.H. *Principles of enhanced heat transfer*. N. Y.: Taylor, 2005.
99. Zimparov V.D., Vulchanov N.L., Delov L.B. Heat transfer and frictional characteristics of spirally enhanced tubes for power plant condensers. 1. Experimental in

vestigation and performance evaluation // Intern. J. Heat & Mass Transfer. 1991. V. 34 (9). P. 2187 – 2197.

100. Экспериментальное исследование теплообмена при ламинарном течении в трубах с использованием проволочных спиральных вставок / Ю.Г. Назмеев, А.М. Конахин, Б.А. Кумиров, В.В. Олимпиев // Тезисы докл. юбилейной науч. конф. Казанского филиала МЭИ. Казань: Казан. филиал МЭИ, 1993.

101. Уттарвар, Р. Р. Интенсификация теплообмена при ламинарном течении в трубах с помощью проволочных спиральных вставок / Р. Р. Уттарвар // Тр. Американ. о – ва инж. – механиков. Сер. С. Теплопередача. — 1985. — № 4. — С. 160 – 164.

102. Carnavos, T. C. Cooling air in turbulent flow with internally finned tubes / T. C. Carnavos // Heat Transfer Engineering. — 1979. — Vol. 1, no. 2. — Pp. 41 – 46.

103. Carnavos, T. C. Heat transfer performance of internally finned tubes in turbulent flow / T. C. Carnavos // Heat Transfer Engineering. — 1980. — Vol. 1, no. 4. — Pp. 32 – 37.

104. Ravigururajan, T. S. Development and verification of general correlations for pressure drop and heat transfer in single – phase turbulent flow in enhanced tubes / T. S. Ravigururajan, A. E. Bergles // Experimental Thermal and Fluid Science. — 1996. — Vol. 13, no. 1. — Pp. 55 – 70.

105. Kalinin, E. K., The experimental study of the heat transfer intensification under conditions of forced one – and two – phase flow in channels / E. K. Kalinin, G. A. Dreitser, S. A. Yarkho, V. A. Kusminov // Augmentation of Convective Heat and Mass Transfer. — 1970. — Pp. 80 – 90.

106. Леонтьев, А. И. Разработка фундаментальных основ создания прототипов энергоэффективных теплообменников с поверхностной интенсификацией теплообмена / А. И. Леонтьев, Ю. Ф. Гортышов, В. В. Олимпиев и др. — 2006. — С. 253 – 257.

107. C. Neil Jordan, Ledley M. Wright. Heat transfer enhancement in a rectangular ($ar = 3:1$) channel with V – shaped dimples. Proceedings of ASME Turbo Expo 2011. GT2011, June 6 – 10, 2011, Vancouver, British Columbia, Canada, 12 p.

108. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Баранов П.А. Моделирование смерчевой интенсификации теплообмена при низкоскоростном движении воздуха в прямоугольном канале с лунками. Часть 1. Выбор и обоснование методов расчета. Теплоэнергетика. 2007. Т.54. №3. – С.22 – 28.

109. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Баранов П.А. Моделирование смерчевой интенсификации теплообмена при низкоскоростном движении воздуха в прямоугольном канале с лунками. Часть 2. Результаты параметрических исследований. Теплоэнергетика. 2007. Т.54. №8. – С.63 – 70.

110. Сергиевский Э.Д., Арбатский А.А. Интенсификация теплообмена путем нанесения овальных лунок на теплообменную поверхность // Труды пятой российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах (25 – 29 октября 2010 г., Москва). Т. 6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. С.141 – 144.

111. Г.А. Воропаев, А.В. Воскобойник, В.А. Воскобойник, С.А. Исаев, ISSN 1561 – 9087 Прикладная гидромеханика. 2009. Том 11, N4. С.31 – 46.

112. Терехов, В.И. Теплоотдача от сферической лунки, расположенной в следе другой лунки [Текст] / В.И. Терехов, С.В. Калинина, Ю.М. Мшвидобадзе // Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т. 8, № 2. С. 237 – 242.

113. Терехов, В.И. Экспериментальное исследование развития течения в канале с полусферической каверной [Текст] / В.И. Терехов, С.В. Калинина, Ю.М. Мшвидобадзе // Сибир. физ. – техн. журн. – 1992. №. 1. С.77 – 86.

114. Turnow J., Kornev N., Isaev S., Hassel E. Vortex mechanism of heat transfer enhancement in a channel with spherical and oval dimples // Heat and Mass Transfer/Waerme – und Stoffuebertagung. 2011. Vol.47. Issue 3. P.301 – 311.

115. Исаев С.А., Леонарди Э., Тимченко В., Усачов А.Е. Вихревая интенсификация теплообмена в микроканалах с овальными лунками // Третья международная конференция «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках». 21 – 23 октября 2008 г. Москва. – 2008. – С.1 – 10.

116. Цынаева А.А. Исследование течения в канале с подковообразными лунками [Текст] / Цынаева А.А., Разоренов С.Е. // Материалы докладов X Школы

– семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении». – Казань: КазНЦ РАН. – 2016. – С. 238 – 240.

117. Цынаева А.А., Разоренов С.Е. Исследование теплоотдачи пульсирующих течений в каналах с неглубокими лунками / Современные исследования. 2017.№2, С 21 – 25.

118. Каширина, И. Л. Нейросетевые технологии: учеб. – метод. пособие для вузов/И. Л. Каширина. – Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2008. – 72 с.

119. Паклин Н.Б., Орешков В.И. Бизнес – аналитика: от данных к знаниям. – СПб.: Питер, 2009. – 624 с.

120. Гирин Р.В, Орлов С.П. Двухстадийная нормализация выходных сигналов искусственных нейронных сетей / Вестник СГТУ сер. Технические науки, 2017 г. №4 (56).

121. Wang Y., Niu D., Ji L. Power load forecasting using data mining and knowledge discovery technology // International journal of intelligent information and database systems. – 2011. – vol. 5, no. 5. – pp. 452 – 467.

122. Гафаров, Ф. М. Искусственные нейронные сети и приложения; учеб. пособие / Ф. М. Гафаров, А. Ф. Галимянов. — Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. — 121 с.

123. Pea J.M., Vityaev E. Knowledge discovery in bioinformatics // Intelligent data analysis. – 2010. – vol. 14, no. 2. – pp. 157 – 158.

124. Городецкий В.И., Самойлов В.В., Малов А.О. Современное состояние технологии извлечения знаний из баз и хранилищ данных (часть 1) // Новости искусственного интеллекта. – 2002. – №3. – С. 3 – 12.

125. Городецкий В.И., Самойлов В.В., Малов А.О. Современное состояние технологии извлечения знаний из баз и хранилищ данных (часть 2) // Новости искусственного интеллекта. – 2002. – № 4. – С.3 9.

126. Михайлов А.С., Староверов Б.А. Проблемы и перспективы использования искусственных нейронных сетей для идентификации и диагностики

технических объектов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2013. – № 3. – С. 64 – 68.

127. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. – М. : Финансы и статистика, 2002. – 344 с.

128. Попов И.А., Щелчков А.В., Яркаев М.З. Теплогидравлические характеристики дискретно – шероховатых труб на переходных режимах течения // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2013. № 1, С. 61 – 65.

129. Kuwahara, H. Heat transfer tube for single-phase flow [Text]: Patent USA № 4690211. СІС В21С 37/20. 01.09.1987 / H. Kuwahara, K. Takahashi, T. Yanagida, W. Nakayama, S. Sugimoto, S. Oizumi; Assignee Hitachi, Ltd (Tokyo, JP).

130. Альбовский А.В. Реализация нейронной сети с помощью языка программирования Python / Егоров Н.А. Романюк А.Г. – Текст: // COLLOQUIUM – JOURNAL – № 9 – 1 (61). – С.5 – 7.

131. Vicente, P.G. Heat transfer and pressure drop for low Reynolds turbulent flow in helically dimpled tubes [Text] / P.G. Vicente, A. Garcia, A.Viedma // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 2002. – Vol. 45. – Pp. 543 – 553.

132. Vicente, P.G. Experimental study of mixed convection and pressure drop in helically dimpled tubes for laminar and transition flow [Text] / P.G. Vicente, A. Garcia, A.Viedma // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 2002. – Vol. 45. – Pp. 5091 – 5105.

133. Ибрагимов, М.Х. Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах [Текст] / М.Х. Ибрагимов, В.И. Субботин, В.П. Бобков, Г.И. Сабелев, Г.С.Таранов. – М.: Атомиздат, 1978. – 296 с.

134. Moon S.W. Turbulent Heat Transfer Measurements on a Wall with Concave and Cylindrical Dimples in a Square Channel [Electronic resource] / Moon S.W., Lau S.C. // Proc. of ASME Paper No GT2002 – 30208, USA. – 2002. 1 эл. опт. диск (CD – ROM).

135. Бурцев С. А. Экспериментальное исследование характеристик поверхностей, покрытых регулярным рельефом [Текст] / Бурцев С. А., Васильев В. К., Виноградов Ю. А., Киселёв Н. А., Титов А. А. // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2013. № 1. – С. 263 – 290.

136. Hagen, R.L. Heat transfer in the field of the turbulent boundary layer separation over a dimple [Text] / Hagen, R.L., Danak A.M. // Heat Transfer. – 1967. Vol. 4Pp. 62–69.
137. Presser, K.H. Empirische Gleichungen zur Berechnung der Stoff – und Wärmeübertragung für den Spezialfall Der abgerissenen Strömung [Text] / K. H. Presser // Int. J. Heat .Mass Transfer. – 1972. – Vol. 15. – Pp. 2447 – 2471.
138. Hiwada, M. Some Characteristics of Flow Pattern and Heat Transfer Past a Cylindrical Cavity [Text] / M. Hiwada, T. Kawamura, I. Mabuchi, M. Kumada // Bulletin of the JSME. – 1983. – V. 26, No 220. – P. 1744 – 1752.
139. Yamamoto, H. Forced Convection Heat Transfer on Heated Bottom Surface of a Cavity [Text] / H. Yamamota, N. Seki, S. Fukusako // Journal of Heat Transfer. – 1979. – V. 101, No 3. Pp. 475 – 479
140. Sparrow, E. Mass Transfer at the Base of a Cylindrical Cavity Recessed in the Floor of a Flat Duct [Text] / E. Sparrow, D. Misterek // Journal of Heat Transfer. 1986. V. 108, No 4. Pp. 854 – 859.
141. Khalatov, A. Application of Advanced Techniques to Study Fluid Flow and Heat Transfer Within and Downstream of a Single Dimple [Electronic resource] / A. Khalatov, A. Byerley, S – G. Min, R. Vincent. Минск, Беларусь.: Доклады V Минского Международного Форума по тепло – и массообмену (MIF – 5). – 2004. 1 эл. опт. диск (CD – ROM).
142. Агачев Р.С. Гидродинамика и теплопередача в плоском щелевом канале с цилиндрическими выемками и выступами [Текст] / Агачев Р.С, Дезидерьев С.Г., Талантов В.А., Щукин А.В., Буланов О.Ю. // Межвузовский сборник КГТУ. – Казань, 1995. С.8 – 11.
143. Grenard, Ph. Numerical study of heat transfer on a dimpled surface with CEDRE code [Text] / Ph. Grenard, V. Quintilla – Larroya, E. Laroche // 2nd European conference for aerospace sciences. – 2007. – 12 p.
144. Haigermoser, C. Investigation of the flow in a circular cavity using stereo and tomographic particle image velocimetry [Text] / C. Haigermoser, F. Scarano, M. Onorato // Experiments in Fluids. – 2009. – Vol. 46, Issue 3. – Pp. 517 – 526.

145. Теплообмен и гидравлическое сопротивление при ламинарном течении вязкой жидкости в трубах с искусственной шероховатостью / Ю.Г. Назмеев, А.М. Конахин, Б.А. Кумиров, В.В. Олимпиев // Теплоэнергетика. 1993. № 4. С. 66 – 69.
146. Савельев П.А. Исследование гидравлического сопротивления спирально профилированных труб при больших числах Рейнольдса // Изв. вузов. Энергетика. 1981. № 5. С. 43 – 46.
147. Раджа Рао М. Интенсификация теплообмена при ламинарном течении в трубах с помощью проволочных спиральных вставок // Теплопередача. 1985. Т. 107. № 4. С. 160 – 165.
148. Patent USA 4690211. Heat transfer tube for single phase flow.
149. Garcia A., Vicente P.G., Viedma A. Heat transfer and pressure drop for low Reynolds turbulent flow in heli cally dimpled tubes // Intern. J. Heat & Mass Transfer. 2002. V. 45. P. 543 – 553.
150. Enhancement of laminar and transitional flow heat transfer in tubes by means or wire coil inserts / A. Gar cia, J.P. Solano, P.G. Vicente, A. Viedma // Intern. J. Heat & Mass Transfer. 2007. V. 50. P. 3176 – 3189.
151. Олимпиев В.В. Модифицированная аналогия Рейнольдса для отрывных течений, присоединившихся к стенке // Изв. вузов. Авиационная техника. 2002. № 3. С. 67 – 68.
152. Ranaware A.G. A Study of Heat Transfer Enhancement using V Shaped Dimples on a Flat Plate with Experimentation & CFD [Текст] / Ranaware A.G., Bhosale S. Y. // Global Research and Development Journal for Engineering. – 2016.Vol. 1. – Pp.104 – 110.
153. Леонов В.П. Основные понятия ROC – анализа // Лекции. – 2009. – 47с.
154. Hecht – Nielsen R. Kolmogorov’s mapping neural network existence theorem // IEEE First Annual International Conference on Neural Networks. – San Diego, 1987. – vol. 3. – pp. 11 – 13.
155. Григорьев С.Г. Роль и место логистической регрессии и ROC – анализа в решении медицинских диагностических задач / С.Г.Григорьев, Ю.В. Лобзин, Н.В. Скрипченко // Журнал инфектологии. – 2016. – Т. 8. № 4. – С. 36 – 45.

156. Fawcett T. ROC Graphs: Notes and Practical Considerations for Researchers // 2004 Kluwer Academic Publishers.
157. Борисов А.Н. Курс: Генетические алгоритмы, 2002 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lazysmart.ru/iskusstvenny-j-intellekst/geneticheskie-operator/> (дата обращения 04.09.2021).
158. Водолазский, И. А. Роевой интеллект и его наиболее распространённые методы реализации / И. А. Водолазский, А. С. Егоров, А. В. Краснов. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2017. — № 4 (138). — С. 147 – 153. — URL: <https://moluch.ru/archive/138/38900/> (дата обращения: 05.09.2021).
159. Ю.Ф. Гортышов, В.В. Олимпиев, Б.Е. Байгалиев. Теплогидравлический расчет и проектирование оборудования с интенсифицированным теплообменом. Изд-во Казан.гос.техн.ун-та, Казань, 2004. 432 с.
160. В.К. Мигай. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. Энергоатомиздат, Ленинград, 1987. 264 с.
161. Webb, R. L. Heat transfer and friction in tubes with repeated-rib roughness / R. L. Webb, E. R. Eckert, R. J. Goldstein // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 1971. — Vol. 14, no. 4. — Pp. 601–617.
162. Поспелов Д.А. Прикладная семиотика и искусственный интеллект//Программные продукты и системы. – 1996. – №3. – С.10-13.
163. Цветков В.Я. Когнитивное управление. Монография — М.: МАКС Пресс, 2017. — 72с. ISBN 978-5-317-05434-2.
164. Цветков В.Я. Информационное управление. — LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbrücken, Germany 2012 -201с.
165. Цветков В.Я Маркелов В.М., Романов И.А. Преодоление информационных барьеров // Дистанционное и виртуальное обучение. 2012. № 11. С. 4-7.
166. Розенберг И.Н. Интеллектуальное управление// Современные технологии управления. ISSN 2226-9339. — №4 (76). Номер статьи: 7608. Дата публикации: 2017-04-10. Режим доступа: <https://sovman.ru/article/7608>.

167. Аскарлов Г.Р., Гаррис Н.А., Миронова О.Н. Зависимость активности процесса подземной коррозии от средней температуры при нестабильном температурном режиме трубопровода // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2012. Вып. 2. С. 28 – 30.

168. ОПЕРАТИВНЫЙ СПОСОБ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА НА ВЫХОДЕ ИЗ КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ Бахтегареева А.Н., Гаррис Н.А., Гильванов В.Г. ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация ООО «Газпром трансгаз Уфа», г. Уфа, Российская Федерация

169. Гаррис Н.А., Бахтегареева А.Н., Исмагилов И.Г. Новый подход к расчету теплообмена магистрального газопровода с окружающей средой / // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2013. №4. С. 87-90.

170. Исмагилов И.Г. Особенности теплового взаимодействия магистрального газопровода большого диаметра с грунтом: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2010. 191 с.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2022615393

**«НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ,
ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОЙ
ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА»**

Правообладатели: *Шакиров Руслан Айварович (RU), Гильфанов
Камиль Хабибович (RU)*

Авторы: *Шакиров Руслан Айварович (RU), Гильфанов
Камиль Хабибович (RU)*

Заявка № **2022614729**
Дата поступления **18 марта 2022 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **31 марта 2022 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Zubov



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022615175

**«НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМНЫХ
И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОВЕРХНОСТНЫХ ИНТЕНСИФИКАТОРОВ
ТЕПЛООБМЕНА»**

Правообладатели: *Шакиров Руслан Айварович (RU), Гильфанов
Камиль Хабибович (RU)*

Авторы: *Шакиров Руслан Айварович (RU), Гильфанов
Камиль Хабибович (RU)*

Заявка № 2022614480

Дата поступления 18 марта 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 30 марта 2022 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022615056

«ОПТИМИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ
ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В СРЕДЕ
ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ»Правообладатели: *Шакиров Руслан Айварович (RU), Гильфанов
Камиль Хабибович (RU)*Авторы: *Шакиров Руслан Айварович (RU), Гильфанов
Камиль Хабибович (RU)*

Заявка № 2022614492

Дата поступления 18 марта 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 29 марта 2022 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Справка об использовании результатов диссертационной работы

СПРАВКА**об использовании результатов диссертационной работы Шакирова Р.А.**

Результаты диссертационного исследования Шакирова Руслана Айваровича, содержащие базы данных, методы и алгоритмы построения нейросетевых моделей, комплексы прикладных программ по обобщению данных и оптимизации характеристик пассивных поверхностных интенсификаторов теплообмена, использованы в инновационной и проектной деятельности ООО «Газпром трансгаз Чайковский», в частности в рамках разработки проекта «Цифровой двойник компрессорной станции». Вышеупомянутый комплекс программ позволяет прогнозировать и оптимизировать тепловую, гидравлическую и теплогидравлическую эффективности интенсифицированных поверхностей теплообменников.

Начальник отдела сопровождения

инновационной деятельности

ООО «Газпром трансгаз Чайковский», к.э.н.



А.А. Санников



Оптимальные параметры геометрических и режимных характеристик
поверхностных интенсификаторов теплообмена

Кольцевые выступы							
d/D	t/D	t/h	Pr	Re_D	Nu/Nu_0	ξ/ξ_0	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$
0,91	0,48	38,6	3,5	150	1,17	1,01	1,1603
0,87	0,54	12,7	3,5	150	1,16	1,091	1,0597
0,83	0,63	3	3,5	200	1,11	1,099	1,0113
0,76	0,74	3,2	3,5	200	1,09	1,134	1,0201
0,69	0,81	10	3,5	250	1,05	1,139	0,942
0,99	0,93	5,5	3,5	250	1,48	1,06	1,4121
0,95	0,99	4,13	3,5	300	1,45	1,143	1,273
0,91	1,07	6,7	3,5	300	1,38	1,218	1,1328
0,87	1,12	32,2	3,5	350	1,35	1,328	1,0178
0,83	1,21	22	3,5	350	1,339	1,332	1,0052
0,69	1,33	13	3,5	400	1,329	1,3201	1,0067
0,86	0,51	10	3,5	1000	1,94	1,63	1,1838
0,82	0,68	5	3,5	1000	2,18	1,7	1,2757
0,74	0,7	4	3,5	1000	2,86	2,1	1,3424
0,71	0,85	67	3,5	1000	4,01	2,86	1,4192
0,67	1	22,2	3,5	1000	5,89	3,58	1,645
0,96	0,27	22,7	3,5	1500	2,01	2,03	1
0,81	0,69	5	3,5	1500	2,7	2,5	1,089
0,79	0,7	4	3,5	1500	3,17	2,91	1,09
0,75	0,87	67	3,5	1500	4,13	3,14	1,3205
0,88	0,52	8,719	3	1600	1,19	1,05	1,1423
0,81	0,69	6,705	3	1600	1,41	1,12	1,2497
0,79	0,71	3,968	3	1600	1,42	1,15	1,2724
0,71	0,88	11,273	3	1600	2,13	1,61	1,336
0,68	0,98	18,481	3	1600	3,23	2,14	1,4913
0,62	1,24	28,606	3	1600	2,1	1,94	1,07
0,99	0,27	14,647	6	2000	2,21	1,41	1,1
0,95	0,31	8,719	6	2000	1,71	1,68	1,016
0,87	0,52	3,968	6	2000	1,97	1,75	1,116
0,83	0,69	11,273	6	2000	2,13	1,88	1,1327
0,78	0,71	18,481	6	2000	3,44	2,25	1,5185
0,72	0,87	35,482	6	2000	3,9	2,37	1,647
0,69	1	68,776	6	2000	4,24	2,95	1,447
0,67	1,17	28,606	6	2000	3,76	3,11	1,209
0,62	1,24	22,7	3,5	2000	3,98	3,45	1,1491
0,54	1,31	5	3,5	2000	4,27	3,92	1,089
1	0,29	4,2	3,5	2000	1,27	1,19	1,0545
0,93	0,31	10	3,5	2000	1,33	1,28	1,0317
0,91	0,38	5	3,5	2000	1,45	1,34	1,0915
0,84	0,69	67	3,5	2000	1,54	1,37	1,1301
0,78	0,7	22,2	3,5	2000	1,89	1,53	1,2413

0,71	0,87	20	3,5	2000	2,93	1,72	1,697
d/D	t/D	t/h	Pr	Re_D	Nu/Nu_0	ξ/ξ_0	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$
0,69	1	14,3	3,5	2000	3,12	2,8	1,1148
0,53	1,31	22,7	3,5	2500	5,16	4,8	1,073
0,98	0,27	5	3,5	2500	5,18	5,17	1,002
0,91	0,34	10	3,5	2500	5,92	5,75	1,03
0,88	0,52	67	3,5	2500	7,16	5,87	1,2155
0,84	0,69	22,2	3,5	2500	7,37	5,91	1,2478
0,79	0,71	20	3,5	2500	8,16	6,11	1,4127
0,74	0,87	14,3	3,5	2500	9,2	6,22	1,4692
0,68	1,02	10	3,5	2500	6,86	6,55	1,05259
0,61	1,24	29,176	9	2500	6,97	6,89	1,012
0,53	1,3	14,647	9	2500	8,17	7,23	1,13
0,87	0,5	11,273	9	2500	1,29	1,11	1,17
0,83	0,67	18,481	9	2500	1,51	1,24	1,235
0,74	0,71	35,482	9	2500	2,08	1,35	1,5424
0,71	0,87	68,776	9	2500	2,54	1,52	1,68
0,67	1	28,606	9	2500	2,94	2,16	1,3417
0,67	1,17	22,7	3,5	3000	3,59	2,92	1,23
0,87	0,52	67	3,5	3000	3,64	2,36	1,529
0,82	0,69	22,2	3,5	3000	3,9	2,45	1,614
0,74	0,7	20	3,5	3000	4,2	2,6	1,663
0,71	0,87	14,3	3,5	3000	7,5	4,21	1,795
0,69	1	10	3,5	3000	6,79	5,9	1,1601
0,62	1,23	29,176	12	3200	6,72	6,21	1,0882
0,87	0,52	11,273	12	3200	2,15	1,65	1,3112
0,83	0,67	18,481	12	3200	2,92	1,97	1,4761
0,77	0,71	35,482	12	3200	4,28	2,86	1,4982
0,73	0,87	68,776	12	3200	4,93	3,17	1,5503
0,67	1	28,606	12	3200	5,68	4,07	1,391
0,87	0,52	67	3,5	3500	3,53	2,29	1,539
0,84	0,59	22,2	3,5	3500	4,35	2,71	1,611
0,78	0,71	20	3,5	3500	4,7	3,76	1,728
0,77	0,87	14,3	3,5	3500	6,8	3,88	1,754
0,69	1	10	3,5	3500	5,18	4,03	1,2782
0,69	1	23	3,5	3500	5,1	4,23	1,2
0,89	0,5	9,97	3,5	4000	1,95	1,73	1,037
0,95	1	66,4	3,5	4000	4,43	3,24	1,3612
0,9	1,01	22,7	3,5	4000	2,51	2,23	1,121
0,91	1,09	20,1	3,5	4000	3,41	2,82	1,204
0,89	0,98	13,9	3,5	4000	4,34	3,97	1,0959
0,81	1	10	3,5	4000	13,26	10,1	1,3405
0,99	0,48	28	17	5000	2,23	1,14	1,9649
0,97	0,52	14,9	17	5000	1,57	1,32	1,1959
0,95	0,5	8,69	17	5000	1,78	1,72	1,0431
0,9	0,97	11,3	17	5000	2,46	2,28	1,0846
0,95	0,98	18,5	17	5000	1,85	1,32	1,406
0,93	1,99	35,5	17	5000	2,81	2,23	1,2926
0,94	3,989	69	17	5000	4,38	3,13	1,8849
0,97	0,93	28,7	17	5000	2,17	1,16	1,8793

0,9	0,46	29,23	20	6500	2,24	1,15	1,9565
d/D	t/D	t/h	Pr	Re_D	Nu/Nu₀	ξ/ξ_0	(Nu/Nu₀)/(ξ/ξ_0)
0,95	0,48	14,64	20	6500	2,48	1,37	1,8029
0,92	0,92	12,03	20	6500	4,31	2,42	1,7851
0,96	0,98	18,6	20	6500	1,52	1,4	1,0714
0,94	1,97	38,8	20	6500	3,67	2,87	1,3055
0,92	4,01	69	20	6500	2,17	1,18	1,8474
0,97	0,94	29	20	6500	2,21	1,18	1,8641
0,99	0,49	30	23	8000	2,73	2,17	1,3401
0,98	0,491	14,7	23	8000	2,6	1,41	1,851
0,94	0,493	8,8	23	8000	2,051	1,97	1,0337
0,9	0,98	11	23	8000	2,79	2,55	1,0995
0,94	0,97	19	23	8000	1,81	1,48	1,2351
0,93	3,97	69,9	23	8000	3,45	2,21	1,5595
0,96	0,94	28,6	23	8000	2,83	2,19	1,3907
0,97	0,49	28,9	26	10000	2,87	2,18	1,4406
0,95	0,51	14	26	10000	1,6	1,48	1,0864
0,92	0,48	8,5	26	10000	2,159	2,1	1,0289
0,92	0,97	11,7	26	10000	3,109	2,7	1,1518
0,95	1	18,8	26	10000	2,01	1,58	1,265
0,91	2,1	37,8	26	10000	3,97	2,38	1,6841
0,92	3,9	68,6	26	10000	4,57	3,25	1,4061
0,94	0,93	28,7	26	10000	2,91	2,22	1,377
0,9	0,46	29	29	13000	2,5	2,19	1,11
0,99	0,48	15	29	13000	2,879	1,53	1,8823
0,97	0,47	8,9	29	13000	2,41	2,21	1,0891
0,9	0,92	11,3	29	13000	3,27	2,82	1,1648
0,95	0,98	18,1	29	13000	3,31	1,7	1,9529
0,94	1,97	33,2	29	13000	4,15	3,45	1,8689
0,94	4,01	65,6	29	13000	5,27	2,77	1,9055
0,96	0,94	29,8	29	13000	2,87	2,24	1,319
0,99	0,45	29,76	32	16000	2,67	2,19	1,2504
0,97	0,5	14,47	32	16000	2,06	1,59	1,299
0,95	0,49	8,19	32	16000	2,43	2,32	1,0519
0,9	0,99	11,23	32	16000	3,43	2,96	1,1608
0,95	1	19,81	32	16000	3,36	1,74	1,9367
0,94	3,89	68,76	32	16000	5,45	5,28	1,049
0,97	0,95	28,06	32	16000	2,43	1,26	1,9444
0,93	0,49	29,16	35	20000	2,2	1,19	1,8588
0,96	0,48	14,47	35	20000	3,16	1,65	1,9212
0,93	0,47	8,79	35	20000	2,59	2,38	1,0911
0,92	0,92	11,23	35	20000	4,81	3,07	1,57
0,96	0,98	18,41	35	20000	2,87	1,78	1,6157
0,94	1,97	35,48	35	20000	2,979	1,51	1,9741
0,92	3,99	68,7	35	20000	6,43	5,3	1,223
0,97	0,94	28,6	35	20000	1,78	1,28	1,3975
0,93	0,49	29,16	38	25000	1,64	1,2	1,375
0,96	0,49	14,47	38	25000	2,1	1,73	1,2063
0,96	0,99	17,98	38	25000	2,35	1,79	1,3061
0,97	0,94	28,606	38	25000	2,31	1,3	1,7692

0,92	3,99	68,776	38	25000	5,5	4,31	1,267
d/D	t/D	t/h	Pr	Re_D	Nu/Nu_0	ξ/ξ_0	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$
0,99	0,46	29,176	41	31000	2,12	1,216	1,7312
0,95	0,48	14,647	41	31000	1,92	1,77	1,0925
0,93	0,47	8,719	41	31000	2,72	2,51	1,0864
0,94	1,05	18,481	41	31000	2,16	1,81	1,1872
0,93	1,88	35,482	41	31000	2,91	1,54	1,8754
0,92	4,03	68,776	41	31000	4,49	3,32	1,3787
0,97	0,94	28,606	41	31000	1,95	1,33	1,4736
0,99	0,46	29,176	44	40000	1,84	1,23	1,4975
0,95	0,48	14,647	44	40000	1,98	1,81	1,0968
0,93	0,47	8,719	44	40000	2,81	2,58	1,0841
0,94	1,05	18,481	44	40000	2,13	1,83	1,1469
0,93	1,88	35,482	44	40000	2,09	1,56	1,2852
0,92	4,03	68,776	44	40000	4,47	3,33	1,3646
0,97	0,94	28,606	44	40000	1,87	1,35	1,3911
0,99	0,46	29,176	47	50000	1,63	1,23	1,3057
0,95	0,48	14,647	47	50000	2,21	1,84	1,1967
0,93	0,47	8,719	47	50000	2,86	2,63	1,082
0,92	0,99	11,273	47	50000	3,87	3,39	1,1451
0,94	1,05	18,481	47	50000	2,18	1,85	1,1751
0,93	1,88	35,482	47	50000	2,87	1,57	1,834
0,92	4,03	68,776	47	50000	4,64	3,34	1,4035
0,97	0,94	28,606	47	50000	1,61	1,37	1,1869
0,99	0,46	29,176	50	63000	1,36	1,24	1,1048
0,95	0,48	14,647	50	63000	2,03	1,88	1,0877
0,93	0,47	8,719	50	63000	2,91	2,7	1,0803
0,94	1,05	18,481	50	63000	2,38	1,87	1,2759
0,93	1,88	35,482	50	63000	2,86	1,58	1,8166
0,92	4,03	68,776	50	63000	6,61	5,36	1,2088
0,97	0,94	28,606	50	63000	1,97	1,4	1,4142
0,99	0,46	74,16	55	70000	4,12	2,36	1,7431
0,95	0,48	17,47	55	70000	1,41	1,14	1,234
0,93	0,47	8,79	55	70000	1,07	1,03	1,0943
0,92	0,5	47,23	65	75000	2,4	1,46	1,64
0,86	0,48	21,41	65	75000	1,8	1,33	1,3543
0,92	0,99	39,48	65	75000	2,15	1,31	1,643
0,94	1,05	71,7	70	80000	3,87	2,16	1,7945
0,92	4,03	29,6	70	80000	1,79	1,03	1,745
0,97	0,94	31,16	75	85000	1,83	1,01	1,8123
0,99	0,46	11,47	75	85000	1,27	1,15	1,1032
0,95	0,48	9,79	75	85000	1,19	1,13	1,0561
0,93	0,47	12,23	80	90000	1,28	1,02	1,3894
0,92	0,5	19,41	80	90000	1,53	1,06	1,439
0,86	0,48	93,48	80	90000	2,3	2,27	1,015
0,92	0,99	68,7	85	95000	3,32	1,79	1,8496
0,94	1,05	88,6	85	95000	6,23	2,92	2,1352
0,93	1,88	29,16	85	95000	1,81	1,05	1,7234
0,92	4,03	16,47	90	100000	1,36	1,21	1,123
0,97	0,94	9,79	90	100000	1,1	1,02	1,076

0,99	0,46	13,23	90	10000	1,31	1,19	1,0997
Полусферические выступы							
d/D	t/D	s/D	Pr	Re_D	Nu/Nu₀	ξ/ξ_0	(Nu/Nu₀)/(ξ/ξ_0)
0,952	0,951	0,449	3,46	100	1,01356	0,998	1,049
0,767	0,82	0,553	4,12	150	0,984	0,85	1,1684
0,989	1,1	0,708	5,18	200	1,1901	1,15	1,5686
0,982	0,99	0,601	9,56	300	1,254	1,1	1,14
0,985	0,998	0,607	9,08	350	1,22086	1,04	1,1739
0,987	1,02	0,607	8,6	650	1,18539	1,04	1,1398
0,989	0,98	0,609	8,2	850	1,21356	0,93	1,3049
0,992	1,07	0,61	7,64	1000	0,99314	0,85	1,1684
0,762	0,859	0,549	7,48	1200	5,4901	3,5	1,5686
0,827	0,811	0,553	7,32	1250	2,03099	1,94	1,0469
0,989	1,05	0,608	7,24	1300	1,07564	0,99	1,0865
0,759	0,871	0,4	7,16	1350	9,16341	4,03	2,2738
0,803	0,821	0,551	7,08	1400	3,5919	3	1,1973
0,834	0,819	0,559	6,92	1450	1,46412	1,37	1,0687
0,990	1,01	0,61	6,76	1550	0,99271	0,89	1,1154
0,763	0,872	0,55	6,68	1600	5,1652	3,37	1,5327
0,832	0,817	0,558	6,52	1650	1,84059	1,53	1,203
0,981	1	0,598	6,36	1700	1,34501	1,23	1,0935
0,768	0,861	0,551	6,28	1800	4,35802	3,12	1,3968
0,819	0,812	0,552	6,12	1850	2,98029	2,05	1,4538
0,810	0,82	0,551	6,2	1850	3,164	2,26	1,4
0,983	1,08	0,605	6,04	1900	1,0792	1,07	1,0086
0,833	0,812	0,558	5,72	2000	2,23358	1,41	1,5841
0,823	0,817	0,553	5,8	2000	2,97492	1,95	1,5256
0,772	0,861	0,551	5,88	2000	4,63162	3,06	1,5136
0,747	0,91	0,399	5,96	2000	6,89025	6,82	1,0103
0,910	0,613	0,569	5,56	2050	1,79994	1,29	1,3953
0,983	0,991	0,603	5,48	2100	1,36609	1,1	1,2419
0,828	0,81	0,554	5,16	2600	2,55358	1,93	1,3231
0,813	0,811	0,551	5,32	2600	2,44501	2,06	1,1869
0,762	0,858	0,41	5,4	2600	4,64936	3,53	1,3171
0,911	0,609	0,59	5	2650	1,73555	1,28	1,3559
0,983	1,07	0,6	4,92	2700	1,47633	1,16	1,2727
0,829	0,811	0,557	4,6	2800	2,05426	1,77	1,1606
0,762	0,859	0,403	4,84	2800	3,80155	3,78	1,0057
0,901	0,605	0,561	4,44	2850	1,60823	1,3	1,2371
0,982	1,02	0,6	4,2	2900	1,24933	1,21	1,0325
0,841	0,814	0,559	9,56	3250	1,45329	1,33	1,0927
0,981	0,99	0,597	9,08	3300	1,24	1,24	1
0,831	0,812	0,557	8,6	3800	1,85942	1,68	1,1068
0,883	1,08	0,605	12	4000	1,73555	1,28	1,3559
0,933	0,823	0,558	12,7	5000	1,47633	1,16	1,2727
0,813	0,871	0,653	13,4	6000	2,15426	1,81	1,1606
0,872	0,761	0,451	16,1	7000	3,70155	3,68	1,0057
0,741	0,917	0,379	17,8	8000	1,50823	1,2	1,2371
0,810	0,631	0,499	21,5	9000	1,14933	1,11	1,0325
0,783	0,971	0,613	22,1	10000	1,55329	1,23	1,0927

0,74	0,9	0,4	24,6	11000	2,1	1,37	1,53285
d/D	t/D	s/D	Pr	Re_D	Nu/Nu₀	ξ/ξ_0	(Nu/Nu₀)/(ξ/ξ_0)
0,9	0,6	0,4	27,3	13000	2,4	1,28	1,875
0,98	1	0,6	29	14000	1,14	1	1,14
0,74	0,9	0,4	30,7	15000	1,4	1,07	1,30841
0,761	0,863	0,556	32,4	16000	2,06	1,43	1,44056
0,803	0,819	0,562	34,1	17000	2,01	1,39	1,44604
0,834	0,813	0,553	35,8	18000	2,05	1,27	1,61417
0,9	0,6	0,4	37,5	19000	2,08	1,32	1,57576
0,98	1	0,6	39,2	20000	2,08	1,42	1,46479
0,74	0,9	0,4	40,9	21000	2,14	1,58	1,35443
0,761	0,863	0,556	42,6	22000	2,14	1,44	1,48611
0,803	0,819	0,562	44,3	23000	2,08	1,37	1,51825
0,834	0,813	0,553	46	24000	1,93	1,27	1,51969
0,9	0,6	0,4	47,7	25000	2,1	1,49	1,4094
0,98	1	0,6	49,4	26000	1,06	0,93	1,13978
0,74	0,9	0,4	51,1	27000	2,23	1,82	1,22527
0,761	0,863	0,556	52,8	28000	2,16	1,45	1,48966
0,803	0,819	0,562	54,5	29000	2,14	1,39	1,53957
0,834	0,813	0,553	56,2	30000	3,07	2,27	1,35242
0,98	1	0,6	57,9	31000	1,07	0,82	1,30488
0,74	0,9	0,4	59,6	32000	3,48	2,34	1,48718
0,761	0,863	0,556	61,3	33000	2,21	1,51	1,46358
0,803	0,819	0,562	63	34000	2,95	1,88	1,56915
0,834	0,813	0,553	64,7	35000	1,67	1,24	1,34677
0,9	0,6	0,4	66,4	36000	2,68	1,55	1,72903
0,74	0,9	0,4	68,1	37000	2,18	1,12	1,94643
0,761	0,863	0,556	69,8	38000	2,4	1,53	1,56863
0,803	0,819	0,562	71,5	39000	1,41	1,44	0,97917
0,834	0,813	0,553	73,2	40000	1,34	1,28	1,04688
0,9	0,6	0,4	74,9	41000	2,19	1,4	1,56429
0,98	1	0,6	76,6	42000	1,13	1,04	1,08654
0,761	0,863	0,556	78,3	43000	3,82	2,68	1,42537
0,803	0,819	0,562	80	44000	1,76	1,47	1,19728
0,834	0,813	0,553	81,7	45000	1,4	1,31	1,0687
0,9	0,6	0,4	83,4	46000	2,18	1,44	1,51389
0,98	1	0,6	85,1	47000	1,16	1,04	1,11538
0,74	0,9	0,4	86,8	48000	2,85	2,12	1,34434
0,761	0,863	0,556	88,5	49000	4,69	3,06	1,53268
0,834	0,813	0,553	90,2	50000	1,6	1,33	1,20301
0,9	0,6	0,4	91,9	51000	1,93	1,56	1,23718
0,98	1	0,6	93,6	53000	2,17	1,47	1,47619
0,74	0,9	0,4	95,3	54000	3,63	2,72	1,33456
0,74	0,9	0,4	97	55000	2,56	1,97	1,29949
0,9	0,6	0,4	97,3	56000	4,31	3,28	1,31402
0,98	1	0,6	97,8	57000	1,14	1	1,14
0,74	0,9	0,4	98,1	60000	4,1	3,17	1,29338
0,761	0,863	0,556	98,4	70000	3,06	2,43	1,25926
0,803	0,819	0,562	98,8	80000	3,91	2,39	1,63598
0,74	0,9	0,4	99,4	90000	4,1	2,37	1,72996

0,9	0,6	0,4	99,8	100000	3,87	2,28	1,69737
-----	-----	-----	------	--------	------	------	---------