

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Химическая технология и ресурсосбережение»

(наименование)

18.03.02 Энерго – и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии  
и биотехнологии

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Рациональное природопользование, рециклинг и утилизация отходов

(направленность (профиль) / специализация)

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Оптимизация теплообменных процессов при разделении нефтешлама

Студент

В.А. Крайнов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.п.н., доцент, М.В. Кравцова

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2021

## Аннотация

Выпускную квалификационную работу выполнил: Крайнов В.А.

Тема выпускной квалификационной работы: «Оптимизация теплообменных процессов при разделении нефтешлама».

Руководитель: к.п.н., доцент, Кравцова М.В.

Целью работы является оптимизация теплообменных процессов при разделении нефтешлама.

Выпускная квалификационная работа изложена на 61 листе, включает 9 таблиц, 20 рисунков, список из 37 используемых источников, включая 5 иностранных. Выпускная квалификационная работа состоит из введения, трех разделов, заключения, списка используемых источников и двух приложений.

В первом разделе проведены анализ проблемы образования нефтешламов и анализ технологий их переработки, в том числе используемых в АО «Самаранефтегаз». Рассмотрены теоретические основы теплообменных процессов.

Во втором разделе приведены анализ количественного состава нефтешлама и описание модели теплофизических и реологических свойств нефтешлама.

В третьем разделе приведен порядок расчета теплообменников и осуществлен выбор оптимального теплообменного аппарата

В заключении приведены основные выводы о проделанной работе.

В приложении А приведена разработка модели теплофизических и реологических свойств нефтешлама.

В приложении Б приведен расчет теплообменных аппаратов с помощью программы, разработанной на базе Microsoft Excel.

## **Abstract**

The title of the graduation work is «Optimization of heat – exchange processes in oil sludge separation». This work is about optimization of processes of oil sludge separation by selecting optimal heat – exchange equipment.

The graduation work consists of an explanatory note on 61 pages, including 20 figures, 9 tables, the list of 37 references including 5 foreign sources and 2 appendices.

The aim of the work is to give some information about methods for optimization of chemical – engineering processes by selecting of optimal heat – exchange equipment.

The object of the graduation work is oil sludge and heat – exchange equipment.

The subject of the graduation work is the development of a model of thermophysical and rheological properties of oil sludge.

The graduation work may be divided into several logically connected parts which are theoretical part, experimental part, calculation part.

The theoretical part of the project gives details about problems of oil sludge formation and oil sludge recycling technologies. Much attention is given to theoretical foundations of heat – exchange processes.

The experimental part of the project gives details about researches of the quantitative composition of oil sludge, development and interpretation of the model of thermophysical and rheological properties of oil sludge.

The calculation part of the project gives details about calculating a series of devices and selecting the optimal device.

The results of the study showed that selecting optimal heat – exchange equipment is one of the main directions of improvement of chemical – engineering processes.

## Содержание

Введение.....	3
1 Анализ проблемы накопления и утилизации отходов нефтешламов.....	4
1.1 Проблема образования и утилизации нефтешламов на территории Российской Федерации.....	4
1.2 Технологии переработки и утилизации отходов нефтешламов.....	6
1.3 Технологический процесс кавитационной переработки отходов нефтешлама.....	17
1.4 Теоретические основы теплообменных процессов и сравнительный анализ теплообменных аппаратов.....	19
2 Экспериментальные исследования отходов нефтешламов.....	28
2.1 Определение содержания нефтепродуктов.....	28
2.2 Определение содержания механических примесей.....	30
2.3 Определение содержания воды.....	32
2.4 Определение содержания хлористых солей.....	34
2.5 Описание модели, описывающей зависимость реологических и теплофизических свойств нефтешлама от содержания воды.....	36
3 Расчетная часть.....	41
3.1 Расчет теплообменных аппаратов.....	41
3.2 Выбор оптимального теплообменного аппарата.....	47
Заключение.....	56
Список используемой литературы и используемых источников.....	58
Приложение А Разработка математической модели.....	62
Приложение Б Расчет теплообменных аппаратов.....	99

## Введение

Настоящая работа посвящена оптимизации теплообменных процессов в рамках кавитационной технологии переработки нефтешлама за счет подбора оптимального теплообменного аппарата и исследования зависимости теплофизических свойств отходов нефтешлама от количественного состава нефтешлама и температуры, разработки рекомендаций по оптимизации технологического процесса.

Целью работы является обеспечение энерго – и ресурсосберегающих процессов в процессе переработки отходов нефтешлама.

Цель осуществляется посредством решения следующих задач.

- Провести анализ проблемы образования нефтешламов на территории Российской Федерации.

- Провести литературный обзор в области утилизации отходов нефтешламов.

- Проанализировать технологии утилизации отходов нефтешлама, применяемые в АО «Самаранефтегаз».

- Провести исследования количественного состава отходов нефтешлама.

- Разработать математическую модель, отображающую зависимость теплофизических и реологических свойств отходов нефтешлама от его количественного состава и температуры.

- Произвести расчёт ряда теплообменных аппаратов.

- Осуществить выбор оптимального теплообменного аппарата путём сравнения приведённых затрат.

# 1 Анализ проблемы накопления и утилизации отходов нефтешламов

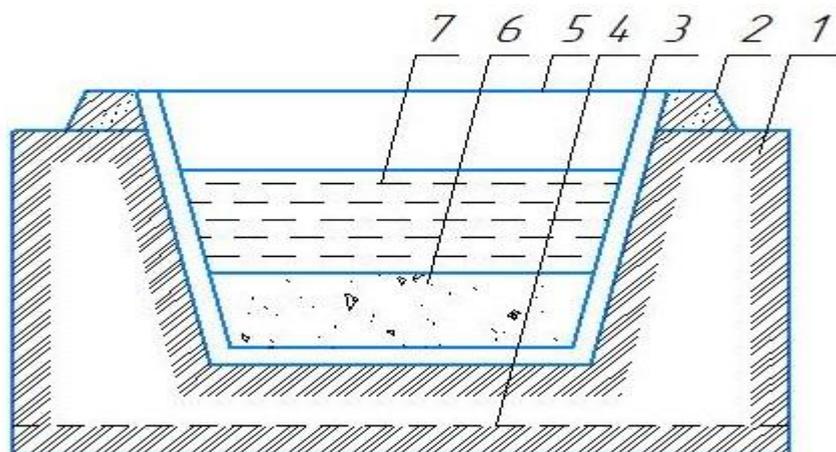
## 1.1 Проблема образования и утилизации нефтешламов на территории Российской Федерации

Нефтедобыча и нефтепереработка - важнейшие отрасли отечественной промышленности, деятельность которых сопровождается образованием ряда нефтесодержащих отходов. Ежегодно в России образуется более 5 млн. тонн отходов нефтешламов. Приведём классификацию отходов нефтедобычи и нефтепереработки в таблице 1.

Таблица 1 – Классификация отходов нефтедобычи и нефтепереработки

Агрегатное состояние отхода	Вид отхода
Твердый	Донные осадки резервуаров
	Буровые растворы и шламы
	Нефтешламы разливов
	Нефтешламы переработки
	Нефтешламы трубопроводов
Жидкий	Пластовые воды
	Буровые сточные воды
	Прочие углеводородсодержащие жидкости
Газообразный	Попутный газ
	Углеводороды, образующиеся при испарении и утечках
	Не углеводородные компоненты H <sub>2</sub> S, CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub>

В настоящее время нефтезагрязнённые грунты, образующиеся на производственных площадках и в трубопроводах компании АО«Самаранефтегаз», перерабатываются на Горбатовском полигоне. Отходы, образовавшиеся в период до 2004 года, складировались в специально оборудованных шламовых амбарах, устройство которых показано на рисунке 1, и в настоящее время перерабатываются методом биологической деструкции.



Обозначения: 1 – грунт, 2 – обваловка, 3 – изоляция, 4 - уровень грунтовых вод, 5 - поверхностный слой нефтесодержащий, 6 - донные отложения, 7 - водная прослойка.

Рисунок 1 - Устройство шламового амбара

Шламовый амбар - природоохранное сооружение открытого типа, представляет собой углубление в почве глубиной порядка трёх метров, сильно варьируемое по площади. Оборудуется полимерной либо бетонной изоляцией (в старых сооружениях зачастую отсутствует) и обваловкой для предотвращения разлива нефтесодержащего отхода и его инфильтрации в почву. Находящаяся в амбаре смесь неоднородна, как правило, состоит из донных отложений, содержащих тяжёлые фракции нефти и механические примеси, водного слоя, состоящего собственно из воды и эмульгированных в ней фракций нефти, над которым располагается нефтесодержащий слой в виде пленки.

Шламы состоят из органической части, механических примесей и воды. Органическая часть чрезвычайно разнообразна по составу, состоит из углеводородов и их производных, преимущественно алканов и циклоалканов, непредельных и ароматических углеводородов, сернистых, кислородных и азотистых соединений, смол и асфальтенов - в большинстве гетеро - и полициклических соединений. Во многом состав шлама определяется составом исходной нефти, однако может сильно изменяться вследствие естественных процессов окисления, биологической деструкции вследствие

обсеменения микроорганизмами, испарения легких фракций углеводородов. К механическим примесям относят грунты, соли тяжелых металлов. Влажность смеси также сильно варьируется, так как сооружение открытое и имеют место испарение влаги и попадание её в смесь с атмосферными осадками [21,28].

## **1.2 Технологии переработки и утилизации отходов нефтешламов**

Среди методов переработки отходов нефтешламов можно выделить три группы.

Первая группа методов имеет целью выделение из шлама углеводородной фракции в чистом виде с последующим вовлечением в основной технологический процесс предприятий нефтехимии.

Методы второй группы направлены на использование шламов в качестве вторичных энергетических либо сырьевых ресурсов без вовлечения в основное нефтехимическое производство.

Третья группа методов основана на биологической деструкции нефтесодержащих отходов. Методы данной группы наиболее широко используются ввиду относительной дешевизны и простоты осуществления, однако, по сути, компания теряет, таким образом, большие количества ценного вторичного сырья [2,3,20].

Автор, приводящий данную классификацию, отмечает, что метод переработки отходов нефтешлама определяется его составом, так, при использовании комбинированной технологии переработки загрязненных нефтешламами грунтов, использующей методы отмывки и центрифугирования, массовая доля нефтепродукта не должна превышать 45%, воды – 2%. Также автор отмечает, что наибольшей эффективностью обладают процессы, являющиеся комбинацией известных технологий.

Рассмотрим первую группу методов. Для выделения отдельных фракций из шлама используются гидромеханические и теплообменные процессы.

Фильтрация основана на прохождении дисперсной системы через пористую перегородку. Однако ввиду высокой вязкости отходов нефтешламов процесс идет медленно под действием сил гравитации, и широкое применение нашли пресс - фильтры и вакуум – фильтры [1].

Центрифугирование основано на разделении неоднородной смеси под действием центробежной силы, декантеры как правило снабжены шнеком, с помощью которого интенсифицируется процесс центробежного разделения и осуществляется выгрузка твердой фазы [29,32].

Приведем исследование выделения нефтяной фракции в трехфазном декантере. Авторы проводили центрифугирование шлама при частоте вращения барабана 3500 оборотов в минуту, и получили удовлетворительные результаты (содержание 1% механических примесей и 2% воды в нефтепродукте) для нефтешламов с содержанием механических примесей до 60%.

Таким образом, содержание механических примесей лимитирует процесс переработки шлама и частоту вращения барабана. Шлам является трехфазной системой, состоящей из нефтепродукта, воды и механических примесей, сочетает свойства эмульсии и суспензии. Эффективность осаждения фазы в дисперсных системах при центрифугировании зависит от скорости осаждения, которая больше скорости осаждения в гравитационном поле в число раз, равное отношению центробежного ускорения к ускорению свободного падения, а значит, пропорциональна квадрату частоты оборотов. Таким образом, основные факторы, влияющие на осаждение частиц – частота вращения барабана, параметры барабана и концентрация частиц фазы. Увеличение частоты вращения приводит к увеличению скорости осаждения, что снижает необходимую поверхность осаждения, что позволит уменьшить расход материала на аппарат, но приведет к увеличению расхода электроэнергии. Увеличение диаметра и длины барабана увеличивает производительность. Увеличение концентрации частиц приводит к

стесненному осаждению, что ведет к уменьшению скорости осаждения и увеличению требуемой площади.

Выше были описаны гидромеханические процессы, перейдем к рассмотрению тепломассообменных процессов.

В последнее время ведутся исследования внедрения в тепломассообменные аппараты новых принципов передачи тепла, существенно возросло число работ, обосновывающих рациональность использования сверхвысокочастотного излучения.

Ростовские ученые исследовали возможность перегонки шлама с помощью микроволнового излучения. Так как велось исследование высоковязких шламов, лучших результатов удалось достичь в присутствии органического растворителя и перемешивании до однородной смеси. Образующиеся пары углеводородов отгонялись и проходили через обратный холодильник, на выходе получали остаток, содержащий тяжёлые фракции нефти и механические примеси, жидкую составляющую и фракцию летучих углеводородов. Главным преимуществом нагрева отхода за счет сверхвысокочастотного излучения является бесконтактная передача тепла и нагрев во всем объеме тела, что снижает расход материала на теплообменное оборудование за счет снижения требования к поверхности теплопередачи [5].

Рассмотрена схожая работа авторов из Казани, которые делают, однако, важное замечание – недопустим резкий нагрев смеси до температуры кипения, что чревато катализом реакций окисления и полимеризации, что ведет к битумизации шлама и резко снижает выход жидкой фракции. Предлагается нагрев в три ступени с шагом температур 40 – 60% за счет регулирования мощности генератора [14].

Выше были рассмотрены методы утилизации шлама, нацеленные на выделение отдельных фракций и их использование в качестве нефтехимического сырья. Приступим к рассмотрению группы методов, нацеленных на использование шлама без выделения отдельных фракций в качестве вторичного материального или энергетического ресурса.

В первую очередь рассмотрим ряд работ, посвященных применению отходов нефтешлама в дорожном строительстве.

Выделяют несколько путей применения отходов нефтешлама в дорожном строительстве. Первый – изготовление асфальтобетонных смесей с добавлением шлама к разогретым щебню и песком с последующей подачей битума. Это снижает расход битума и увеличивает интервал пластичности, увеличивая тем самым устойчивость к растрескиванию и плавлению. Однако использование шлама в качестве добавки к асфальтобетонным смесям требует нормирования примесей тяжелых металлов и высокого содержания смолисто – асфальтовых веществ. Второй – в качестве связующего для укрепления грунтов [18].

Интересен опыт учёных, которые, основываясь на высокой гидрофобности смол, асфальтенов и тяжёлых углеводородов, предложили использовать шлам в качестве гидроизоляционного компонента в дорожном строительстве для обустройства дорожного основания. Процесс основан на улетучивании лёгких фракций углеводородов при нагреве, а также активации кислородом, как бирадикалом, процессов радикальной полимеризации асфальтовых фракций [31].

При использовании сорбционных методов можно добиться низкого содержания ионов тяжелых металлов в нефтешламе, однако применение нефтешламов напрямую в дорожном строительстве ограничено законодательством.

Сорбционный метод основан на детоксикации нефтешлама при его взаимодействии с сорбентом – глауконитовым песком в аппарате с мешалкой. Данный сорбент обладает высокой сорбционной способностью при малой

способности к десорбции. Нефтешлам после детоксикации пригоден для производства асфальта. Детоксикация необходима ввиду того, что к материалам, применяемым в дорожном строительстве, предъявляются высокие требования на предмет содержания ионов тяжелых металлов.

Гуминовые кислоты, ввиду наличия карбоксильных групп, также способны к адсорбции по механизму ионного обмена, ввиду чего гуминовые препараты используются в качестве сорбента, как и глауконитовые пески.

Теперь рассмотрим ряд работ, посвященных применению отходов нефтешлама при производстве строительных материалов.

Использование бурового шлама в качестве сырья для производства керамических композитных материалов подразумевает сушку, помол, грануляцию смеси бурового шлама с глиной при добавлении жидкого стекла, с последующей формовкой и обжигом. В работе показано, что увеличение содержания бурового шлама в гранулированной шихте ведет к линейному уменьшению прочности на сжатие и плотности материала, в то же время наблюдается рост влагопоглощения, что, однако, позволяет использовать материал в качестве конструкционно - теплоизолирующего материала [4].

Учёными предложен метод утилизации нефтешламов водоочистных сооружений, который в принципе может быть распространён на водонефтяные эмульсии, заключающийся в использовании нефтесодержащих отходов как сгорающей добавки при изготовлении материалов для строительной промышленности.

Методы третьей группы предназначены для обезвреживания отходов нефтешламов, как правило, к этой группе относят термические и биологические методы [10,12,30].

Обратимся к трудам иностранных авторов, приведем их краткие изложения и включим в предлагаемую классификацию.

Первая работа представляет собой обзор, в котором автор рассматривает образование отходов нефтешламов и их качественный и количественный состав, а также технологии переработки. Автор рассматривает нефтешлам как

совокупность углеводородной, водной и минеральной составляющих, соотношение которых значительно варьирует. Основным источником образования отхода он называет нефтяную нефтехимическую промышленность, в частности основные процессы нефтехимии и вспомогательные процессы очистки оборудования, транспортировки. Автор рассматривает методы первой и третьей группы, согласно нашей классификации. К первой группе отнесем методы центрифугирования, флотации применительно к очистке нефтесодержащих сточных вод, газификации для получения генераторного газа, экстракции с последующей отгонкой углеводородных фракций. К третьей группе методов отнесем методы пиролиза и биоремедиации [33].

Вторая работа посвящена комбинированному методу экстракции с выпариванием и последующей регенерацией экстрагента методом замораживания – оттаивания. Авторами выявлено, что при использовании большинства экстрагентов высокие степени извлечения достигаются при отношении растворителя к нефтешламу равном пять к одному и выше. Перемешивание и увеличение продолжительности контакта также положительно влияют на степень извлечения. Замораживание – оттаивание применяли для разрушения обратной эмульсии экстрагент (циклогексан, дихлорметан) – вода, что необходимо для регенерации экстрагента и его повторном использовании в технологическом цикле [34].

Третья работа посвящена исследованию процесса вакуумной дистилляции. Автору удалось добиться степени извлечения углеводородов, равной 17%. Кубовый остаток, образовавшийся в результате отгонки легких фракций, подвергался нагреву до 225<sup>0</sup>С в течение 2 ч 30 мин в присутствии 2,5% массовых хлорида алюминия, катализирующего процесс полимеризации, приводящие к образованию битума. Велось исследование отходов нефтешлама с малым содержанием механических примесей, ввиду чего битум обладал высокой пластичностью и являлся пригодным для получения битумных красок [35].

Четвертая работа также является обзорной, в ней ставится вопрос разработки комплексного подхода к переработке отходов нефтешламов, на первой стадии предлагается очистка от механических примесей и воды гидромеханическими методами, в частности центрифугированием. На второй стадии углеводородная часть разделяется, часть подвергается вакуумной дистилляции, вторая – при атмосферном давлении, третья подвергается окислительной полимеризации. В результате качественный и количественный состав трех потоков сильно различается, при их смешении в разных пропорциях предлагается получать строительные материалы, битум для дорожного строительства и гидроизолирующие материалы [36].

Пятая работа также является обзорной, основные ее положения согласуются с работой первого автора. Стоит отметить, что автор обращает внимание на физические методы разрушения обратных эмульсий – электрокинетический метод, заключающийся в агрегации частиц фазы под действием приложенного к системе напряжения, и метод ультразвуковой. Автор отмечает, что эти методы, применительно к переработке нефтешламов, в настоящий момент мало изучены [37].

Подведем итог проведенного обзора, проведем анализ тенденций, наблюдаемых в области переработки нефтяных шламов: рассмотрены три группы методов переработки нефтяных шламов. Первая группа методов нацелена на выделение отдельных фракций и их использовании в промышленном производстве. Методы данной группы основаны на осуществлении гидромеханических и теплообменных процессов.

Из гидромеханических методов наиболее приемлемы фильтрация и центрифугирование. Фильтрация осложняется высокой вязкостью смеси, ее разнородностью, высоким износом фильтрующих поверхностей и высоких площадях фильтрования при сравнительно малой производительности, что ведет к увеличению затрат на изготовление и ремонт аппаратов.

Увеличение частоты вращения барабана центрифуги приводит к снижению расхода материалов на изготовление аппарата, но увеличивает расход электроэнергии на привод машин. Оптимальное соотношение частоты вращения и параметров конструкции центрифуг – основная задача технико–экономического расчета. Увеличение параметров центрифуги при постоянной частоте вращения увеличивает производительность. Высокая концентрация твердых частиц ведет к уменьшению скорости осаждения и увеличению расхода электроэнергии, увеличению потребной поверхности осаждения. Таким образом, высокое содержание механических примесей ограничивает использование гидромеханических методов.

В теплообменных процессах наблюдается тенденция к интенсификации процессов отгонки отдельных фракций за счет создания вынужденной циркуляции, турбулизации потока, увеличения поверхности массопередачи, использования вакуума для снижения температуры кипения, что одновременно увеличивает расход материалов на аппарат и расход энергии на привод машин, но в то же время интенсифицирует процесс, сокращает время его осуществления и увеличивает выход целевых фракций. В то же время ведутся работы по использованию новых принципов нагрева, как использование индукционных токов или сверхвысокочастотного излучения. Основным преимуществом последнего является бесконтактный нагрев и снижение требований к величине поверхности теплопередачи, что существенно снижает расход материала на теплообменное оборудование [19].

Вторая группа методов ставит целью прямое использование шлама как вторичного ресурса, преимущественно в качестве топлива или сырья для дорожного строительства или производства строительных материалов. Подавляющее большинство процессов требует высокого содержания смолисто-асфальтовых веществ в шламе, что позволяет использовать его в качестве связующего и экономить расход прочих связующих, в частности битума. Таким образом, использование шламов в данном направлении ограничивается их групповым составом.

К третьей группе методов относится технология, используемая в настоящее время в АО «Самаранефтегаз».

По действующему технологическому регламенту компания может проводить ремедиацию нефтезагрязнённых почв, грунтов и буровых шламов с использованием препарата «Гумиком», что соответствует первой, второй и третьей технологическим линиям. В рамках данной работы будет рассмотрена вторая технологическая линия.

Ниже на рисунке 2 представлена схема технологического процесса, включающего 6 этапов. Стадии первого этапа рассмотрим в таблице 2. Схему временной технологической площадки приведем на рисунке 3.

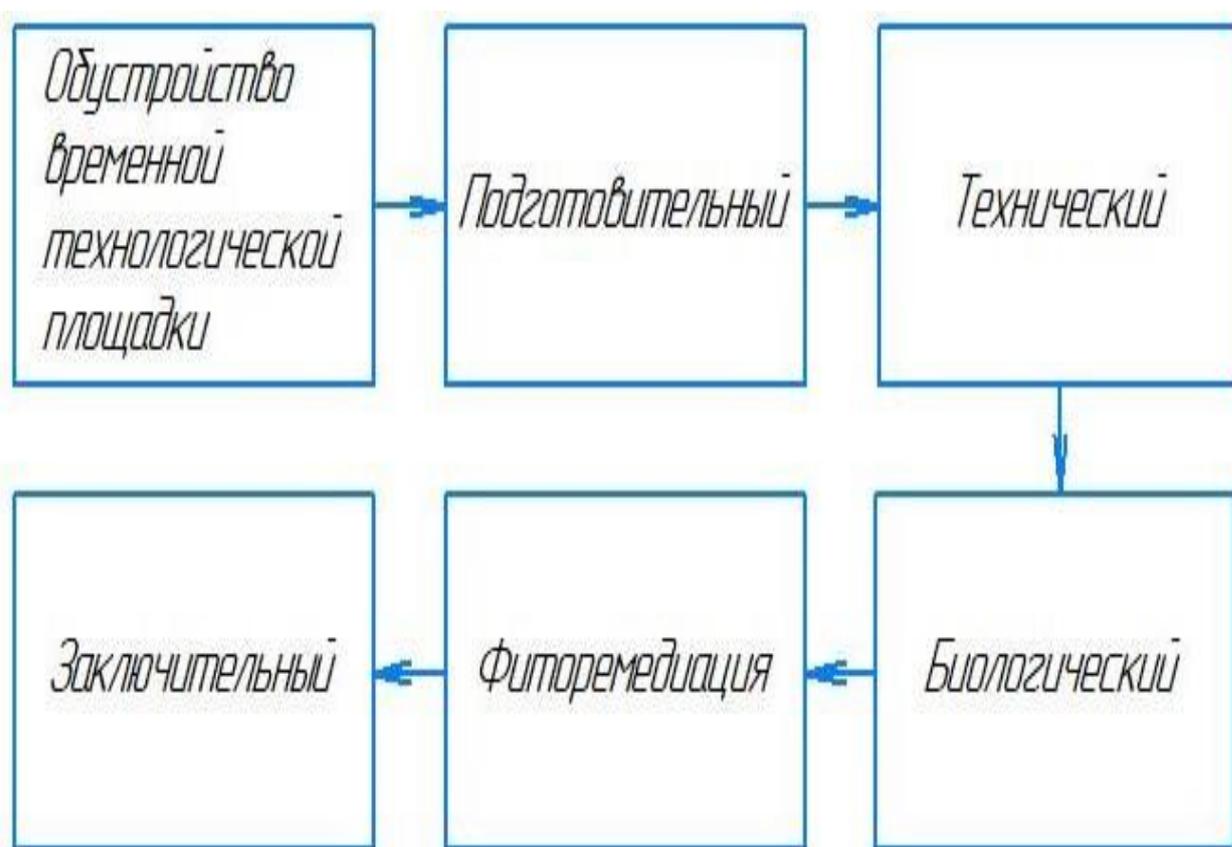


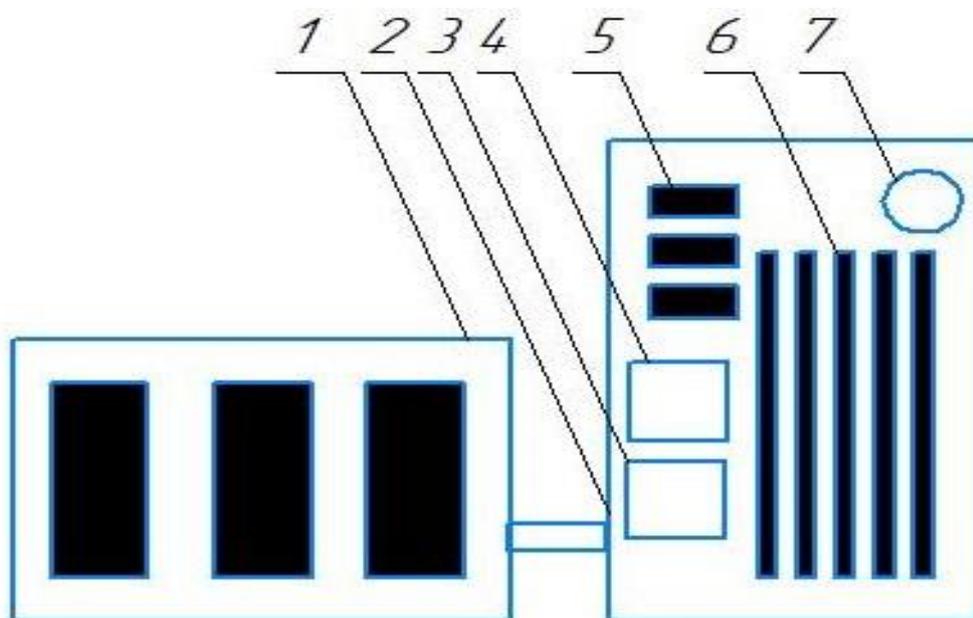
Рисунок 2 – Функциональная схема второй технологической линии

Таблица 2 - Стадии первого этапа технологического процесса

Стадия	Мероприятия
Снятие плодородного слоя	Проводится посредством тяжёлой техники, на основании инженерно-геологической, гидрологической и климатической оценки участка
Создание гидроизолирующего слоя	Не ведётся только на глинистых слабофильтрующих почвах
Обустройство дренажной системы	Производится обваловка технологической площадки и обустройство дренажной канавы на нижнем её склоне для предотвращения попадания дождевых вод на территорию площадки и утечки дождевых вод с неё
Покрытие площадки слоем сорбента	В качестве сорбента используются солома либо опилки
Водообеспечение	Обустройство источника технической воды
Обустройство площадок для стоянки техники и обмывки колес	Последняя оборудуется в случае, если предполагается использование площадки сроком более трёх лет

Подготовительный этап заключается в аналитическом контроле поступающего нефтезагрязнённого грунта, расчёт дозировки микробиологического препарата, минеральных удобрений, структуратора-грунта, смешиваемого с нефтешламом в соотношении один к одному, и доставке всех компонентов на производственную площадку.

Технический этап заключается в формировании буртов, в которых производится биологическая деструкция отхода. Размещение отхода осуществляется между двумя соседними гребнями бурта. Бурты представляют собой земляные насыпи в виде параллельных гребней, максимальной высоты - 5 метров, и максимального расстояния между гребнями - 10 метров.



Обозначения: 1 - площадка размещения отхода; 2 - временная технологическая площадка обезвреживания; 3 - пункт обмыва колёс ; 4 - пункт размещения техники; 5 - пруды размещения водоземulsionной смеси; 6 - бурты; 7 - пункт водоснабжения.

Рисунок 3 - Схема технологической площадки

Биологический этап заключается в смешении шлама со структуратором-грунтом, их утрамбовке и перемещении в бурты с помощью тяжёлой техники. Далее вносят микробиологический препарат и минеральные удобрения. В период вегетации микроорганизмов смесь перемешивают и вносят дополнительные дозы препарата.

После двух месяцев вегетации микроорганизмов на обезвреживаемом грунту ведётся посев фитомелиорационных культур (мятлик, тимофеевка, клевер). В конце вегетационного периода проводится их покос и заделка в обезвреживаемый грунт путём щелевания либо обработки фрезерным плугом, в случаях высокого содержания металлов в почвах металлов вывозятся на полигоны размещения отходов.

На заключительном этапе ведётся контроль содержания в грунте нефтепродуктов и тяжелых металлов, в случае если данные показатели соответствуют нормам, то осуществляется отгрузка грунта, в случае

несоответствия дальнейшая ремедиация грунта проводится в следующий вегетационный период.

На выходе получают грунт органоминеральный марок Б и В. Первый используется при рекультивации на землях промышленного назначения и дорожном строительстве, второй – при обустройстве полигонов твердых бытовых отходов [28].

### 1.3 Технологический процесс кавитационной переработки отходов нефтешлама

В настоящее время в АО «Самаранефтегаз» разрабатывается технология кавитационной переработки отходов нефтешлама, которую можно отнести к первой группе методов, так как ее осуществление позволяет извлечь из отхода ценные компоненты и использовать их непосредственно в производстве. Обобщенная схема технологического процесса кавитационной переработки нефтешлама приведена на рисунке 4.

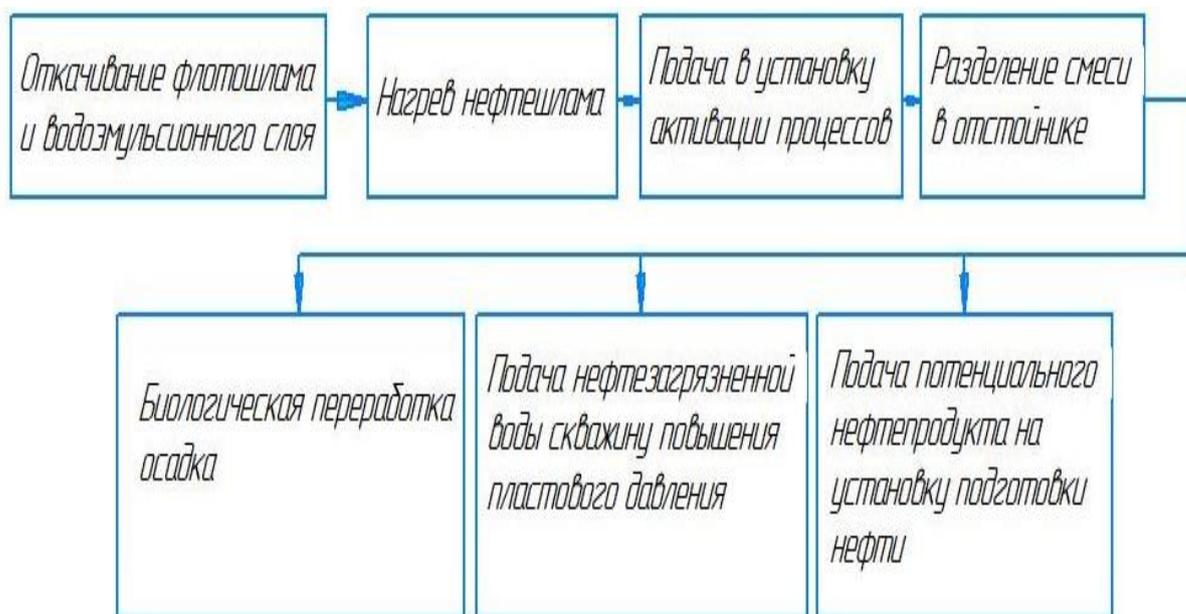


Рисунок 4 – Функциональная схема технологического процесса

Откачивание слоя флотошлама и водоземulsionного слоя осуществляется шламовым насосом.

Смесь откачивается в теплообменный аппарат, где идет его нагрев до рабочей температуры – 50<sup>0</sup>С.

Из теплообменника нагретый до рабочей температуры шлам откачивается в установку активации процессов. При дросселировании жидкости через дроссель – резко сужающийся участок трубопровода, образующий местное сопротивление, наблюдается снижение давления в жидкости, что согласно закону Генри ведёт к уменьшению растворимости газа в жидкости, таким образом, наблюдается процесс образования пузырьков из пересыщенного раствора. В следующей за дросселем камере на образовавшуюся газовую эмульсию воздействуют посредством генерируемых ультразвуковых волн, что приводит к схлопыванию пузырьков и генерации очагов высоких давлений в точках схлопывания пузырьков, результатом чего является измельчение взвешенных в воде капель нефтепродуктов и частиц механических примесей.

Диспергированная смесь поступает в отстойник, где происходит разделение смеси на три потока – осадок, нефтезагрязненную воду и легкий всплывший нефтепродукт.

Осадок перерабатывается биологическим способом с образованием органоинерального грунта.

Нефтезагрязненная вода подается в скважину повышения пластового давления для увеличения нефтеотдачи пласта.

Всплывший нефтепродукт, прошедший аналитический контроль, поступает на установку подготовку нефти, где осуществляется его сепарация, обезвоживание и обессоливание, после чего подготовленный нефтепродукт поступает в основной технологический цикл производства [21].

## 1.4 Теоретические основы теплообменных процессов и сравнительный анализ теплообменных аппаратов

Здесь и в дальнейших расчётах будем использовать теорию подобия, приступим к рассмотрению её основных положений.

Исследование технических систем связано с выполнением измерений. Для измерений человечеством введены шкалы первичных и вторичных единиц измерений. Первичные наиболее используемы, вторичные являются производными первичных. В теплотехнике первичными величинами являются линейный размер, масса, время и температура.

Теория подобия ставит целью описание сущности процессов, чему порой мешает привязанность к указанным системам измерений. Для этого переходят к критериальным уравнениям, состоящим из критериев подобия – безразмерных комплексов, состоящих из основных параметров, характеризующих соотношение сил, действующих на жидкость.

В общем виде критериальное уравнение имеет вид формулы 1, для расчётов применяется формула 2:

$$\pi = f(\pi_1; \pi_2; \pi_3), \quad (1)$$

$$\pi = A \cdot \pi_1^{m_1} \cdot \pi_2^{m_2} \cdot \pi_3^{m_3}, \quad (2)$$

где  $\pi_i$  – безразмерный критерий подобия;

$A$  – коэффициент уравнения;

$m_i$  – коэффициент, характеризующий взаимосвязь критериев.

Указанные коэффициенты определяются экспериментально.

Согласно теореме Бэкингема зависимость между  $n$  размерными величинами может быть преобразовано в критериальное уравнение из  $k$  безразмерных комплексов, причем разность  $n$  и  $k$  равняется  $z$  – числу первичных единиц измерения, как уже упоминалось в теплотехнике их четыре.

Выделяют три механизма передачи тепла – теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение.

Теплопроводность – молекулярный перенос теплоты за счёт хаотичного движения частиц среды. Подчиняется закону Фурье, запишем его в дифференциальном виде с помощью оператора – градиента, формула 3:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}T, \quad (3)$$

где  $q$  – тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;

$\lambda$  – теплопроводность среды, Вт/(м·К);

$T$  - температура, К.

Тепловое излучение заключается в излучении и поглощении телом излучения. При взаимодействии с излучением часть теплоты поглощается телом, часть проводится им, третья-отражается, к тому же нагретое тело само становится источником излучения, таким образом, взаимодействие с излучением – сложный физический процесс. Запишем закон Стефана – Больцмана для серого тела, формула 4:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  – степень черноты;

$\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

Конвекция – процесс переноса теплоты с потоком вещества, всегда сопровождается теплопроводностью. При движении жидкости вдоль стенки образуются гидродинамический и тепловой слои, причем тепловой меньше и входит в состав гидродинамического. Если в основном объёме жидкости преобладает конвективный перенос теплоты, то на границе с гидродинамическим слоем его доля в общем тепловом потоке снижается, а в

тепловом слое, ближайшем к стенке, преобладает передача тепла теплопроводностью. Рост теплового слоя при ламинаризации потока с точки зрения теплопередачи является ограничивающим фактором, вследствие этого прибегают к различным способам предотвращения роста теплового слоя – турбулизации потока, изменению геометрии стенки.

Запишем фундаментальное уравнение теплопередачи, описывающее зависимость количества переданной теплоты от параметров аппарата и потоков, формула 5:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta T_{\text{ср}}, \quad (5)$$

где  $Q$  – количество теплоты, Вт;

$K$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$F$  – поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>;

$\Delta T_{\text{ср}}$  – средняя разность температур, К.

Коэффициент теплопередачи показывает, какое количество теплоты переходит от первой среды ко второй через единицу площади в единицу времени, обратная величина сумме термических сопротивлений сред, стенки и загрязнений на стенке с обеих сторон, определяется по формуле 6:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + r_{\text{з1}} + r_{\text{з2}}}, \quad (6)$$

где  $\alpha_i$  – коэффициент теплоотдачи от  $i$ -го потока, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\delta_{\text{ст}}$  – толщина стенки, м;

$r_{\text{зи}}$  – сопротивление загрязнений со стороны  $i$ -го потока, м<sup>2</sup>·К/ Вт.

Коэффициент теплоотдачи показывает, какое количество теплоты передаётся от стенки к среде (или наоборот) на единицу поверхности в единицу времени. Определяется с помощью ряда критериальных уравнений.

Перед тем как привести данные уравнения, рассмотрим критерии подобия процессов теплоотдачи и ряд критериев гидродинамического подобия.

Критерий Фурье характеризует неустановившиеся процессы теплоотдачи, определяется по формуле 7. Входящую в его состав температуропроводность определяют по формуле 8:

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{l^2}, \quad (7)$$

где  $a$  – температуропроводность,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$\tau$  – время, с;

$l$  – определяющий линейный размер, м.

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}, \quad (8)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

$\rho$  – плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Высокими значениями критерия Фурье обладают среды с высокой теплопроводностью и сравнительно малыми теплоёмкостью и плотностью, что способствует установлению процесса, равномерному распределению теплоты в потоке.

Критерий Пекле характеризует отношение теплоты, переносимой конвекцией, к теплоте, переносимой теплопроводностью, высокие значения характерны для сред с высокими плотностью и теплоёмкостью, определяется по формуле 9:

$$Pe = \frac{w \cdot l}{a}, \quad (9)$$

где  $w$  – скорость потока,  $\text{м}/\text{с}$ .

Основной критерий – критерий Нуссельта, из которого выражают коэффициент теплоотдачи. Характеризует отношение суммарной теплоты,

переносимой конвекцией и теплопроводностью, к теплоте, переносимой теплопроводностью, определяется по формуле 10:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (10)$$

Критерий Прандтля – модифицированный критерий подобия, полученный соотношением критериев Пекле и Рейнольдса. Критерий Рейнольдса – основной гидродинамический критерий, характеризующий режимы течения жидкости. Критерии Рейнольдса и Пекле определяются по формулам 11 и 12 соответственно:

$$Re = \frac{w \cdot l \cdot \rho}{\mu}, \quad (11)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c}{\lambda}, \quad (12)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость, Па·с.

Критерий Фруда – гидродинамический критерий подобия, характеризующий отношение инерционных сил к силам тяжести, определяется по формуле 13:

$$Fr = \frac{w^2}{g \cdot l}, \quad (13)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

Критерий Грасгофа характеризует отношение подъемной силы, вызванной возникновением разности плотностей при неоднородном поле температур в среде, к силам вязкости, определяется по формуле 14:

$$Gr = \frac{g \cdot l^3 \cdot \Delta T \cdot \beta \cdot \rho^2}{\mu^2}, \quad (14)$$

где  $\beta$  – коэффициент объёмного расширения, 1/К;

$\Delta T$  – разность температур стенки и среды, К.

Коэффициент объёмного расширения определяется исходя из плотности нефтепродукта.

Критерий гомохронности – критерий гидродинамического подобия, характеризует неустановившиеся процессы, определяется по формуле 15:

$$Ho = \frac{w \cdot \tau}{l}, \quad (15)$$

Запишем критериальное уравнение теплоотдачи в общем виде, формулу 16:

$$Nu = f(Fo, Pe, Ho, Fr, Re), \quad (16)$$

При установившемся режиме исключаются критерии Фурье и гомохронности, получаем формулу 17. Вынужденной и естественной конвекции соответствуют формулы 18 и 19.

$$Nu = f(Pr, Fr, Re), \quad (17)$$

$$Nu = f(Re, Pr), \quad (18)$$

$$Nu = f(Gr, Pr), \quad (19)$$

Таким образом, чрезвычайно важно определить характеристики потоков и характер, происходящие в них процессов [1,5,6,7,11,12,14].

Общий алгоритм для расчёта теплообменных аппаратов приведём на рисунке 5.

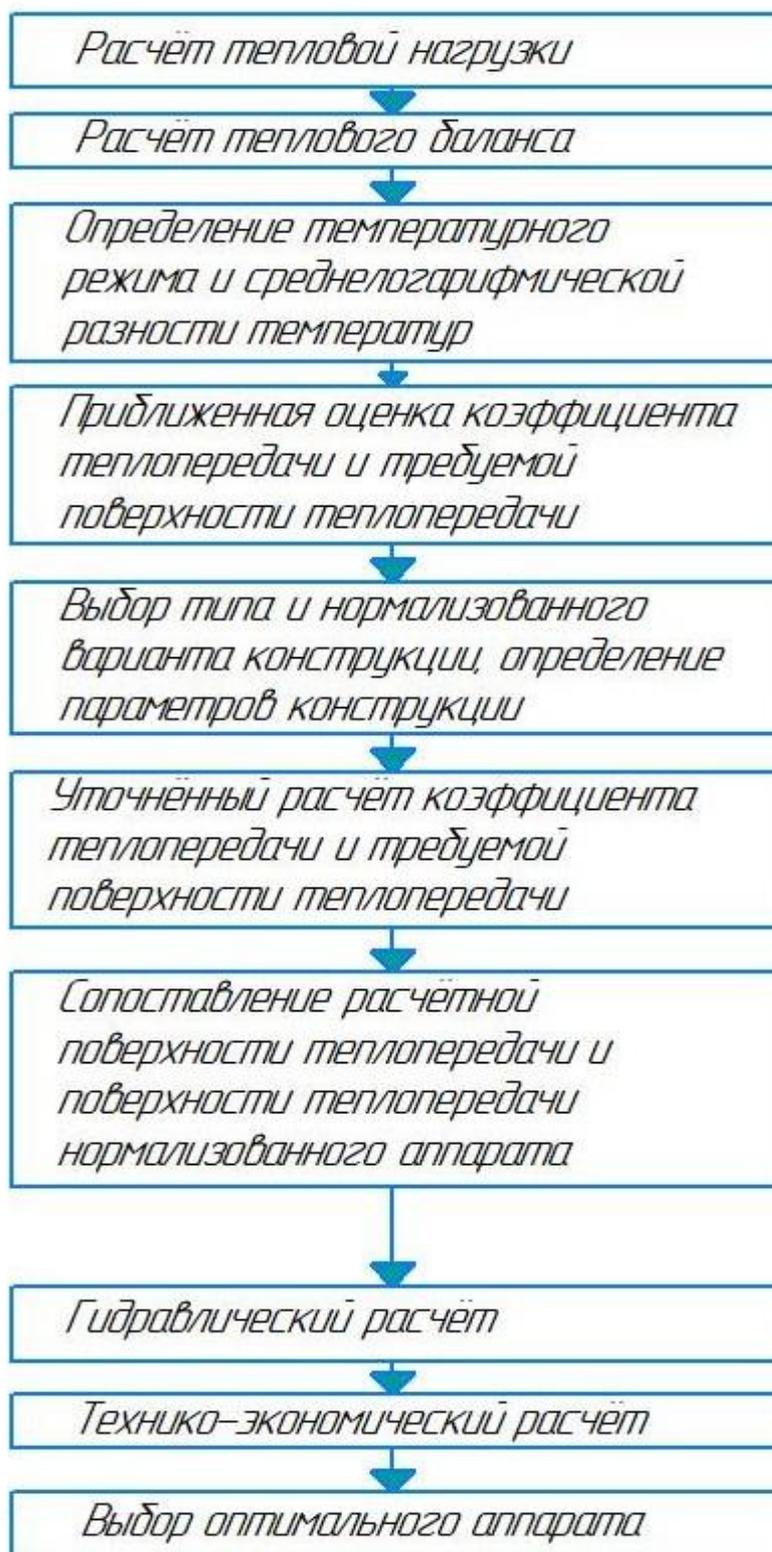


Рисунок 5 – Алгоритм расчёта теплообменных аппаратов

В таблице 3 приведём типы теплообменного оборудования, рассчитываемые в данной работе, их описание, анализ достоинств и недостатков [1,11,15].

Таблица 3 – Сравнительный анализ теплообменных аппаратов

Тип	Описание	Достоинства	Недостатки
Кожухотрубчатые	Представляют собой пучок труб, помещённых в кожух. Трубы вальцованы в трубные решетки. Трубные решетки сообщаются с распределительными камерами. Внутренняя поверхность кожуха выступает в качестве межтрубного пространства, снабжён патрубками для подвода и отвода теплоносителя. Выполняются как в одноходовом, так и многоходовых вариантах. Часто снабжаются сегментными перегородками для создания перекрестного тока. Выделяют ряд подтипов кожухотрубчатых теплообменников. Н – с неподвижными трубными решетками; К – с линзовым компенсатором неодинаковых температурных удлинений кожуха и труб; П – с плавающей головкой; У – с U-образными трубами. Могут располагаться как вертикально, так и горизонтально	Стойкость к гидроударам и низкие требования к чистоте сред, сравнительно малое гидравлическое сопротивление	Высокая удельная металлоёмкость. Жесткая фиксация двух трубных решеток в аппаратах подтипа Н допустима только при разности температур кожуха и труб не более 60 градусов ввиду возможности разрыва кожуха. Применение подтипа К ограничено давлением в кожух 1,6 Мпа, при давлениях 1,6-8 Мпа целесообразно использовать теплообменники типов У и П. Наибольшее давление в трубах выдерживает подтип У

Продолжение таблицы 3

Тип	Описание	Достоинства	Недостатки
Пластинчатые	Представляют собой набор тонких штампованных гофрированных пластин, обладающих угловыми отверстиями для прохода теплоносителей. Пластины сжимаются между подвижной и неподвижной плитами, благодаря чему между ними образуются каналы для теплоносителей. Выполняются в разборном, полуразборном и сварном виде	Низкая удельная металлоёмкость, легкость монтажа и обслуживания	Высокие требования к чистоте теплоносителя, сравнительно высокое гидравлическое сопротивление
Труба в трубе	Выполняются в однопоточном и многопоточном вариантах. Представляют собой многоходовой трубопровод, снабжённый кожухом	Простая конструкция – простота монтажа и обслуживания, сравнительно малое гидравлическое сопротивление	Сравнительно высокая удельная металлоёмкость

Вывод по разделу – в данном разделе рассмотрена проблема накопления и утилизации отходов нефтешламов, чем обосновано, что нефтешламы являются ценным потенциальным источником углеводородов. В АО«Самаранефтегаз» разрабатывается кавитационная технология, направленная на извлечение ценных компонентов. Настоящая работа посвящена разработке стадии нагрева данной технологии, для чего предлагается подход к исследованию теплофизических и реологических свойств нефтешламов – многокомпонентных гетерогенных систем, на основе проведения активного эксперимента, чем обусловлена необходимость определения количественного состава нефтешлама. Определение количественного состава будет разработано в следующей части. Приведение теоретических основ теплообменных процессов важно для последующей интерпретации разрабатываемой модели. Данные, полученные с помощью модели, будут использованы для расчета теплообменников.

## 2 Экспериментальные исследования отходов нефтешламов

### 2.1 Определение содержания нефтепродуктов

Исследование вели согласно ПНД Ф 16.1:2:2:2:2.3:3.64 – 10.

Отбрали пробу отход нефтешлама и просушили до воздушно-сухого состояния. Отбрали две навески воздушно-сухого отхода нефтешлама. Поместили навески в конические колбы. Приливали по 5 мл хлороформа и экстрагировали в течении 5 минут, после чего экстракты фильтровали через фильтры «Синяя лента» в конические колбы. Процедуру проделывали семь раз, до получения бесцветного экстракта. После сливания последних порций экстрактов навески промыли 5 мл хлороформа и слили хлороформ от промывки на фильтры.

Приготовили хроматографические колонки и смочили их гексаном. Взвесили два стаканчика. Хлороформ из колб выпаривали, когда в колбах осталось по 10 мл экстракта, его перенесли в стаканчики. Хлороформ в стаканчиках выпаривали. Осадки растворили в гексане и пропустили через хроматографическую колонку. Промыли колонки гексаном по 5мл, для удаления оставшихся нефтепродуктов, раствор из колонок поступал в заранее взвешенные стаканчики. Гексан испаряли в токе воздуха при комнатной температуре, после чего взвесили стаканчики с осадком.

Результаты измерений приведем в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты измерений

Измерение	Масса навески нефтешлама, г	Масса пустого стаканчика, г	Масса стаканчика с осадком, г
Первое	10,0250	27,1921	31,8047
Второе	10,0118	29,8494	34,4528

Массовую долю нефтепродуктов вычисляем по формуле 20:

$$X_i = \frac{A}{B} \cdot 100, \quad (20)$$

где  $A$  – найденное количество нефтепродуктов, г;

$B$  – навеска образца, взятая для анализа, г.

Среднее значение определяем по формуле 21:

$$X_{\text{ср}} = \frac{\sum X_i}{n}, \quad (21)$$

где  $n$  – число измерений.

Абсолютную погрешность рассчитываем по формуле 22:

$$\Delta = 0,01 \cdot \delta \cdot X_{\text{ср}}, \quad (22)$$

где  $\delta$  – относительная погрешность, процент;

Результат представляют в виде доверительного интервала, формула 23:

$$X = X_{\text{ср}} \pm \Delta \quad (23)$$

Произведем расчет согласно формулам 20 – 23:

$$X_1 = \frac{31,8047 - 27,1921}{10,0250} \cdot 100 = 46,011 \%$$

$$X_2 = \frac{34,4528 - 29,8494}{10,0118} \cdot 100 = 45,978 \%$$

$$X_{\text{ср}} = \frac{46,011 + 45,978}{2} = 45,995 \%$$

$$\Delta = 0,01 \cdot 32 \cdot 45,995 = 14,718 \%$$

$$X = 46,0 \pm 14,7 \%$$

Проверим приемлемость результатов по формуле 24:

$$\frac{|X_1 - X_2|}{X_{\text{ср}}} \cdot 100 \leq r, \quad (24)$$

где  $r$  – предел повторяемости, процент.

$$\frac{|46,011 - 45,978|}{45,995} \cdot 100 = 0,07 \% \leq 36 \%$$

В ходе работы определена массовая доля нефтепродуктов в нефтешламе, результат удовлетворяет условию приемлемости результатов, представлен в виде доверительного интервала [25].

## 2.2 Определение содержания механических примесей

Исследование вели согласно ГОСТ 6370-83.

Взвесили сухие фильтры в химических стаканчиках на аналитических весах.

Отбрали навеску нефтешлама, растворили в 100 мл толуола. Полученный раствор фильтровали через фильтр. Осуществляли два параллельных измерения.

По окончании фильтрования, фильтры перенесли в соответствующие химические стаканчики. Фильтры сушили в сушильном шкафу 30 минут. Затем охладили в эксикаторе, взвесили. Повторно сушили 30 минут, охладили в эксикаторе, взвесили на аналитических весах.

Масса фильтров с осадками соответствовала их массе после первой сушки, приняли последний результат за результат измерения. Результаты измерений приведем в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты измерений

Измерение	Масса навески, г	Масса подготовленного фильтра в стакане, г	Масса фильтра с осадком в стакане, г
Первое	10,0095	30,2380	32,8406
Второе	10,0056	46,4507	49,0519

Массовую долю механических примесей вычисляем по формуле 25:

$$X_i = \frac{m_1 - m_2}{m_{\text{нав}}} \cdot 100, \quad (25)$$

где  $m_1$ - масса фильтра с осадком в стакане, г;

$m_2$  - масса подготовленного фильтра в стакане, г;

$m_{\text{нав}}$ - масса навески, г.

Осуществим расчет по формулам 21 и 25:

$$X_1 = \frac{32,8406 - 30,2380}{10,0095} \cdot 100 = 26,001 \%$$

$$X_2 = \frac{49,0519 - 46,4507}{10,0056} \cdot 100 = 25,997 \%$$

$$X_{\text{ср}} = \frac{26,001 + 25,997}{2} = 25,999 \%$$

Оценим приемлемость результатов по формуле 24:

$$\frac{|26,001 - 25,997|}{25,999} \cdot 100 = 0,02 \% \leq 0,1 \%$$

Методика не предполагает статистической обработки экспериментальных данных, по этой причине примем за результат среднее значение для двух измерений, округлив его до десятых, запишем согласно формуле 23 без учета абсолютной погрешности.

$$X = 26,0 \%$$

В ходе работы определена массовая доля механических примесей в нефтешламе, результат удовлетворяет условию приемлемости результатов [8].

### **2.3 Определение содержания воды**

Исследование вели согласно ГОСТ 2477 – 2014.

Исследуемый нефтешлам обладает высокой вязкостью, поэтому перед проведением анализа его предварительно нагрели до 50 °С. Отобрали навеску нефтешлама, взвешивание проводили на технических весах. Прилили 150 мл петролейного эфира. Смесь тщательно перемешали.

В круглодонную колбу внесли подготовленную смесь, закрыли пробкой с термометром. Соединили колбу с холодильником посредством отводящей трубки. К холодильнику подсоединили подводящую и отводящую трубки от системы водоснабжения. Конденсат собирали в химический стакан. Для интенсификации процесса укрыли колбу асбестом.

Содержимое колбы нагрели с помощью электрической плитки. Перегонку вели так, чтобы из трубки холодильника в приемник-ловушку падали 2-4 капли в секунду. Нагрев прекратили после того, как объем воды в приемнике-ловушке перестал увеличиваться и верхний слой растворителя стал совершенно прозрачным. Продолжительности перегонки составила 30 минут. Капли воды, оставшиеся на стенках холодильника, стаскивали в приемник-ловушку при помощи стеклянной палочки. После охлаждения испытуемого продукта до комнатной температуры прибор разобрали. После

охлаждения разделили воду и эфир в делительной воронке, определили объем воды.

Измерения проводили дважды, результаты измерений представим в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты измерений

Измерение	Масса навески, г	Объем воды, мл
Первое	50,01	14
Второе	50,00	14

Массовую долю воды определим по формуле 26:

$$X = \frac{V_0}{m} \cdot 100, \quad (26)$$

где  $V_0$  – объем воды, мл;

$m$  – масса образца, г.

$$X = \frac{14}{50,01} \cdot 100 = 27,994 \%$$

$$X = \frac{14}{50,00} \cdot 100 = 28,000 \%$$

Найдем среднее значение согласно формуле 21:

$$X_{\text{ср}} = \frac{27,994 + 28,000}{2} = 27,997 \%$$

Методика не предполагает статистической обработки экспериментальных данных, по этой причине примем за результат среднее значение для двух измерений, округлив его до десятых, запишем согласно формуле 23 без учета абсолютной погрешности.

$$X = 28,0 \%$$

Оценим приемлемость результатов по формуле 24:

$$\frac{|28,000 - 27,994|}{27,997} \cdot 100 = 0,02 \% \leq 8 \%$$

В ходе работы определена массовая доля воды в нефтешламе, результат удовлетворяет условию приемлемости результатов [6].

#### **2.4 Определение содержания хлористых солей**

Исследование вели согласно ПНД Ф 16.2.2:2.3:3.28-02.

Приготовили водную вытяжку, для чего к 100 граммам нефтешлама прилили 720 мл дистиллированной воды, перемешивали в течение 6 часов. Отфильтровали через обеззоленный фильтр Белая лента.

Отобрали 10 мл фильтрата в коническую колбу, прилили 90 мл дистиллированной воды, добавили 0,3 мл спиртового смешанного индикатора. Раствор приобрел синюю окраску. После этого по каплям добавляли раствор 12,6 процентной азотной кислоты до желтого окрашивания, дополнительно внесли избыток 1 мл раствора кислоты. Теперь титровали раствором ртути азотнокислой (II) с молярной концентрацией 0,1 моль/л до перехода окраски исследуемой пробы в фиолетовый цвет.

В качестве холостой пробы анализировали 100 мл дистиллированной воды.

Выполнили два параллельных определения. На титрование холостой пробы израсходовано 0,1 мл, в первом измерении 0,8 мл, во втором – 0,8 мл.

Содержание хлоридов в нефтешламе определяем по формуле 27:

$$X_i = \frac{(V - V_{\text{хол}}) \cdot N \cdot 35,45 \cdot 1000 \cdot K \cdot V_2}{V_1 \cdot m_1}, \quad (27)$$

где  $V$  – объем раствора, израсходованного на титрование пробы, мл;

$V_{\text{хол}}$  – объем раствора, израсходованного на титрование холостой пробы, мл;

$N$  – нормальная концентрация раствора ртути азотнокислой, моль/л;

$K$  – поправочный коэффициент;

$V_1$  – объем пробы взятый на титрование, мл;

$V_2$  – объем дистиллированной воды взятой на разбавление, мл;

$m_1$  – масса навески, г.

Осуществим расчет согласно формуле 30, найдем среднее согласно формуле 21, абсолютную погрешность по формуле 22, представим результат в виде доверительного интервала согласно формуле 23. Проверим результат согласно условию приемлемости по формуле 24.

$$X_1 = \frac{(0,8 - 0,1) \cdot 0,1 \cdot 35,45 \cdot 1000 \cdot 1,03 \cdot 720}{10 \cdot 100} = 1840,280 \text{ мг/кг}$$

$$X_2 = \frac{(0,8 - 0,1) \cdot 0,1 \cdot 35,45 \cdot 1000 \cdot 1,03 \cdot 720}{10 \cdot 100} = 1840,280 \text{ мг/кг}$$

$$X_{\text{ср}} = \frac{1840,280 + 1840,280}{2} = 1840,280 \text{ мг/кг}$$

$$\Delta = 0,01 \cdot 10 \cdot 1840,280 = 184,028 \text{ мг/кг}$$

$$X = 1840,3 \pm 184,0 \text{ мг/кг}$$

$$\frac{|1840,280 - 1840,280|}{1840,280} \cdot 100 = 0 \% \leq 8 \%$$

В ходе работы определено содержание хлорид – иона в нефтешламе, результат удовлетворяет условию приемлемости результатов, представлен в виде доверительного интервала.

В таблице 7 приведем характеристики, определенные в подразделах 2.1 – 2.4, и требуемые показатели.

Таблица 7 – Характеристика нефтешлама

Параметр	Итоговое значение
Массовая доля нефтепродуктов	46,0 ± 14,7 %
Массовая доля механических примесей	26,0 %
Массовая доля воды	28,0 %
Содержание хлорид - иона	1840,3±184,0 мг/кг

В подразделах 2.1 – 2.4 определен количественный состав нефтешлама, также определено содержание хлорид ионов [26].

## **2.5 Описание модели, описывающей зависимость реологических и теплофизических свойств нефтешлама от содержания воды**

Разработка модели, ввиду большого объема данных и расчетов, предоставлена в приложении А, получены формулы А.22, А.28, А.33 и А.38 соответственно, отображающие зависимость плотности, вязкости, теплоемкости и теплопроводности от содержания воды в нефтешламе и температуры. На рисунке 6 представим систему уравнений, отображающую зависимость реологических и теплофизических свойств нефтешлама от содержания воды в нефтешламе и температуры.

$$\rho_{W-T} = 1063,621 - 0,632 \cdot W - 0,184 \cdot T$$

$$\mu_{W-T} = 0,0653 + 0,001 \cdot W - 0,000887 \cdot T$$

$$C_{W-T} = 1687,327 + 33,087 \cdot W + 3,167 \cdot T$$

$$\lambda_{W-T} = 0,3759 + 0,00259 \cdot W + 0,00086 \cdot T$$

Рисунок 6 – Модель реологических и теплофизических свойств нефтешлама

Основываясь на данной системе уравнений, разработали рисунки 7 – 10, отображающие модели реологических и теплофизических свойств.

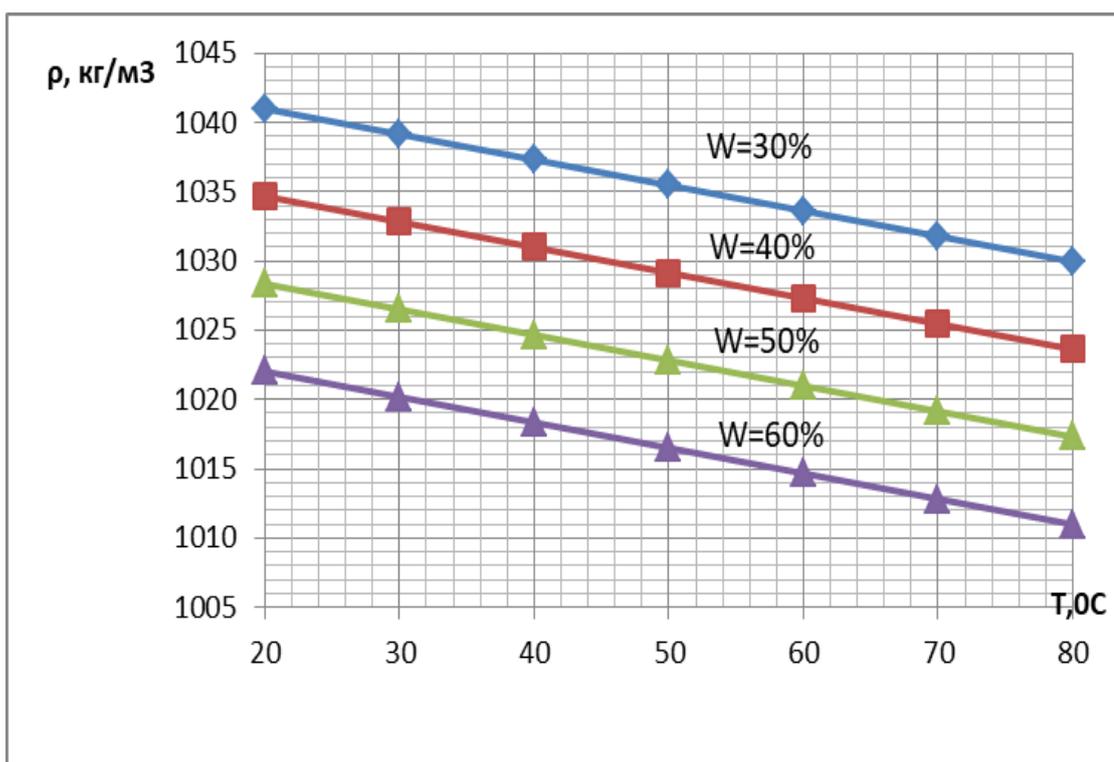


Рисунок 7 – Зависимость плотности от влажности шлама и температуры

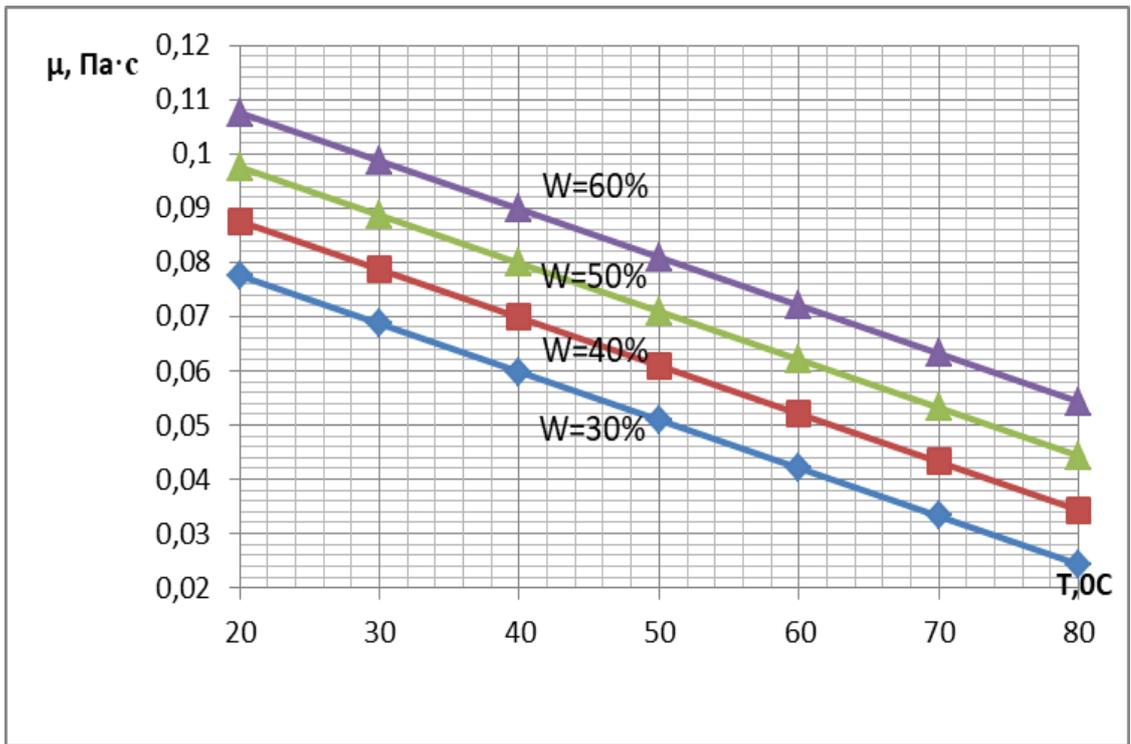


Рисунок 8 – Зависимость вязкости от влажности шлама и температуры

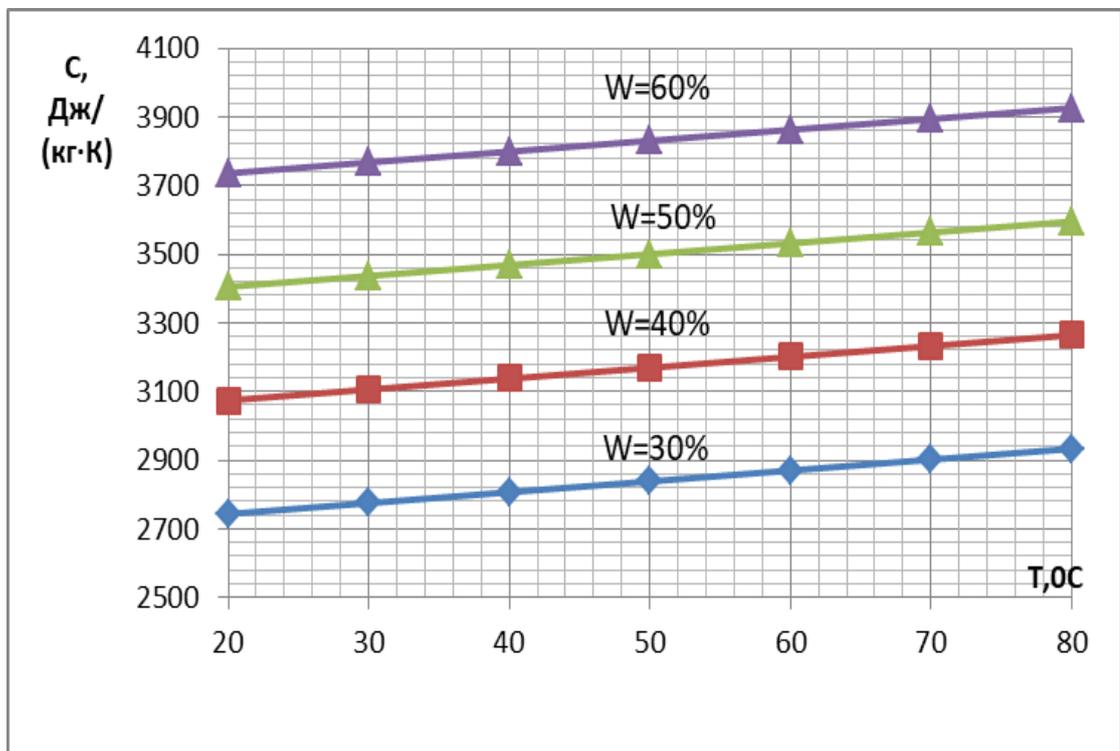


Рисунок 9 – Зависимость теплоемкости от влажности шлама и температуры

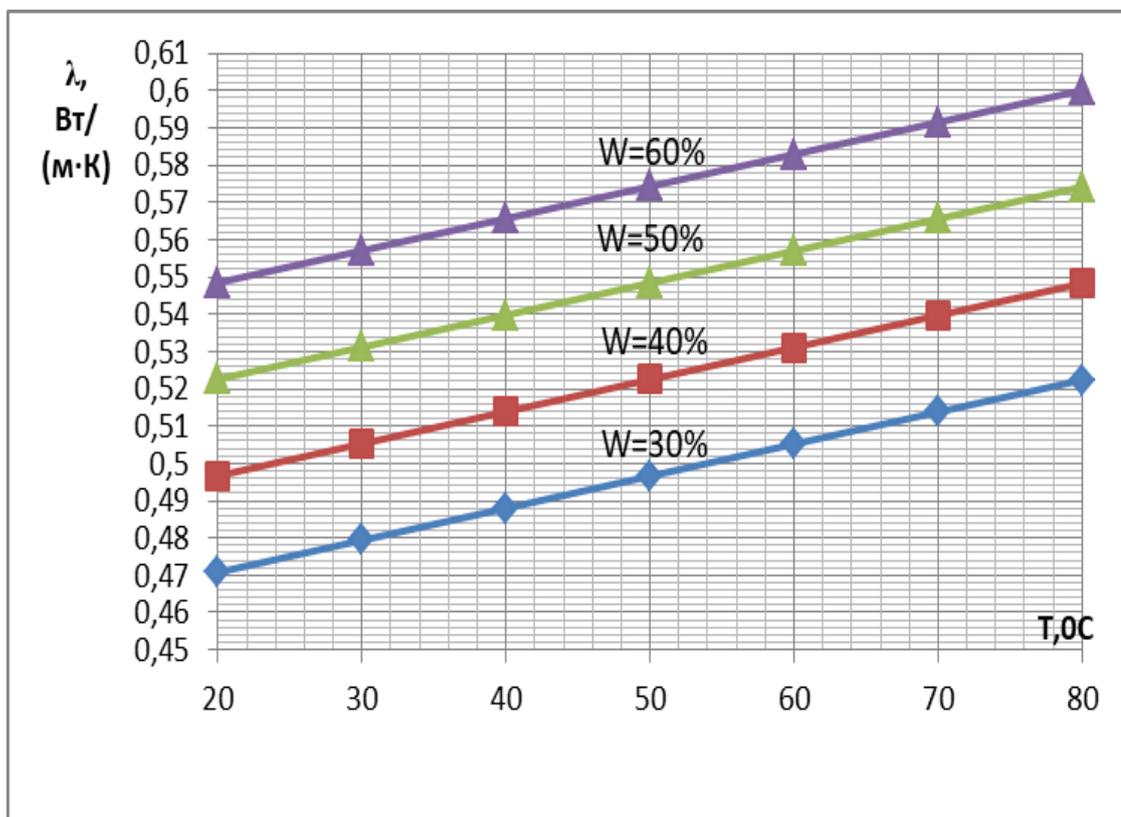


Рисунок 10 – Зависимость теплопроводности от влажности шлама и температуры

Приступим к интерпретации полученных данных. Плотность уменьшается при увеличении температуры за счет термического расширения, также уменьшается при увеличении содержания воды в нефтешламе за счет уменьшения массовой доли механических примесей, обуславливающих увеличение плотности.

При увеличении температуры вязкость уменьшается, поскольку подведенная теплота расходуется на увеличение внутренней энергии и работу против внешних сил. Внутренняя энергия, в свою очередь, включает кинетическую энергию частиц системы. Таким образом, увеличение температуры ведет к увеличению кинетической энергии частиц, что облегчает взаимное перемещение молекул.

Увеличение вязкости с увеличением содержания воды обуславливается ростом числа капель воды – дисперсной фазы, распределённой в дисперсионной среде, агрегацией этих капель и взаимодействием образовавшихся агрегатов, приводящим к увеличению доли дисперсной фазы и поверхности раздела между дисперсной фазой и дисперсионной средой.

Теплоемкость и теплопроводность увеличиваются с увеличением содержания воды, увеличение температуры также ведет к увеличению данных параметров.

Таким образом, метод полного факториального эксперимента позволяет с высокой точностью описывать зависимость теплофизических и реологических свойств от факторов – температуры и содержания воды, в заданных интервалах варьирования факторов. Данный метод особенно ценен для многокомпонентных гетерогенных систем, для которых определение указанных свойств с помощью классических расчетных методов, основанных на положении об аддитивности свойств индивидуальных компонентов, невозможно ввиду чрезвычайной сложности определения состава индивидуальных компонентов и их распределения между фазами.

Полученная модель будет использована для определения исходных данных для расчета теплообменных аппаратов, среди которых будет выбран оптимальный аппарат. Это будет осуществлено в следующем разделе.

### 3 Расчетная часть

#### 3.1 Расчет теплообменных аппаратов

Первым шагом при расчёте теплообменных аппаратов и выборе оптимального нормализованного аппарата должна быть разработка задания на проектирование. Задание разрабатывалось на основе экспериментальных и справочных данных.

При расчёте теплообменников использовать насыщенный водяной пар низкого давления из заводской сети, обладающего следующими характеристиками – давление  $P = 0,05$  Мпа, температура  $t=80^{\circ}\text{C}$ , удельная теплота парообразования  $r_1=2310000$  Дж/кг. Конденсат при этой температуре имеет плотность  $\rho_1=972$  кг/м<sup>3</sup>, динамическая вязкость  $\mu_1=0,000355$  Па·с, теплопроводность  $\lambda_1=0,675$  Вт/(м·К), теплоёмкость  $C_1=4190$  Дж/(кг·К) [24].

Реологические и теплофизические характеристики нефтешлама определить в ходе работы с помощью разработанной модели.

Предварительно приведем формулы для расчета теплообменника. Определим тепловую нагрузку по формуле 28, при расчёте учтем, что расход необходимо привести к размерности килограмм в секунду:

$$Q = G_2 \cdot C_2 \cdot \Delta t_2, \quad (28)$$

где  $G_2$  – расход нефтешлама, кг/с;

$C_2$  – теплоемкость нефтешлама при  $25^{\circ}\text{C}$ , Дж/(кг·К);

$\Delta t_2$  – разность начальной и конечной температур, К.

Определим расход пара по формуле 29:

$$G_1 = \frac{Q}{r_1}, \quad (29)$$

где  $r_1$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг.

Определим среднелогарифмическую разность температур двух обменивающихся теплотой сред по формуле 30:

$$\Delta T_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}}, \quad (30)$$

где  $\Delta t_{\text{б}}$  – большая разность температур, К;

$\Delta t_{\text{м}}$  – меньшая разность температур, К.

Примем ориентировочное значение коэффициента теплопередачи, исходя из соображений, что теплота передается от конденсирующегося водяного пара к жидкости со значительной органической составляющей, равным  $120 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Выразим из формулы 5 площадь и рассчитаем ориентировочную требуемую площадь теплообмена по формуле 31:

$$F_{\text{оп}} = \frac{Q}{K_{\text{оп}} \cdot \Delta T_{\text{cp}}} \quad (31)$$

Нагреваемая смесь обладает высокой вязкостью, поэтому теплообмен будет протекать при ламинарном течении смеси в трубах. Примем ориентировочное значение критерия Рейнольдса равным 100, наружный диаметр труб и толщина стенки согласно справочнику.

Определим отношение числа труб к числу заходов по формуле 32:

$$\frac{n}{z} = \frac{4 \cdot G_2}{\pi \cdot d_{\text{вн}} \cdot \mu_2 \cdot Re_{2\text{оп}}}, \quad (32)$$

где  $d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр трубы, м;

$Re_{2\text{оп}}$  – ориентировочное значение критерия Рейнольдса.

Выбрали нормализованный аппарат с ближайшим соотношением числа труб и числа заходов, выписали справочные значения.

В многоходовых теплообменниках движущая сила снижается ввиду смешанного тока, это необходимо учесть, рассчитывая уточненное значение движущей силы по формуле 38, для чего определяют поправку по формуле 37. Для определения поправки необходимо рассчитать ряд коэффициентов по формулам 33-36:

$$P = \frac{t_{2К} - t_{2Н}}{t_{1Н} - t_{2Н}} \quad (33)$$

$$R = \frac{t_{1Н} - t_{1К}}{t_{2К} - t_{2Н}} \quad (34)$$

$$\eta = \sqrt{R^2 + 1} \quad (35)$$

$$\delta = \frac{R-1}{\ln[(1-P)/(1-P \cdot R)]} \quad (36)$$

$$\varepsilon = \frac{\eta/\delta'}{\ln[(2-P \cdot (1+R-\eta))/(2-P \cdot (1+\eta+R))]} \quad (37)$$

$$\Delta T_{cp\varepsilon} = \varepsilon \cdot \Delta T_{cp} \quad (38)$$

Если после введения поправки средняя разность температур меняется, то ориентировочную требуемую поверхность пересчитывают.

Рассчитаем модифицированный критерий Рейнольдса для многоходовых теплообменных аппаратов по формуле 39, критерии Прандтля и Грасгофа (разность температур, учитываемая в критерии Грасгофа, принимается равной среднелогарифмической разнице температур между стенкой и нефтешламом) по формулам 12 и 14 соответственно:

$$Re_2 = \frac{4 \cdot G_2 \cdot z}{\pi \cdot d_{вн} \cdot \mu_2 \cdot n} \quad (39)$$

Определим температуру стенки со стороны пара по формуле 40, температуру стенки со стороны шлама определим по формуле 41, исходя из этого, определим характеристики нефтешлама при температуре стенки. Определяем произведение критериев Прандтля и Грасгофа по формуле 42. Если произведение критериев Прандтля и Грасгофа превышает 500000, наступает вязкостно-гравитационный режим, когда пренебречь свободной конвекцией нельзя, расчет коэффициента теплоотдачи от шлама ведут по формуле 44. В случае если произведение критериев Грасгофа на критерий Прандтля меньше или равен 500000, влияние свободной конвекции не учитывается, при выборе формулы смотрят на значение, полученное по формуле 43. Если оно больше 12, то используют формулу 45, если меньше или равно – по формуле 46. Расчет коэффициента теплоотдачи от пара ведём по формуле 47:

$$t_{ст1} = t_1 - \frac{K_{оп} \cdot \Delta T_{ср}}{a_{1 оп}}, \quad (40)$$

$$t_{ст2} = t_{ст1} - \frac{Q \cdot \ln \frac{d_{внеш}}{d_{вн}}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{ст} \cdot L \cdot n}, \quad (41)$$

где  $d_{внеш}$  – наружный диаметр труб, м.

$$Gr_2 \cdot Pr_2, \quad (42)$$

$$Re_2 \cdot Pr_2 \cdot \frac{d}{L}, \quad (43)$$

$$\alpha_2 = 0,15 \cdot \frac{\lambda}{d_{вн}} \cdot (Re_2 \cdot Pr_2)^{0,33} \cdot (Gr_2 \cdot Pr_2)^{0,1} \cdot \left(\frac{Pr_2}{Pr_{2 ст}}\right)^{0,25}, \quad (44)$$

$$\alpha_2 = 1,61 \cdot \frac{\lambda}{d_{вн}} \cdot \left(Re_2 \cdot Pr_2 \cdot \frac{d_{вн}}{L}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\mu_2}{\mu_{2 ст}}\right)^{0,14} \quad (45)$$

где  $\mu_{2 ст}$  – вязкость нефтешлама при температуре стенки, Па·с.

$$\alpha_2 = 3,66 \cdot \frac{\lambda}{d_{\text{вн}}} \cdot \left( \frac{\mu_2}{\mu_{2 \text{ ст}}} \right)^{0,14} \quad (46)$$

$$\alpha_1 = 2,02 \cdot \varepsilon \cdot \lambda_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_1^2 \cdot L \cdot n}{\mu_1 \cdot G_1}}, \quad (47)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент, зависящий от числа труб.

Рассчитаем уточненный коэффициент теплопередачи по формуле 6 и уточненную требуемую поверхность теплообмена, после рассчитываем запас поверхности теплообмена по формуле 48:

$$\Delta = \frac{F - F_y}{F} \cdot 100 \quad (48)$$

Приступим к гидравлическому расчёту аппарата и определим гидравлическое сопротивление нагреваемой среде. Определим скорость жидкости в трубах по формуле 49, скорость жидкости в штуцерах по формуле 50:

$$w_{\text{тр}} = \frac{4 \cdot G_2}{\pi \cdot d^2 \cdot n \cdot \rho_2}, \quad (49)$$

$$w_{\text{шт}} = \frac{4 \cdot G_2}{\pi \cdot d_{\text{шт}}^2 \cdot \rho_2}, \quad (50)$$

где  $d_{\text{шт}}$  – внутренний диаметр штуцера, м.

Определим коэффициент гидравлического сопротивления для ламинарного режима течения по формуле 51:

$$\lambda_c = \frac{A}{Re_2} \quad (51)$$

где  $A$  – коэффициент уравнения.

Гидравлическое сопротивление трубного пространства определим по формуле 52:

$$\Delta p_{\text{тр}} = \lambda \cdot \frac{L \cdot z}{d} \cdot \frac{\rho_2 \cdot w_{\text{тр}}^2}{2} + (2,5 \cdot (z - 1) + 2 \cdot z) \cdot \frac{\rho_2 \cdot w_{\text{тр}}^2}{2} + 3 \cdot \frac{\rho_2 \cdot w_{\text{ш}}^2}{2} \quad (52)$$

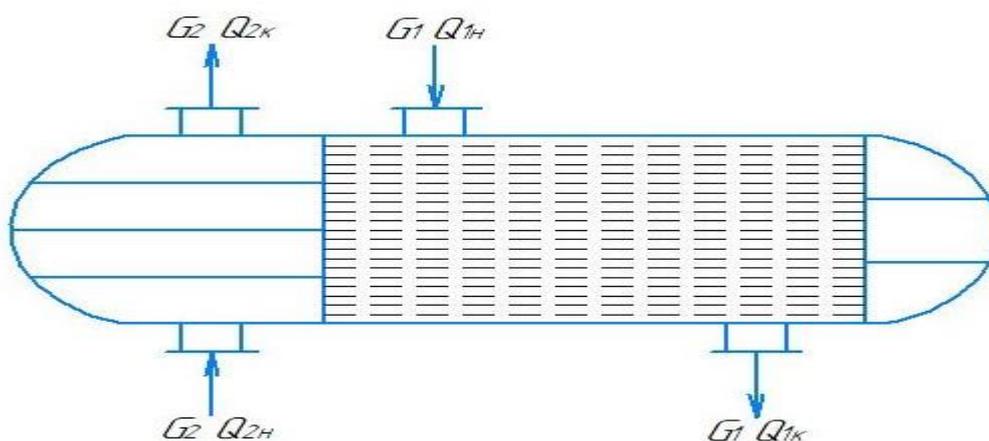
При конденсации пара наблюдается многократное изменение плотности потока и его объёмного расхода, в этом случае гидравлический расчёт не ведут.

Расход нефтешлама 60 м<sup>3</sup>/ч, нагрев вести от 10 до 50<sup>0</sup>С. Переведем объёмный расход в массовый по формуле 53:

$$G_2 = \frac{V_2 \cdot \rho_2}{3600} \quad (53)$$

где  $V_2$  – объёмный расход нефтешлама, м<sup>3</sup>/ч.

На рисунке 11 приведём схему кожухотрубчатого теплообменного аппарата, совмещённую со схемой потоков.



Характеристики потоков:  $G_2$  – расход нефтешлама,  $G_1$  – расход пара,  $Q_{1н}$  – начальная теплота пара,  $Q_{1к}$  – конечная теплота пара,  $Q_{2н}$  – начальная теплота шлама,  $Q_{2к}$  – конечная теплота шлама.

Рисунок 11 – Схема потоков кожухотрубчатого теплообменника

В таблице 8 приведем варианты кожухотрубчатых теплообменников, подлежащих дальнейшему расчету.

Таблица 8 – Варианты аппаратов, подлежащих расчету

Обозначение варианта	Внешний диаметр труб, м	Толщина стенок труб, м	Диаметр кожуха, м	Число труб	Число заходов	Поверхность теплообмена, м <sup>2</sup>	Длина труб, м	Масса, кг
T-1	0,025	0,002	1,2	958	6	301	4	9100
T-2	0,025	0,002	1,2	986	4	310	4	9100
T-3	0,025	0,002	0,8	465	1	329	9	7480
T-4	0,025	0,002	1,0	718	2	338	6	6100
T-5	0,020	0,002	0,8	618	6	349	9	8500
T-6	0,020	0,002	0,8	638	4	361	9	8500
T-7	0,020	0,002	1,2	1544	6	388	4	10100
T-8	0,020	0,002	1,0	1044	6	393	6	9250
T-9	0,020	0,002	1,0	1072	4	404	6	9250
T-10	0,025	0,002	1,2	958	6	451	6	13450

В ходе работы на базе программы Microsoft Excel и изложенного выше алгоритма расчета разработана программа, позволяющая автоматизировать расчет теплообменных аппаратов. Расчеты приведены в таблицах Б.1 – Б.80, которые приведены в приложении Б [11,17,24,27].

### 3.2 Выбор оптимального теплообменного аппарата

Приступим к выбору оптимального нормализованного теплообменного аппарата.

В Приложении Б приведен расчет десяти кожухотрубчатых теплообменников, причем каждый во всем диапазоне содержания влаги. Варианты Т – 1, Т – 2, Т – 3, Т – 4 и Т – 6 не подлежат дальнейшему рассмотрению, поскольку не обеспечивают запаса теплообменной поверхности более 10 процентов или демонстрируют недостаток теплообменной поверхности. Авторами технологии предложен электронагреватель X-therm, работающий от сети напряжением 220 В с частотой тока 50 Гц, максимальная мощность данного типа аппаратов 20 кВт,

что не отвечает требованиям по тепловой нагрузке, также не подлежит дальнейшему рассмотрению.

Итак, оцениваемые варианты – кожухотрубчатые теплообменники вариантов Т – 5, Т – 7, Т – 8, Т – 9 и Т - 10. Выбор оптимального нормализованного теплообменного аппарата будем вести посредством расчёта приведённых затрат. Приведем формулу 54 для расчёта приведённых затрат:

$$П = E \cdot K + Э, \quad (54)$$

где П – приведённые затраты, руб/год;

Е – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений, 1/год;

К – капитальные затраты, руб;

Э – эксплуатационные затраты, руб/год.

Критерием оптимальности при выборе оптимального теплообменного аппарата являются минимальные приведенные затраты.

Капитальные затраты определяются по формуле 55:

$$K = C_T + \beta_1 \cdot C_{H1} + \beta_2 \cdot C_{H2}, \quad (55)$$

где  $C_T$ - цена на теплообменник, руб;

$\beta_i$ - доля мощности, затрачиваемая на преодоление гидравлического сопротивления;

$C_{Hi}$ - цена насоса, руб.

В рамках данной работы не осуществлялся подбор насосов, пренебрежем стоимостью насосов и получим формулу 56:

$$K = C_T \quad (56)$$

Эксплуатационные затраты определим по формуле 57:

$$\mathcal{E} = K \cdot (k_a + k_p) + C_{\mathcal{E}} \cdot (N_1 + N_2) \cdot \tau + G_1 \cdot C_{1T} + G_2 \cdot C_{2T}, \quad (57)$$

где  $k_a$  – коэффициент амортизационных отчислений, 1/год;

$k_p$  – коэффициент затрат на ремонт, 1/год;

$C_{\mathcal{E}}$  – цена электроэнергии, руб/кВт·ч;

$N_i$  – мощность насоса, кВт;

$\tau$  – число рабочих часов в году, ч;

$G_i$  – годовой расход теплоносителя, т/год;

$C_{1i}$  – цена теплоносителя, руб/т.

Расходы потоков заданы как постоянные, и при выборе оптимального аппарата их можно исключить, получив формулу 58:

$$\mathcal{E} = K \cdot (k_a + k_p) + C_{\mathcal{E}} \cdot (N_1 + N_2) \cdot \tau, \quad (58)$$

Подставим формулы 56 и 58 в формулу 54, получим формулу 59. Преобразуем выражение, получив формулу 60. Представим сумму нормативного коэффициента эффективности капиталовложений, коэффициентов амортизационных отчислений и затрат на ремонт в виде суммарного коэффициента, получив формулу 61.

$$\Pi = E \cdot C_T + C_T \cdot (k_a + k_p) + C_{\mathcal{E}} \cdot (N_1 + N_2) \cdot \tau, \quad (59)$$

$$\Pi = (E + k_a + k_p) \cdot C_T + C_{\mathcal{E}} \cdot (N_1 + N_2) \cdot \tau, \quad (60)$$

$$\Pi = E' \cdot C_T + C_{\mathcal{E}} \cdot (N_1 + N_2) \cdot \tau. \quad (61)$$

В химической промышленности нормативный коэффициент эффективности капиталовложений равен  $0,15 \text{ год}^{-1}$ , коэффициенты амортизационных отчислений и затрат на ремонт  $0,10$  и  $0,05 \text{ год}^{-1}$  соответственно. Таким образом, суммарный коэффициент равен  $0,30 \text{ год}^{-1}$ .

Для определения мощности насосов воспользуемся формулой 62:

$$N_{T-i} = \frac{\Delta p \cdot G}{\eta_{дв} \cdot \eta_{пер} \cdot \rho \cdot 1000}, \quad (62)$$

где  $\Delta p$  – гидравлическое сопротивление, Па;

$G$  – расход среды,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$\eta_{дв}$  – коэффициент полезного действия двигателя;

$\eta_{пер}$  – коэффициент полезного действия передачи.

Из справочных данных примем коэффициенты полезного действия насоса и передачи равными  $1$  и  $0,6$  соответственно. Гидравлическое сопротивление пару не рассчитывали, поэтому при выборе оптимального аппарата ограничимся расчетом мощности насоса для перекачивания жидкости, приведенные затраты рассчитывать по формуле 63.

$$П = E' \cdot C_T + C_э \cdot N_1 \cdot \tau \quad (63)$$

Цену теплообменника определи по формуле 64, стоимость нержавеющей стали примем равной  $89$  рублей за килограмм:

$$C_T = M \cdot C_{ст}, \quad (64)$$

где  $M$  – масса аппарата, кг;

$C_{ст}$  – цена стали, руб/кг.

Примем число рабочих часов в году равным  $1920$  часам, цены на электроэнергию –  $3,36 \text{ руб/кВт}\cdot\text{ч}$ .

Приступим к расчёту, в первую очередь определим стоимость теплообменников по формуле 64, определим мощность насосов для перекачивания среды через кожухотрубчатые теплообменники по формуле 62 и приведенные затраты по формуле 63.

$$C_{T-5} = 8500 \cdot 89 = 756500 \text{ руб}$$

$$C_{T-7} = 10100 \cdot 89 = 898900 \text{ руб}$$

$$C_{T-8} = 9250 \cdot 89 = 823250 \text{ руб}$$

$$C_{T-9} = 9250 \cdot 89 = 823250 \text{ руб}$$

$$C_{T-10} = 13450 \cdot 89 = 1197050 \text{ руб}$$

$$N_{T-5} = \frac{16487,310 \cdot 17,003}{1 \cdot 0,6 \cdot 1020,181 \cdot 1000} = 0,458 \text{ кВт}$$

$$N_{T-7} = \frac{4049,180 \cdot 17,003}{1 \cdot 0,6 \cdot 1020,181 \cdot 1000} = 0,112 \text{ кВт}$$

$$N_{T-8} = \frac{7321,387 \cdot 17,003}{1 \cdot 0,6 \cdot 1020,181 \cdot 1000} = 0,203 \text{ кВт}$$

$$N_{T-9} = \frac{7136,263 \cdot 17,003}{1 \cdot 0,6 \cdot 1020,181 \cdot 1000} = 0,198 \text{ кВт}$$

$$N_{T-10} = \frac{3553,430 \cdot 17,003}{1 \cdot 0,6 \cdot 1020,181 \cdot 1000} = 0,099 \text{ кВт}$$

$$П_{T-5} = 0,3 \cdot 756500 + 3,36 \cdot 0,458 \cdot 1920 = 229904,65 \text{ руб/год}$$

$$П_{T-7} = 0,3 \cdot 898900 + 3,36 \cdot 0,112 \cdot 1920 = 270392,53 \text{ руб/год}$$

$$П_{T-8} = 0,3 \cdot 823250 + 3,36 \cdot 0,203 \cdot 1920 = 248284,59 \text{ руб/год}$$

$$P_{T-9} = 0,3 \cdot 823250 + 3,36 \cdot 0,198 \cdot 1920 = 248252,34 \text{ руб/год}$$

$$P_{T-10} = 0,3 \cdot 1197050 + 3,36 \cdot 0,099 \cdot 1920 = 359753,67 \text{ руб/год}$$

Итак, критерий оптимальности – минимальные приведенные затраты, соблюдается для кожухотрубчатого теплообменника Т - 5. Для выбранного аппарата приведем ряд зависимостей на рисунках 12-20.

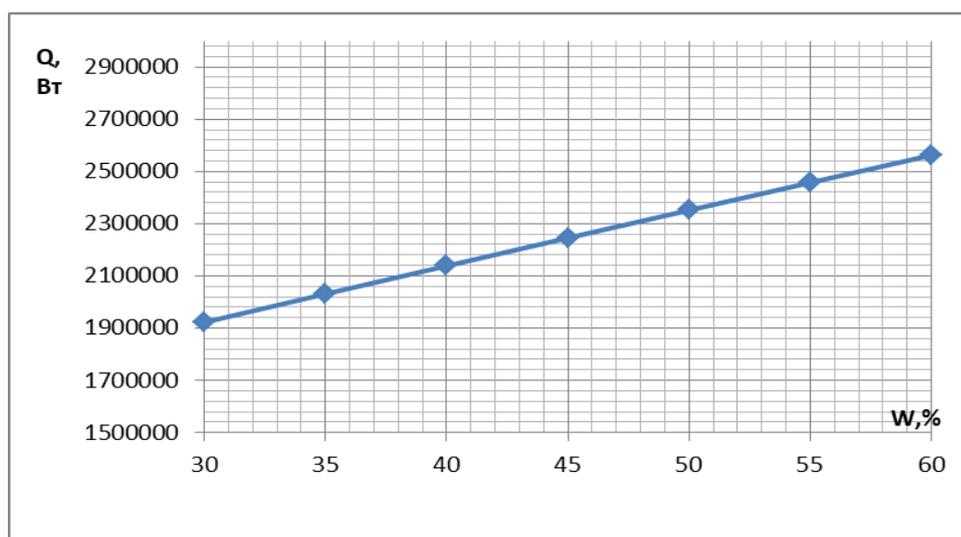


Рисунок 12 – Зависимость тепловой нагрузки от влажности

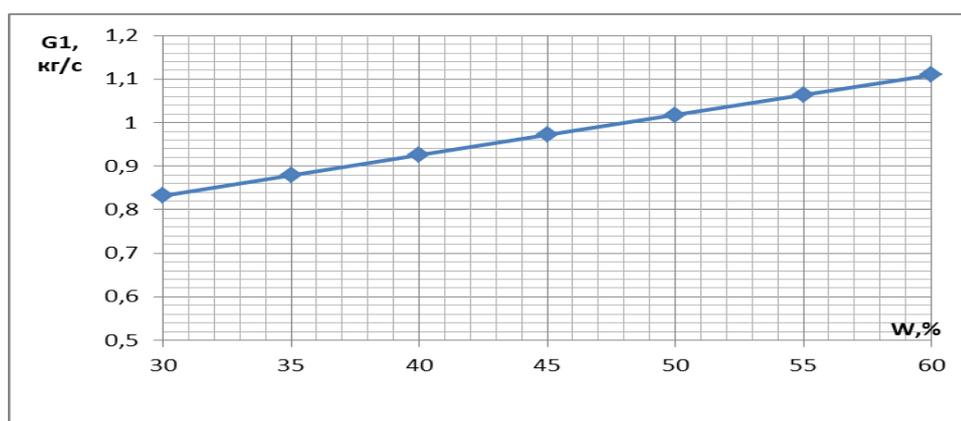


Рисунок 13 – Зависимость расхода пара от влажности

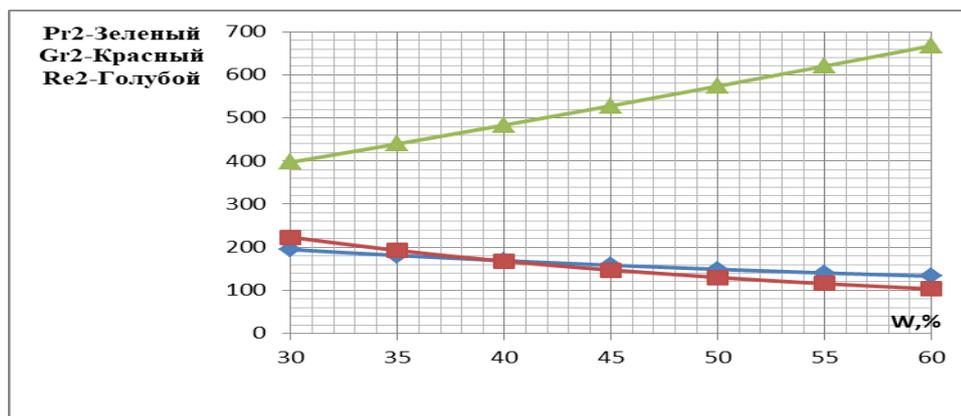


Рисунок 14 – Зависимость величины критериев от влажности

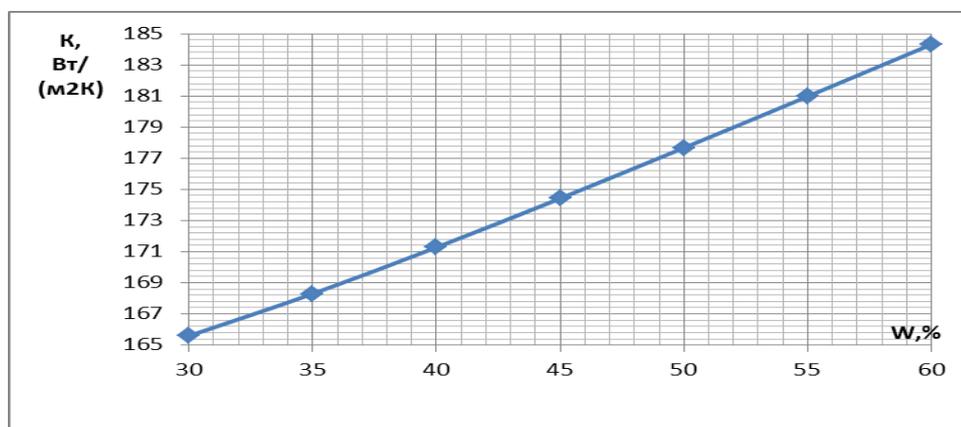


Рисунок 15 – Зависимость коэффициента теплопередачи от влажности

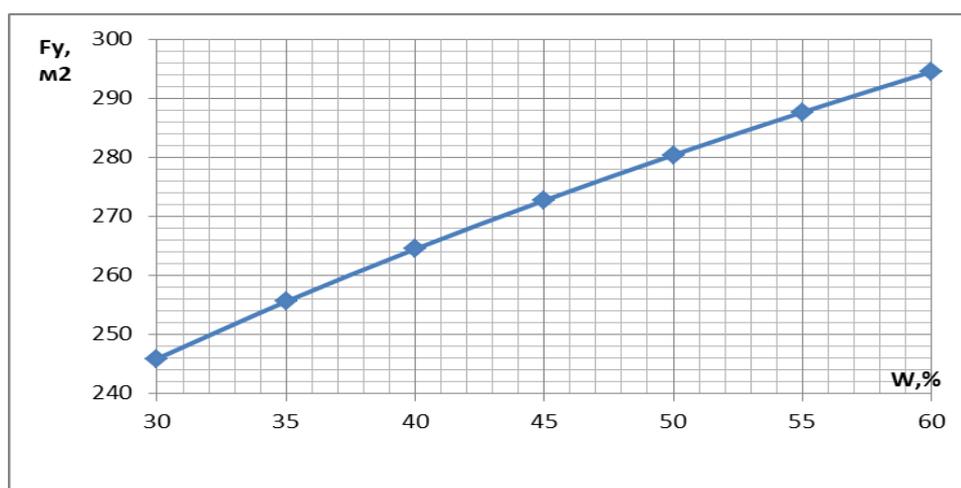


Рисунок 16 – Зависимость требуемой поверхности от влажности

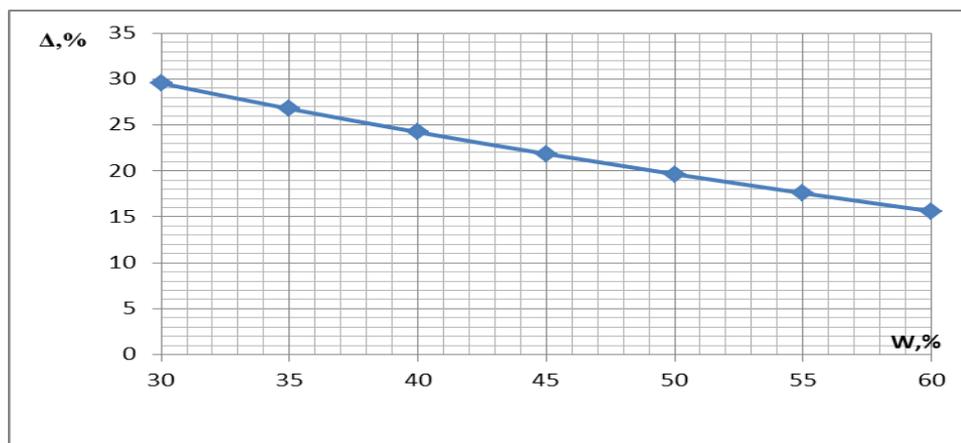


Рисунок 17 – Зависимость запаса поверхности от влажности

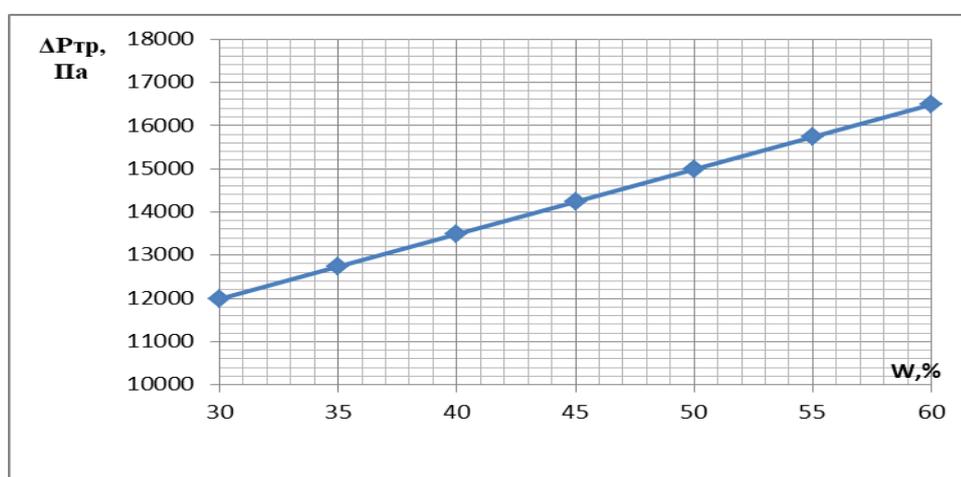


Рисунок 18 – Зависимость гидравлического сопротивления от влажности

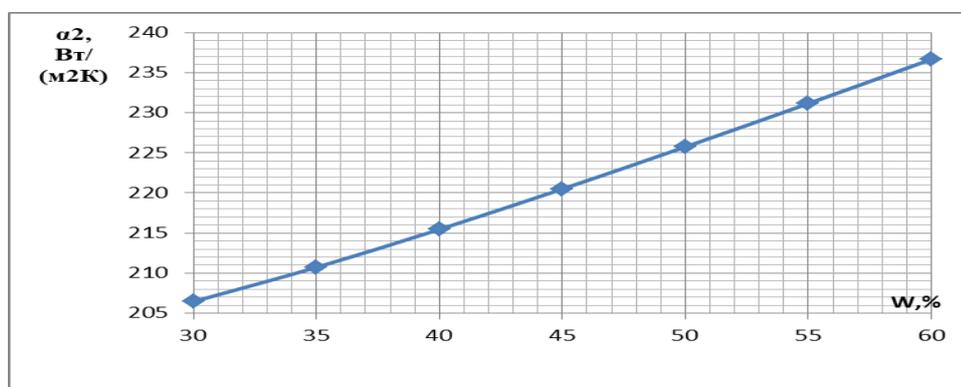


Рисунок 19 – Зависимость коэффициента теплоотдачи 2 от влажности

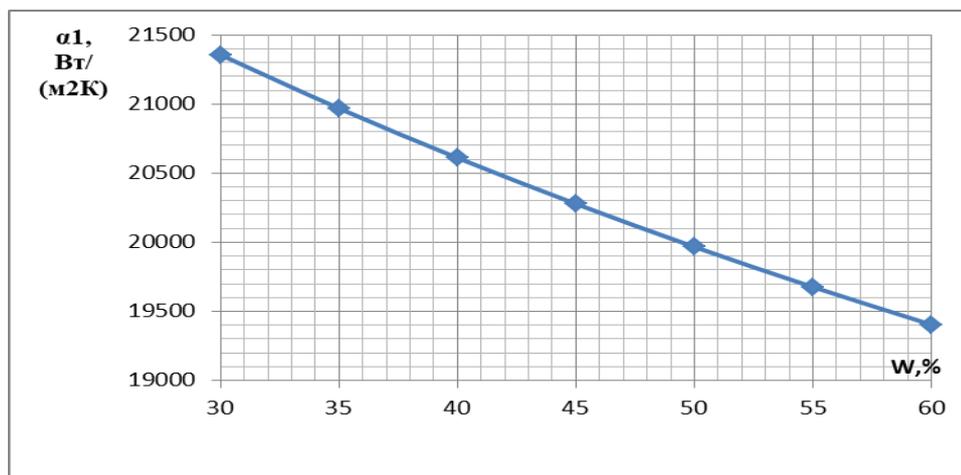


Рисунок 20 – Зависимость коэффициента теплоотдачи 1 от влажности

Интерпретируем полученные зависимости. При увеличении влажности шлама увеличивается его теплоемкость, а соответственно и тепловая нагрузка при прочих равных. В связи с увеличением тепловой нагрузки растет расход пара. При увеличении влажности наблюдаем рост критерия Прандтля, отражающего соотношение теплофизических свойств шлама, что в первую очередь связано с увеличением теплоемкости и вязкости. Наблюдаем уменьшение критерия Рейнольдса, что связано с увеличением вязкости, что и приводит к уменьшению соотношения инерционных сил и сил вязкостного трения. Наблюдаем уменьшение критерия Грасгофа, что связано с уменьшением плотности и увеличением вязкости. Наблюдаем рост коэффициента теплоотдачи от шлама в связи с увеличением критерия Прандтля и теплопроводности, коэффициент теплоотдачи от пара несколько снижается с ростом расхода пара, однако коэффициент теплопередачи увеличивается, то есть в конечном счете увеличение влажности улучшает условия теплообмена, но, с другой стороны, рост тепловой нагрузки приводит к увеличению требуемой поверхности и уменьшению запаса поверхности. Уменьшение критерия Рейнольдса за счет увеличения сил вязкостного трения приводит к росту гидравлического сопротивления аппарата [11,17,24,27].

## Заключение

При написании выпускной квалификационной работы изучена проблема образования нефтешламов на территории Российской Федерации, чем обоснована актуальность проблемы, имеющей две стороны – потерю потенциального вторичного материального ресурса ввиду его захоронения и негативное воздействие объектов размещения отходов на окружающую среду.

Рассмотрены основные методы и направления их переработки. В ходе литературного обзора выявлены три группы методов переработки – с целью выделения углеводородной фракции, с целью непосредственного использования нефтешлама в качестве вторичного ресурса и с целью его обезвреживания.

Проведен анализ технологий переработки нефтешламов, применяемых в АО «Самаранефтегаз». Используемая в настоящее время биологическая технология относится к третьей группе методов. Проектируемая кавитационная технология, исследованию стадии нагрева которой посвящена настоящая работа, относится к первой группе методов, ее внедрение позволяет решить проблему потери ценного вторичного ресурса путем извлечения ценных фракций из нефтешлама.

Проведены исследования количественного состава нефтешлама. Определение содержания нефтепродуктов, воды и механических примесей было чрезвычайно важно для последующего приготовления модельных смесей, используемых для разработки математической модели. Определение содержания хлористых солей позволило обосновать коррозионную активность нефтешлама и необходимость использования нержавеющей стали в качестве конструкционного материала для изготовления теплообменников.

Разработана математическая модель, отображающая зависимость теплофизических и реологических свойств нефтешлама от содержания воды и температуры в заданных интервалах. Для разработки модели использовали

метод полного факториального эксперимента. Приведена интерпретация полученных зависимостей.

На основе приведенного алгоритма расчета разработана программа на базе Microsoft Excel, позволяющая автоматизировать процесс расчета теплообменных аппаратов, с ее помощью осуществлен расчет десяти аппаратов, каждый для нескольких условий.

Осуществлен выбор оптимального аппарата, доказано его преимущество перед вариантом, предложенным разработчиками технологии. Выбор оптимального аппарата осуществлялся исходя из технических (запас поверхности более 10%) и экономических (минимальные приведенные затраты) критериев. Для оптимального аппарата приведены зависимости основных параметров процесса от содержания воды при постоянной температуре.

Параметры оптимального аппарата приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Параметры оптимального теплообменника

Величина	Обозначение	Единица измерения	Значение
Число труб	$n$	шт	618
Число заходов	$z$	шт	6
Длина труб	$L$	м	9
Поверхность теплообмена	$F$	$m^2$	349
Масса	$M$	кг	8500
Сечение межтрубного пространства	$S_{мтр}$	$m^2$	0,07
Диаметр труб внешний	$d_n$	м	0,020
Диаметр труб внутренний	$d_{вн}$	м	0,016
Диаметр кожуха	$D$	м	0,8

## Список используемой литературы и используемых источников

1. Баранов Д. А. Процессы и аппараты химической технологии: учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2020. 408 с.

2. Бахонина Е.И. Современные технологии переработки и утилизации углеводородосодержащих отходов. Сообщение 1. Термические методы утилизации и обезвреживания углеводородосодержащих отходов// Башкирский химический журнал. 2015. №1. С.20-29.

3. Бахонина Е.И. Современные технологии переработки и утилизации углеводородосодержащих отходов. Сообщение 2. Физико-химические, химические, биологические методы утилизации и обезвреживания углеводородосодержащих отходов// Башкирский химический журнал. 2015. №2. С.41-49.

4. Вдовин К.М. Керамический композит матричной структуры с применением нефтешламов // Инженерный вестник Дона. 2015. №4. С. 96.

5. Веденькин Д.А., Фаязов И.И. Исследование процессов переработки плотного битумизированного нефтяного шлама с использованием СВЧ-энергии//Электронный научный журнал Инженерный вестник Дона. 2016. №2.

6. ГОСТ 2477 – 2014 Нефть и нефтепродукты. Метод определения содержания воды [Электронный ресурс]. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/60022/> (дата обращения 09.02.2021).

7. ГОСТ 3900 – 85 Нефть и нефтепродукты. Метод определения плотности [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003577> (дата обращения 09.02.2021).

8. ГОСТ 6370-83 Нефть, нефтепродукты и присадки. Метод определения механических примесей [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004078> (дата обращения 09.02.2021).

9. Голованов А.А., Григорьева О.Б., Бекин В.В. Газовая хроматография: электронная учебное пособие. Тольятти: Издательство Тольяттинского государственного университета, 2014. 113 с.

10. Гунич С.В., Янчуковская Е.В. Анализ процессов пиролиза отходов производства и потребления// Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2016. №1. С. 86-93.
11. Дытнерский Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию. Москва: Химия, 1991. 496 с.
12. Желтобрюхов В.Ф, Колодницкая Н.В. Сравнительный анализ препаратов, предназначенных для восстановления нефтезагрязненных земель// Астраханский вестник экологического образования. 2015. №1(31). С. 185-187.
13. Измерение теплоемкости жидкости [Электронный ресурс]. URL: <http://genphys.phys.msu.ru/rus/lab/mol/Lab238.pdf> (дата обращения 09.02.2021).
14. Каримов А.Г., Курангышев А.В., Шабров И.С. Исследование процессов переработки твердых нефтешламов с применением растворителя керосин // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). 2015. № 7 (16). С. 144-146.
15. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Москва: ЁЁ Медиа, 2019. 134 с.
16. Кравцова М.В. Моделирование технических и природных систем: электронное учебно–методическое пособие. Тольятти: Издательство Тольяттинского государственного университета, 2019. 272 с.
17. Красовский В. Н. Примеры и задачи по курсу «Процессы и аппараты химической промышленности». Москва: Химия. Ленинградское отделение, 2019. 240 с.
18. Лофлер М. Направление использования нефтешламов в дорожном строительстве //Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2018. Т.8. №4. С. 98-104.
19. Лукин С.В. Процессы тепло – и массообмена в блоке разделения нефтешлама // Вестник Череповецкого государственного университета. 2016. №2. С.11-14.

20. Мхитаров Р.А. Технологии и оборудование для переработки отходов нефтепереработки, нефтешламов и загрязнённых углеводородами грунтов // Нефть.Газ.Новации. 2013. №10. С.72-76.

21. Носарев Н.С. Инновационные решения по переработке замазученных грунтов и нефтесодержащих отходов: магистерская дис.: 18.04.01. Тольятти, 2019. 78 с.

22. Определение коэффициента теплопроводности сыпучих материалов [Электронный ресурс]. URL: <https://www.s-vfu.ru/universitet/rukovodstvo-i-structura/instituty/fti/zo/лаб.раб.%20№5%20Теплопроводность2.pdf> (дата обращения 09.02.2021).

23. Определение вязкости жидкости вискозиметром Энглера [Электронный ресурс]. URL: [https://studopedia.ru/11\\_240961\\_demografiya.html](https://studopedia.ru/11_240961_demografiya.html) (дата обращения 09.02.2021).

24. Павлов К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Москва: Альянс, 2016. 576 с.

25. ПНД Ф 16.1:2:2:2:2.3:3.64 – 10 Методика измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв, грунтов, донных отложений, илов, осадков сточных вод, отходов производства и потребления гравиметрическим методом [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293807/4293807051.htm> (дата обращения 09.02.2021).

26. ПНД Ф 16.2.2:2.3:3.28-02 Методика выполнения измерений содержания хлоридов в твердых и жидких отходах производства и потребления, осадках, шламах, активном иле, донных отложениях меркурометрическим методом [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293800/4293800658.htm> (дата обращения 09.02.2021).

27. Романков П. Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи). Москва: Химиздат, 2020. 544 с.

28. Технологический регламент ТР Ремедиация нефтезагрязнённых почв, грунтов, буровых шламов с использованием препарата «Гумиком» - 2015.
29. Токарев Ю.И., Андреев Р.В., Длигач К.М. Переработка нефтешламов // Экспозиция Нефть Газ. 2015. №2 (41). С. 66-67.
30. Черепанова А.Е. Биодegradация сырой нефти бактериями, выделенными из загрязнённой сырой нефтью почвы. Обзор // Вестник науки и образования. 2018. Т.2. №7(43). С. 18-22.
31. Шпербер Д.Р. Разработка ресурсосберегающих технологий переработки нефтешлама: дис. канд. тех. наук: 03.02.08. Краснодар, 2015. 154 с.
32. Шрам В.Г. Технология переработки нефтешлама // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2018. Т.8. №3. С. 121-125.
33. Badrul I. Petroleum sludge treatment and disposal: A review // Int. J. Chem. Sci. 2015. V. 13(4). pp. 3-14.
34. Hu G., Li J., Hou H. A combination of solvent extraction and freeze thaw for oil recovery from petroleum refinery wastewater treatment pond sludge // Journal of Hazardous Materials. 2015. № 283. pp. 832–840.
35. Kuriakose A.P. Bitumenous paints from refinery sludge // Surface and Coatings Technolgy. 2001. V. 145. pp. 132–138.
36. Mardupenko A., Grigorov A., Sinkevich I. Oil sludge as source of a valuable carbon raw material // Petroleum and Coal journal. 2018. V. 60. pp. 353–357.
37. Olufemi A.J., Augustine C.A. Petroleum sludge treatment and disposal: A review // Environ. Eng. Res. 2018. V. 24 (2). pp. 191-201.

## Приложение А

### Разработка математической модели

Перед тем, как приступить непосредственно к определению зависимости плотности от содержания воды в нефтешламе и его температуры, приведем план эксперимента и порядок его обработки.

Для разработки моделей указанных зависимостей воспользуемся методикой проведения активного эксперимента, а именно полного факториального эксперимента.

В нашем случае принимаем, что искомая величина зависит от двух переменных – содержания воды и температуры. Эксперимент будем вести на двух уровнях. Для содержания воды нижний уровень – 30% воды в смеси, верхний – 60% воды в смеси. Для температуры нижний уровень составляет 20%, верхний – 80<sup>0</sup>С. Также ряд параллельных экспериментов будет осуществлен в центре плана – при содержании воды 45% и температуре 50<sup>0</sup>С. Необходимое число экспериментов определим по формуле А.1:

$$N = l^n, \tag{A.1}$$

где  $l$  – число уровней;

$n$  – число факторов.

$$N = 2^2 = 4$$

Приведем план эксперимента в кодированных переменных в таблице А.1.

## Продолжение Приложения А

Таблица А.1 – План эксперимента

X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Y
-	-	Y <sub>1</sub>
-	+	Y <sub>2</sub>
+	-	Y <sub>3</sub>
+	+	Y <sub>4</sub>

Здесь X<sub>1</sub> и X<sub>2</sub> – уровень содержания воды и температура соответственно, Y<sub>i</sub> – значение искомой величины в данных условиях. Плюс означает верхний уровень для данного фактора, минус – нижний.

Общий вид функции отклика – формула А.2:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (\text{A.2})$$

Коэффициенты уравнения определяют по формулам А.3 – А.5:

$$b_0 = \frac{1}{N} \cdot \sum Y_i, \quad (\text{A.3})$$

$$b_i = \frac{1}{N} \cdot \sum X_i \cdot Y_i, \quad (\text{A.4})$$

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \cdot \sum X_i \cdot X_j \cdot Y_i. \quad (\text{A.5})$$

Дисперсию воспроизводимости определим по формуле А.6:

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{\sum (Y_i - Y_{\text{ср}})^2}{m-1}, \quad (\text{A.6})$$

где m – число параллельных опытов.

## Продолжение Приложения А

Оценку дисперсии коэффициента уравнения определим по формуле А.7, расчётный коэффициент Стьюдента по формуле А.8:

$$S_b = \sqrt{\frac{S_{\text{воспр}}^2}{N}}, \quad (\text{А.7})$$

$$t_i = \frac{|b_i|}{S_b}. \quad (\text{А.8})$$

Коэффициент признается значимым, если расчетный коэффициент Стьюдента больше табличного. Незначимые коэффициенты с множителями из уравнения исключаются. Табличный коэффициент Стьюдента находится исходя из уровня значимости и числа степеней свободы. Число степеней свободы находим по формуле А.9:

$$f_2 = m - 1 \quad (\text{А.9})$$

Остаточную дисперсию определяют по формуле А.10, критерий Фишера – по формуле А.11:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum(Y_i - Y_{i\text{расч}})^2}{N - q}, \quad (\text{А.10})$$

где  $Y_{i\text{расч}}$  – расчетные значения отклика при данных условиях;

$q$  – количество коэффициентов после вычеркивания незначимых.

$$F = \frac{S_{\text{ост}}^2}{S_{\text{воспр}}^2} \quad (\text{А.11})$$

## Продолжение Приложения А

Уравнение признается адекватным в случае, если расчетное значение критерия Фишера меньше табличного. Табличное значение зависит от уровня значимости, чисел степеней свободы при расчёте дисперсии воспроизводимости и остаточной дисперсии. Число степеней свободы для дисперсии воспроизводимости определяется по формуле А.9, для остаточной дисперсии – по формуле А.12:

$$f_1 = N - q \quad (\text{А.12})$$

Стоит учесть, что в формулах А.12 – А.15 значения факторов используются в кодированном виде. После выполнения статистической модели мы должны привести ее к декодированному виду. Для этого подставляем формулу А.13 в формулу А.2, получаем уравнение вида формулы А.14:

$$x_i = \frac{A - A_{\text{ц.п.}}}{\Delta A}, \quad (\text{А.13})$$

где  $A$  – некоторая переменная;

$A_{\text{ц.п.}}$  – значение переменной в центре плана;

$\Delta A$  – интервал варьирования.

$$Y = b_0 + b_1 \cdot \frac{W - W_{\text{ц.п.}}}{\Delta W} + b_2 \cdot \frac{T - T_{\text{ц.п.}}}{\Delta T} + b_{12} \cdot \frac{W - W_{\text{ц.п.}}}{\Delta W} \cdot \frac{T - T_{\text{ц.п.}}}{\Delta T}, \quad (\text{А.14})$$

где  $W$  – влажность, процент;

$T$  – температура, градус Цельсия.

Теперь приступим к разработке модели для плотности. Начнем с приготовления модельных смесей с влажностью 30, 45 и 60 процентов в стаканах 1, 2 и 3 соответственно.

## Продолжение Приложения А

В указанные стаканы внесли навески шлама 700, 600 и 400 грамм соответственно. Теперь нам необходимо рассчитать навеску дистиллированной воды для создания необходимой влажности. Запишем уравнение материального баланса смешения в формуле А.15, выразим из него навеску воды – формула А.16:

$$G_1 \cdot w_1 + G_{2-w} \cdot w_2 = (G_1 + G_2) \cdot w, \quad (\text{A.15})$$

где  $G_1$  – навеска нефтешлама, г;

$G_{2-w}$  – навеска воды для создания данной влажности  $w$ , г;

$w$  – требуемая влажность смеси, массовая доля;

$w_1$  – исходная влажность шлама, массовая доля;

$w_2$  – влажность воды, условная величина, равная единице.

$$G_{2-w} = G_1 \cdot \frac{w-w_1}{w_2-w} \quad (\text{A.16})$$

Осуществим расчёт согласно формуле А.16:

$$G_{2-30} = 700 \cdot \frac{0,3-0,28}{1-0,3} = 20,00 \text{ г}$$

$$G_{2-45} = 600 \cdot \frac{0,45-0,28}{1-0,45} = 185,45 \text{ г}$$

$$G_{2-60} = 400 \cdot \frac{0,6-0,28}{1-0,6} = 320,00 \text{ г}$$

Внесли рассчитанные навески в соответствующие стаканы, перемешивали в течение трех часов, после чего приступили к исследованию. Плотность определяли согласно ГОСТ 3900 – 85 по формуле А.17:

## Продолжение Приложения А

$$\rho_{w-T} = \frac{m_t - m_0}{m_c - m_0 - m_2 + m_1} \cdot \rho_c + C, \quad (\text{A.17})$$

где  $m_t$  – масса пикнометра с образцом на воздухе, г;

$m_0$  – масса пустого пикнометра, г;

$m_c$  – масса пикнометра заполненного водой, г;

$m_2$  – масса пикнометра с образцом, наполненного водой, г;

$m_1$  – масса пикнометра, частично наполненного образцом, г;

$\rho_c$  – плотность воды при температуре определения, кг/м<sup>3</sup>;

$C$  – поправка на давление воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Согласно методике, исследование проводится следующим образом. Предварительно высушенный пикнометр взвешивают, наполняют водой до риски и взвешивают. После воду сливают, пикнометр сушат и охлаждают. После этого в пикнометр вносят предварительно нагретый до 60<sup>0</sup>С вязкий нефтепродукт, нагревали его при 90<sup>0</sup>С в течение 20 минут для удаления воздуха, после чего охлаждают и взвешивают. В пикнометр вносят свежекипяченую дистиллированную воду и выдерживают при температуре испытания 30 минут, после чего охлаждают и взвешивают. Поскольку согласно методике, пикнометр не заполняется испытуемым образцом полностью, не совсем ясно происхождение величины  $m_t$  в формуле, методика данный вопрос не освещает. На основе анализа формулы автор пришел к выводу, что в данном случае  $m_t$  идентично  $m_1$ , в дальнейших расчетах будем придерживаться этого положения. Приведем результаты измерений в таблице А.2.

Продолжение Приложения А

Таблица А.2 – Результаты измерений

Условия	$m_{t(1)}, \Gamma$	$m_0, \Gamma$	$m_c, \Gamma$	$m_2, \Gamma$	$C, \text{кг/м}^3$
Влажность – 30 процентов и температура – 20 <sup>0</sup> С	59,5618	49,1518	74,1070	74,5348	0
Влажность – 30 процентов и температура – 80 <sup>0</sup> С	60,2814	49,9814	74,9368	75,2544	0
Влажность – 60 процентов и температура – 20 <sup>0</sup> С	59,6316	49,4116	74,3664	74,6046	0
Влажность – 60 процентов и температура – 80 <sup>0</sup> С	59,6881	49,5781	74,5332	74,6611	0
Влажность – 45 процентов и температура – 50 <sup>0</sup> С	60,1124	49,8424	74,7976	75,0858	0
Влажность – 45 процентов и температура – 50 <sup>0</sup> С	60,2613	49,9913	74,9464	75,2341	0
Влажность – 45 процентов и температура – 50 <sup>0</sup> С	59,8834	49,6134	74,5685	74,8566	0

Произведем расчеты согласно формуле А.17:

$$\rho_{30-20} = \frac{59,5618-49,1518}{74,1070-49,1518-74,5348+59,5618} \cdot 998,2 + 0 = 1040,979 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{30-80} = \frac{60,2814-49,9814}{74,9368-49,9814-75,2544+60,2814} \cdot 998,2 + 0 = 1029,959 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{60-20} = \frac{59,6316-49,4116}{74,3664-49,4116-74,6046+59,6316} \cdot 998,2 + 0 = 1022,020 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{60-80} = \frac{59,6881-49,5781}{74,5332-49,5781-74,6611+59,6881} \cdot 998,2 + 0 = 1010,990 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{45-50} = \frac{60,1124-49,8424}{74,7976-49,8424-75,0858+60,1124} \cdot 998,2 + 0 = 1027,021 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{45-50} = \frac{60,2613-49,9913}{74,9464-49,9913-75,2341+60,2613} \cdot 998,2 + 0 = 1026,969 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{45-50} = \frac{59,8834-49,6134}{74,5685-49,6134-74,8566+59,8834} \cdot 998,2 + 0 = 1027,010 \text{ кг/м}^3$$

## Продолжение Приложения А

Приступим к обработке результатов активного эксперимента. Приведем план эксперимента в таблице А.3.

Таблица А.3 – План эксперимента

X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Y
-	-	1040,979
-	+	1029,959
+	-	1022,020
+	+	1010,990

Определим коэффициенты уравнения по формулам А.3 – А.5:

$$b_0 = \frac{1}{4} \cdot (1040,979 + 1029,959 + 1022,020 + 1010,990) = 1025,987$$

$$b_1 = \frac{1}{4} \cdot ((-1) \cdot 1040,979 + (-1) \cdot 1029,959 + 1 \cdot 1022,020 + 1 \cdot 1010,990) = -9,482$$

$$b_2 = \frac{1}{4} \cdot ((-1) \cdot 1040,979 + 1 \cdot 1029,959 + (-1) \cdot 1022,020 + 1 \cdot 1010,990) = -5,513$$

$$b_{12} = \frac{1}{4} \cdot ((-1) \cdot (-1) \cdot 1040,979 + (-1) \cdot 1 \cdot 1029,959 + 1 \cdot (-1) \cdot 1022,020 + 1 \cdot 1 \cdot 1010,990) = -0,0025$$

Запишем функцию отклика согласно формуле 32, получим формулу А.18:

$$\rho_{w-T} = 1025,987 - 9,482 \cdot x_1 - 5,513 \cdot x_2 - 0,0025 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (\text{А.18})$$

## Продолжение Приложения А

Для трех определений в центре плана найдем среднее согласно формуле 21:

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{1027,021+1026,969+1027,010}{3} = 1027,030 \text{ кг/м}^3$$

Дисперсию воспроизводимости определим по формуле А.6:

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{(1027,021-1027,030)^2+(1026,969-1027,030)^2+(1027,010-1027,030)^2}{3-1} = 0,004002$$

Оценку дисперсии коэффициента уравнения определим по формуле А.7, расчётные коэффициенты Стьюдента по формуле А.8:

$$S_b = \sqrt{\frac{0,004002}{4}} = 0,0316$$

$$t_{b0} = \frac{|1025,987|}{0,0316} = 32467,943$$

$$t_{b1} = \frac{|-9,482|}{0,0316} = 300,063$$

$$t_{b2} = \frac{|-5,513|}{0,0316} = 174,462$$

$$t_{b12} = \frac{|-0,0025|}{0,0316} = 0,079$$

Определим число степеней свободы по формуле А.9:

$$f_2 = 3 - 1 = 2$$

## Продолжение Приложения А

При уровне значимости, равном 0,05 (доверительная вероятность 0,95), и числе степеней свободы 2, табличный критерий Стьюдента – 12,706. Таким образом, значимыми признаются коэффициенты  $b_0$ ,  $b_1$  и  $b_2$ . Коэффициент  $b_{12}$  признается незначимым и исключается из уравнения, в результате чего получаем формулу А.19:

$$\rho_{w-T} = 1025,987 - 9,482 \cdot x_1 - 5,513 \cdot x_2 \quad (\text{A.19})$$

Согласно формуле А.19 определим расчетные значения функции отклика для всех вариантов условий:

$$\rho_{30-20} = 1025,987 - 9,482 \cdot (-1) - 5,513 \cdot (-1) = 1040,982 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{30-80} = 1025,987 - 9,482 \cdot (-1) - 5,513 \cdot 1 = 1029,956 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{60-20} = 1025,987 - 9,482 \cdot 1 - 5,513 \cdot (-1) = 1022,018 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{60-80} = 1025,987 - 9,482 \cdot 1 - 5,513 \cdot 1 = 1010,992 \text{ кг/м}^3$$

Остаточную дисперсию определяют по формуле А.10, критерий Фишера – по формуле А.11:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{(1040,979-1040,982)^2+(1029,959-1029,956)^2+(1022,020-1022,018)^2+(1010,990-1010,992)^2}{4-3} = 0,000026$$

$$F = \frac{0,000026}{0,004002} = 0,0065$$

## Продолжение Приложения А

Число степеней свободы для дисперсии воспроизводимости определяется по формуле А.9, для остаточной дисперсии – по формуле А.12:

$$f_1 = 4 - 3 = 1$$

$$f_2 = 3 - 1 = 2$$

При уровне значимости, равном 0,05 (доверительная вероятность 0,95), и числах степеней свободы  $f_1$  и  $f_2$  равных 1 и 2 соответственно, табличный критерий Фишера равен 18,51. Поскольку расчётный критерий Фишера много меньше табличного, признаем уравнение адекватным.

Переведем уравнение в декодированный вид, для этого на основе формулы А.13 получаем формулы А.20 и А.21, подставляем их в формулу А.19, получаем формулу А.22:

$$x_1 = \frac{W-45}{15}, \quad (\text{A.20})$$

$$x_2 = \frac{T-50}{30}, \quad (\text{A.21})$$

$$\rho_{W-T} = 1063,621 - 0,632 \cdot W - 0,184 \cdot T. \quad (\text{A.22})$$

Итак, разработана модель зависимости плотности нефтешлама от влажности и температуры, доказана ее адекватность.

Приступим к разработке модели для вязкости. Вязкость определялась с помощью вискозиметра Энглера. Сначала в вискозиметр, отверстие которого закрыто пробкой, наливают 250 мл дистиллированной воды, после чего открывают пробку и засекают время до истечения 200 мл жидкости.

## Продолжение Приложения А

После данную процедуру повторяют для нефтешлама данного состава при данных условиях, предварительно выдержав его при заданной температуре в течение 30 минут.

Градус Энглера определяют по формуле А.23, кинетическую вязкость – по формуле А.24 (в данном случае получают значение кинематической вязкости в см<sup>2</sup>/с, перед дальнейшим расчетом перевести в м<sup>2</sup>/с), от кинематической вязкости к динамической переходят с использованием формулы А.25:

$$\mathfrak{E}^0_{w-N} = \frac{\tau_1}{\tau_2}, \quad (\text{A.23})$$

где  $\tau_1$  – время истечения исследуемой жидкости, с;

$\tau_2$  – время истечения эталонной жидкости, с.

$$v_{w-T} = 0,0731 \cdot \mathfrak{E}^0 - \frac{0,0631}{\mathfrak{E}^0}, \quad (\text{A.24})$$

$$\mu_{w-T} = v \cdot \rho. \quad (\text{A.25})$$

Приведем результаты измерений в таблице А.4.

Таблица А.4 – Результаты измерений

Условия	$\tau_1$ , с	$\tau_2$ , с
Влажность – 30 процентов и температура – 20 <sup>0</sup> С	3,30	33,96
Влажность – 30 процентов и температура – 80 <sup>0</sup> С	3,32	11,56
Влажность – 60 процентов и температура – 20 <sup>0</sup> С	3,29	47,54
Влажность – 60 процентов и температура – 80 <sup>0</sup> С	3,33	24,89
Влажность – 45 процентов и температура – 50 <sup>0</sup> С	3,35	30,70
Влажность – 45 процентов и температура – 50 <sup>0</sup> С	3,30	31,14
Влажность – 45 процентов и температура – 50 <sup>0</sup> С	3,31	29,39

## Продолжение Приложения А

Произведем расчет по формулам А.23 – А.25:

$$\mathfrak{D}_{30-20}^0 = \frac{33,96}{3,30} = 10,291$$

$$\mathfrak{D}_{30-80}^0 = \frac{11,56}{3,32} = 3,482$$

$$\mathfrak{D}_{60-20}^0 = \frac{47,54}{3,29} = 14,450$$

$$\mathfrak{D}_{60-80}^0 = \frac{24,89}{3,33} = 7,474$$

$$\mathfrak{D}_{45-50}^0 = \frac{30,70}{3,35} = 9,164$$

$$\mathfrak{D}_{45-50}^0 = \frac{31,14}{3,30} = 9,436$$

$$\mathfrak{D}_{45-50}^0 = \frac{29,39}{3,31} = 8,879$$

$$v_{30-20} = 0,0731 \cdot 10,291 - \frac{0,0631}{10,291} = 0,746 \frac{\text{см}^2}{\text{с}} = 0,0000746 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$v_{30-80} = 0,0731 \cdot 3,482 - \frac{0,0631}{3,482} = 0,236 \frac{\text{см}^2}{\text{с}} = 0,0000236 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$v_{60-20} = 0,0731 \cdot 14,450 - \frac{0,0631}{14,450} = 1,052 \frac{\text{см}^2}{\text{с}} = 0,0001052 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$v_{60-80} = 0,0731 \cdot 7,474 - \frac{0,0631}{7,474} = 0,538 \frac{\text{см}^2}{\text{с}} = 0,0000538 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$v_{45-50} = 0,0731 \cdot 9,164 - \frac{0,0631}{9,164} = 0,663 \frac{\text{см}^2}{\text{с}} = 0,0000663 \text{ м}^2/\text{с}$$

## Продолжение Приложения А

$$v_{45-50} = 0,0731 \cdot 9,436 - \frac{0,0631}{9,436} = 0,683 \frac{\text{см}^2}{\text{с}} = 0,0000683 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$v_{45-50} = 0,0731 \cdot 8,879 - \frac{0,0631}{8,879} = 0,642 \frac{\text{см}^2}{\text{с}} = 0,0000642 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$\mu_{30-20} = 0,0000746 \cdot 1040,979 = 0,0777 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$\mu_{30-80} = 0,0000236 \cdot 1029,959 = 0,0243 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$\mu_{60-20} = 0,0001052 \cdot 1022,020 = 0,1075 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$\mu_{60-80} = 0,0000538 \cdot 1010,990 = 0,0544 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$\mu_{45-50} = 0,0000663 \cdot 1027,030 = 0,0681 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$\mu_{45-50} = 0,0000683 \cdot 1027,030 = 0,0701 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$\mu_{45-50} = 0,0000642 \cdot 1027,030 = 0,0659 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Приступим к обработке результатов активного эксперимента. Приведем план эксперимента в таблице А.5.

Таблица А.5 – План эксперимента

X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Y
-	-	0,0777
-	+	0,0243
+	-	0,1075
+	+	0,0544

## Продолжение Приложения А

Определим коэффициенты уравнения по формулам А.3 – А.5:

$$b_0 = \frac{1}{4} \cdot (0,0777 + 0,0243 + 0,1075 + 0,0544) = 0,0660$$

$$b_1 = \frac{1}{4} \cdot ((-1) \cdot 0,0777 + (-1) \cdot 0,0243 + 1 \cdot 0,1075 + 1 \cdot 0,0544) = 0,0150$$

$$b_2 = \frac{1}{4} \cdot ((-1) \cdot 0,0777 + 1 \cdot 0,0243 + (-1) \cdot 0,1075 + 1 \cdot 0,0544) = -0,0266$$

$$b_{12} = \frac{1}{4} \cdot ((-1) \cdot (-1) \cdot 0,0777 + (-1) \cdot 1 \cdot 0,0243 + 1 \cdot (-1) \cdot 0,1075 + 1 \cdot 1 \cdot 0,0544) = -0,000075$$

Запишем функцию отклика согласно формуле А.2, получим формулу А.26:

$$\mu_{w-T} = 0,0660 + 0,0150 \cdot x_1 - 0,0266 \cdot x_2 - 0,000075 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (\text{А.26})$$

Для трех определений в центре плана найдем среднее согласно формуле 21:

$$\mu_{\text{ср}} = \frac{0,0681+0,0701+0,0659}{3} = 0,0680 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Дисперсию воспроизводимости определим по формуле А.6:

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{(0,0681-0,0680)^2 + (0,0701-0,0680)^2 + (0,0659-0,0680)^2}{3-1} = 0,00000442$$

Оценку дисперсии коэффициента уравнения определим по формуле А.7, расчётные коэффициенты Стьюдента по формуле А.8:

## Продолжение Приложения А

$$S_b = \sqrt{\frac{0,00000442}{4}} = 0,00105$$

$$t_{b0} = \frac{|0,0660|}{0,00105} = 62,857$$

$$t_{b1} = \frac{|0,0150|}{0,00105} = 14,286$$

$$t_{b2} = \frac{|-0,0266|}{0,00105} = 25,333$$

$$t_{b12} = \frac{|-0,000075|}{0,00105} = 0,0714$$

Определим число степеней свободы по формуле А.9:

$$f_2 = 3 - 1 = 2$$

При уровне значимости, равном 0,05 (доверительная вероятность 0,95), и числе степеней свободы 2, табличный критерий Стьюдента – 12,706. Таким образом, значимыми признаются коэффициенты  $b_0$ ,  $b_1$  и  $b_2$ . Коэффициент  $b_{12}$  признается незначимым и исключается из уравнения, в результате чего получаем формулу А.27:

$$\mu_{w-T} = 0,0660 + 0,0150 \cdot x_1 - 0,0266 \cdot x_2 \quad (\text{А.27})$$

Согласно формуле А.27 определим расчетные значения функции отклика для всех вариантов условий:

$$\mu_{30-20} = 0,0660 + 0,0150 \cdot (-1) - 0,0266 \cdot (-1) = 0,0776 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$\mu_{30-80} = 0,0660 + 0,0150 \cdot (-1) - 0,0266 \cdot 1 = 0,0244 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

## Продолжение Приложения А

$$\mu_{60-20} = 0,0660 + 0,0150 \cdot 1 - 0,0266 \cdot (-1) = 0,1076 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$\mu_{60-80} = 0,0660 + 0,0150 \cdot 1 - 0,0266 \cdot 1 = 0,0544 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Остаточную дисперсию определяют по формуле А.10, критерий Фишера – по формуле А.11:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{(0,0777-0,0776)^2+(0,0243-0,0244)^2+(0,1075-0,1076)^2+(0,0544-0,0544)^2}{4-3} = 0,00000003$$

$$F = \frac{0,00000003}{0,00000442} = 0,00679$$

Число степеней свободы для дисперсии воспроизводимости определяется по формуле А.9, для остаточной дисперсии – по формуле А.12:

$$f_1 = 4 - 3 = 1$$

$$f_2 = 3 - 1 = 2$$

При уровне значимости, равном 0,05 (доверительная вероятность 0,95), и числах степеней свободы  $f_1$  и  $f_2$  равных 1 и 2 соответственно, табличный критерий Фишера равен 18,51. Поскольку расчётный критерий Фишера много меньше табличного, признаем уравнение адекватным. Переведем уравнение в декодированный вид, для этого подставляем формулы А.20 и А.21 в формулу А.27, получаем формулу А.28:

$$\mu_{w-T} = 0,0653 + 0,001 \cdot W - 0,000887 \cdot T \quad (\text{А.28})$$

Итак, разработана модель зависимости динамической вязкости нефтешлама от влажности и температуры, доказана ее адекватность.

## Продолжение Приложения А

Приступим к разработке модели для теплоемкости. Исследование теплоемкости нефтешлама вели упрощенным диатермическим методом. Для этого взвесили капсулу, поместили в нее навеску нефтешлама (предварительно выдержав его в термостате при заданной температуре в течение 30 минут), взвесили капсулу с навеской, после чего изолировали капсулу, поместили в нее нагреватель и термометр. Вели измерения температуры в течение 1 минуты с интервалом 10 секунд, убедившись в постоянстве температуры, включали нагреватель и продолжали фиксировать значения температуры с интервалом 5 секунд. После нагрева нефтешлама на 4 - 5 градусов выключали нагреватель и продолжали фиксировать температуру в течение 2 минут с интервалом 10 секунд.

Приведем в общем виде график зависимости температуры от времени при упрощенном диатермическом методе на рисунке А.1.

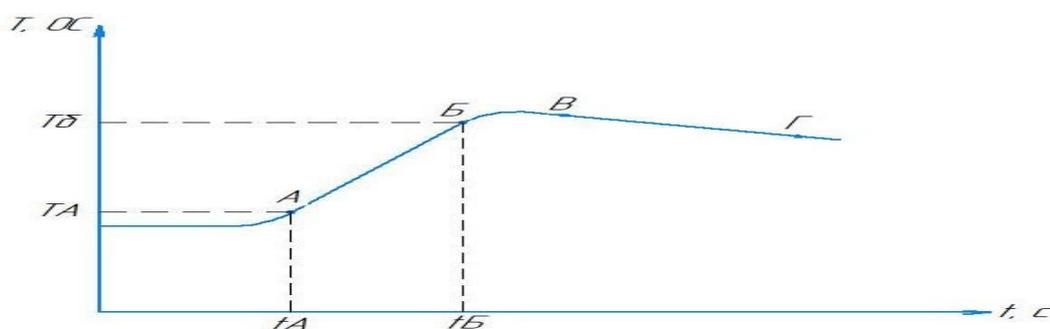


Рисунок А.1 – Общий вид зависимости температуры от времени при исследовании

Тангенс угла наклона на стадии нагрева нефтешлама определим по формуле А.29:

$$G_{w-T} = \frac{T_B - T_A}{t_B - t_A} \quad (\text{А.29})$$

где  $T_i$  – температура в данной точке,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_i$  – время в данной точке, с.

## Продолжение Приложения А

Теплоемкость нефтешлама в данных условиях определим по формуле А.30:

$$C_{w-T} = \frac{W \cdot \left( \frac{1}{G_2} - \frac{1}{G_1} \right)}{(m_2 - m_k) - (m_1 - m_k)} \quad (\text{A.30})$$

где  $W$  – мощность нагревателя, Вт;

$m_i$  – масса навески, кг;

$m_k$  – масса измерительной капсулы, кг.

Результаты измерений предоставим в таблицах А.6, А.7 и А.8.

Таблица А.6 – Результаты измерений

Условия	$m_k$ , кг	$m_1$ , кг	$m_2$ , кг
Влажность – 30 процентов и температура – 20 <sup>0</sup> С	0,1030251	0,2230274	0,2431302
Влажность – 30 процентов и температура – 80 <sup>0</sup> С	0,1040382	0,2240433	0,2443441
Влажность – 60 процентов и температура – 20 <sup>0</sup> С	0,1030336	0,2229428	0,2433437
Влажность – 60 процентов и температура – 80 <sup>0</sup> С	0,1029034	0,2234106	0,2428115
Влажность – 45 процентов и температура – 50 <sup>0</sup> С	0,1030595	0,2229604	0,2431563
Влажность – 45 процентов и температура – 50 <sup>0</sup> С	0,1028997	0,2228275	0,2430976
Влажность – 45 процентов и температура – 50 <sup>0</sup> С	0,1040012	0,2241183	0,2442075

Таблица А.7 – Результаты измерений

Влажность – 30 процентов и температура – 20 <sup>0</sup> С				Влажность – 30 процентов и температура – 80 <sup>0</sup> С				Влажность – 60 процентов и температура – 20 <sup>0</sup> С				Влажность – 60 процентов и температура – 80 <sup>0</sup> С			
Измерение первое		Измерение второе													
$t, c$	$T, ^\circ C$	$t, c$	$T, ^\circ C$	$t, c$	$T, ^\circ C$	$t, c$	$T, ^\circ C$	$t, c$	$T, ^\circ C$	$t, c$	$T, ^\circ C$	$t, c$	$T, ^\circ C$	$t, c$	$T, ^\circ C$
0	20,0	0	20,0	0	80,0	0	80,0	0	20,0	0	20,0	0	80,0	0	80,0
10	20,0	10	20,0	10	80,0	10	80,0	10	20,0	10	20,0	10	80,0	10	80,0
20	20,0	20	20,0	20	80,0	20	80,0	20	20,0	20	20,0	20	80,0	20	80,0
30	20,0	30	20,0	30	80,0	30	80,0	30	20,0	30	20,0	30	80,0	30	80,0
40	20,0	40	20,0	40	80,0	40	80,0	40	20,0	40	20,0	40	80,0	40	80,0
50	20,0	50	20,0	50	79,9	50	79,9	50	20,0	50	20,0	50	79,9	50	79,9
60	20,0	60	20,0	60	79,9	60	79,9	60	20,0	60	20,0	60	79,9	60	79,9
65	20,7	65	20,6	65	80,6	65	80,5	65	20,6	65	20,5	65	80,5	65	80,4
70	21,5	70	21,3	70	81,4	70	81,0	70	21,2	70	21,0	70	81,0	70	80,9
75	22,2	75	21,9	75	82,1	75	81,7	75	21,8	75	21,6	75	81,7	75	81,4
80	22,9	80	22,5	80	82,8	80	82,3	80	22,4	80	22,1	80	82,3	80	82,0

Продолжение Приложения А

Продолжение таблицы А.7

Влажность – 30 процентов и температура – 20 <sup>0</sup> С				Влажность – 30 процентов и температура – 80 <sup>0</sup> С				Влажность – 60 процентов и температура – 20 <sup>0</sup> С				Влажность – 60 процентов и температура – 80 <sup>0</sup> С			
Измерение первое		Измерение второе													
t,с	T, <sup>0</sup> С	t,с	T, <sup>0</sup> С	t,с	T, <sup>0</sup> С	t,с	T, <sup>0</sup> С	t,с	T, <sup>0</sup> С	t,с	T, <sup>0</sup> С	t,с	T, <sup>0</sup> С	t,с	T, <sup>0</sup> С
85	23,7	85	23,1	85	83,5	85	83,0	85	23,1	85	22,6	85	82,9	85	82,5
90	24,4	90	23,8	90	84,2	90	83,6	90	23,7	90	23,1	90	83,5	90	83,0
95	25,1	95	24,4	95	84,9	95	84,2	95	24,3	95	23,6	95	84,1	95	83,5
100	25,8	100	25,0	100	85,7	100	84,8	100	24,9	100	24,2	100	84,7	100	84,0
110	25,8	110	25,0	110	85,7	110	84,8	110	24,9	110	24,2	110	84,7	110	84,0
120	25,7	120	24,9	120	85,5	120	84,6	120	24,8	120	24,1	120	84,4	120	83,9
130	25,6	130	24,9	130	85,4	130	84,5	130	24,8	130	24,0	130	84,3	130	83,9
140	25,5	140	24,7	140	85,0	140	84,1	140	24,7	140	23,8	140	83,9	140	83,6
150	25,3	150	24,6	150	84,6	150	83,7	150	24,5	150	23,7	150	83,5	150	83,4
160	25,2	160	24,4	160	84,3	160	83,4	160	24,4	160	23,5	160	83,2	160	83,1
170	25,0	170	24,2	170	83,9	170	83,0	170	24,2	170	23,3	170	82,8	170	82,9
180	24,8	180	24,1	180	83,5	180	82,6	180	24,0	180	23,2	180	82,4	180	82,4
190	24,7	190	23,9	190	83,1	190	82,2	190	23,9	190	23,0	190	82,0	190	82,1
200	24,4	200	23,7	200	82,7	200	81,8	200	23,7	200	22,8	200	81,6	200	81,5
210	24,3	210	23,5	210	82,4	210	81,5	210	23,5	210	22,6	210	81,3	210	81,2
220	24,1	220	23,4	220	82,0	220	81,1	220	23,3	220	22,5	220	80,9	220	80,8
230	24,0	230	23,2	230	81,6	230	80,7	230	23,2	230	22,3	230	80,5	230	80,5
240	23,8	240	23,1	240	81,2	240	80,3	240	23,0	240	22,1	240	80,1	240	80,2

Таблица А.8 – Результаты измерений

Влажность – 45 процентов и температура – 50 <sup>0</sup> С				Влажность – 45 процентов и температура – 50 <sup>0</sup> С				Влажность – 45 процентов и температура – 50 <sup>0</sup> С			
Измерение первое		Измерение второе		Измерение первое		Измерение второе		Измерение первое		Измерение второе	
t,с	T, <sup>0</sup> С	t,с	T, <sup>0</sup> С	t,с	T, <sup>0</sup> С	t,с	T, <sup>0</sup> С	t,с	T, <sup>0</sup> С	t,с	T, <sup>0</sup> С
0	50,0	0	50,0	0	50,0	0	50,0	0	50,0	0	50,0
10	50,0	10	50,0	10	50,0	10	50,0	10	50,0	10	50,0
20	50,0	20	50,0	20	50,0	20	50,0	20	50,0	20	50,0
30	50,0	30	50,0	30	50,0	30	50,0	30	50,0	30	50,0
40	50,0	40	50,0	40	50,0	40	50,0	40	50,0	40	50,0
50	50,0	50	50,0	50	50,0	50	50,0	50	50,0	50	50,0
60	50,0	60	50,0	60	50,0	60	50,0	60	50,0	60	50,0
65	50,7	65	50,6	65	50,7	65	50,6	65	50,7	65	50,6
70	51,3	70	51,1	70	51,3	70	51,1	70	51,3	70	51,1
75	52,0	75	51,7	75	52,0	75	51,7	75	52,0	75	51,7
80	52,7	80	52,2	80	52,7	80	52,3	80	52,7	80	52,3
85	53,3	85	52,8	85	53,3	85	52,8	85	53,3	85	52,8
90	54,0	90	53,4	90	54,0	90	53,4	90	54,0	90	53,4
95	54,7	95	53,9	95	54,7	95	54,0	95	54,7	95	54,0
100	55,3	100	54,5	100	55,3	100	54,5	100	55,3	100	54,5
110	55,3	110	54,5	110	55,3	110	54,5	110	55,3	110	54,5
120	55,2	120	54,4	120	55,2	120	54,3	120	55,2	120	54,3
130	54,9	130	54,2	130	54,9	130	54,1	130	54,9	130	54,1
140	54,7	140	53,9	140	54,7	140	53,8	140	54,7	140	53,8

## Продолжение Приложения А

### Продолжение таблицы А.8

Влажность – 45 процентов и температура – 50 <sup>0</sup> С				Влажность – 45 процентов и температура – 50 <sup>0</sup> С				Влажность – 45 процентов и температура – 50 <sup>0</sup> С			
Измерение первое		Измерение второе		Измерение первое		Измерение второе		Измерение первое		Измерение второе	
t,с	T, <sup>0</sup> С	t,с	T, <sup>0</sup> С	t,с	T, <sup>0</sup> С	t,с	T, <sup>0</sup> С	t,с	T, <sup>0</sup> С	t,с	T, <sup>0</sup> С
150	54,4	150	53,7	150	54,4	150	53,6	150	54,4	150	53,6
160	54,2	160	53,4	160	54,2	160	53,3	160	54,2	160	53,3
170	53,9	170	53,2	170	53,9	170	53,1	170	53,9	170	53,1
180	53,7	180	53,0	180	53,7	180	52,9	180	53,7	180	52,9
190	53,4	190	52,7	190	53,4	190	52,6	190	53,4	190	52,6
200	53,2	200	52,5	200	53,2	200	52,4	200	53,2	200	52,4
210	52,9	210	52,2	210	52,9	210	52,1	210	52,9	210	52,1
220	52,7	220	52,0	220	52,7	220	51,9	220	52,7	220	51,9
230	52,4	230	51,8	230	52,4	230	51,7	230	52,4	230	51,7
240	52,1	240	51,5	240	52,1	240	51,4	240	52,1	240	51,4

Приведем кривые, отображающие зависимость температуры от времени в ходе исследования, на рисунках А.2 – А.15.

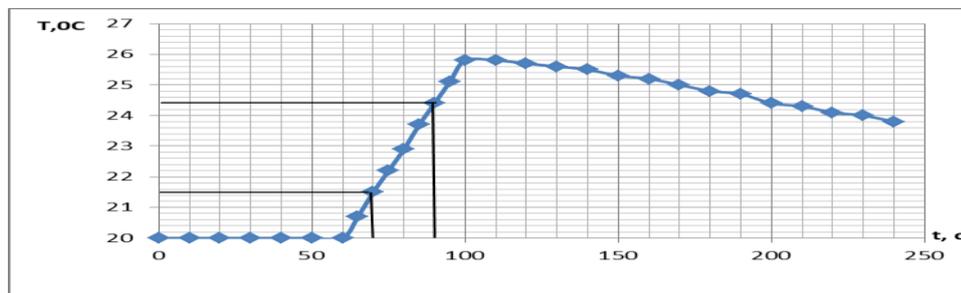


Рисунок А.2 – Измерение первое при влажности 30 процентов и 20<sup>0</sup>С

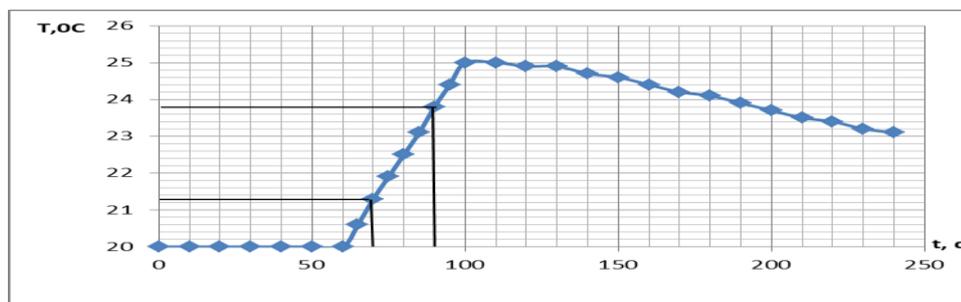


Рисунок А.3 – Измерение второе при влажности 30 процентов и 20<sup>0</sup>С

## Продолжение Приложения А

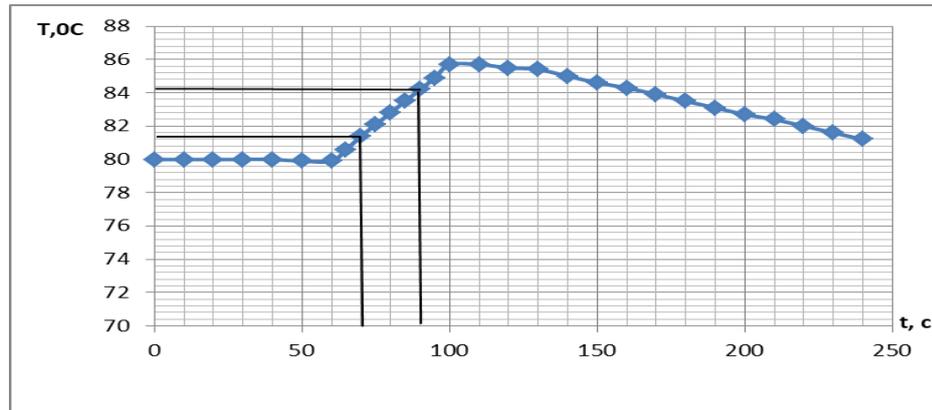


Рисунок А.4 – Измерение первое при влажности 30 процентов и 80<sup>0</sup>С

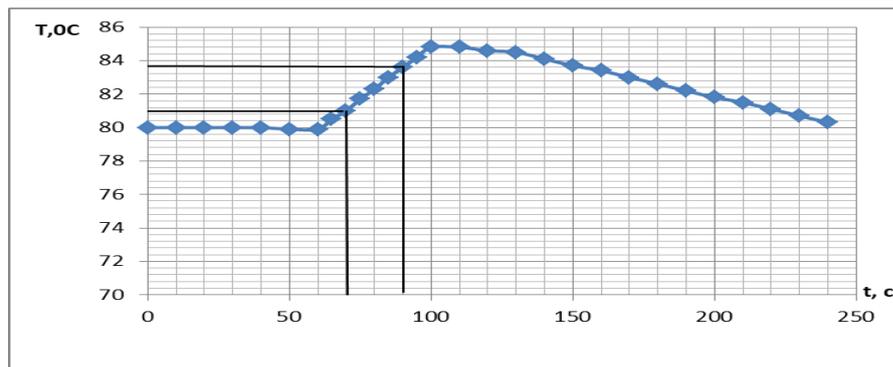


Рисунок А.5 – Измерение второе при влажности 30 процентов и 80<sup>0</sup>С

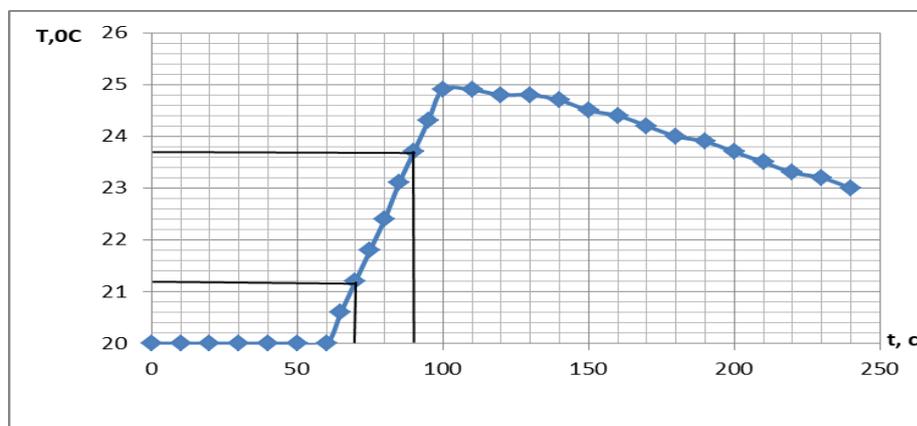


Рисунок А.6 – Измерение первое при влажности 60 процентов и 20<sup>0</sup>С

## Продолжение Приложения А

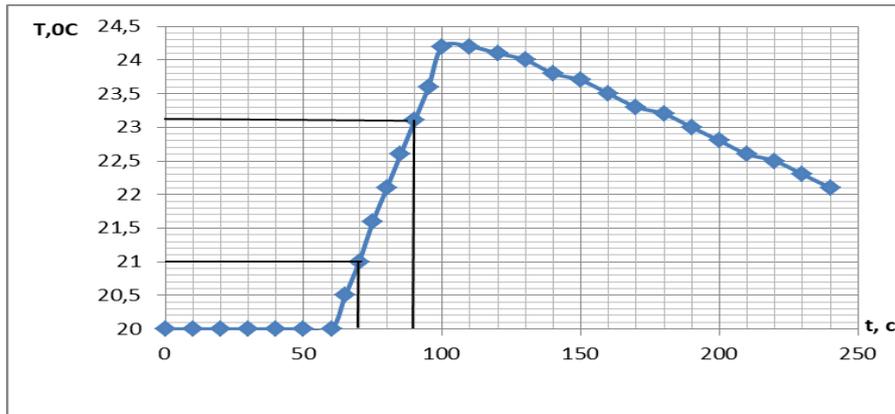


Рисунок А.7 – Измерение второе при влажности 60 процентов и 20<sup>0</sup>С

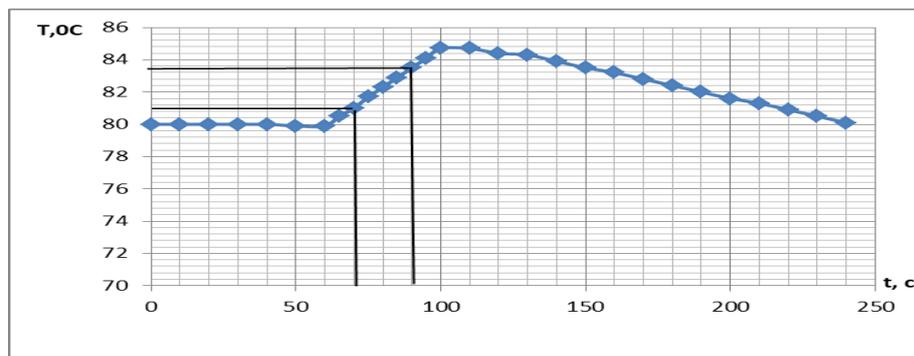


Рисунок А.8 – Измерение первое при влажности 60 процентов и 80<sup>0</sup>С

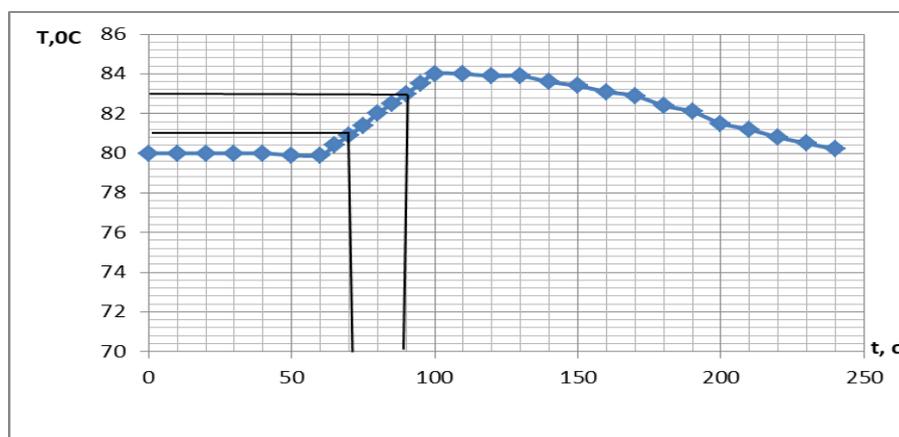


Рисунок А.9 – Измерение второе при влажности 60 процентов и 80<sup>0</sup>С

## Продолжение Приложения А

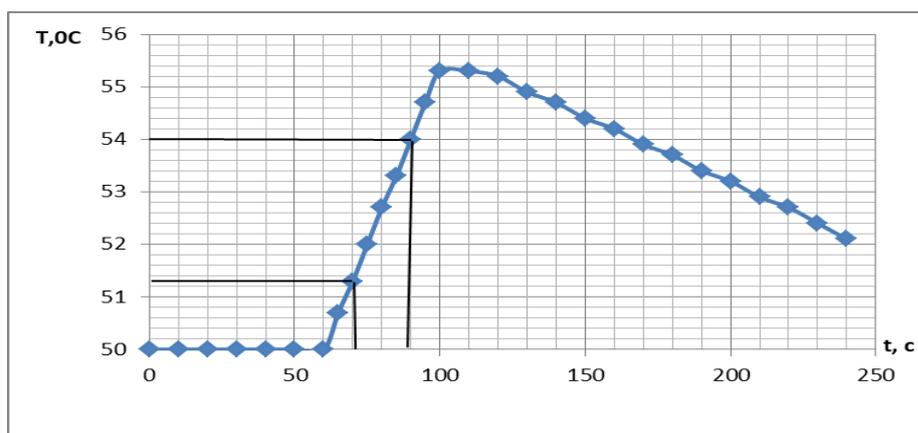


Рисунок А.10 – Измерение первое при влажности 45 процентов и 50<sup>0</sup>С

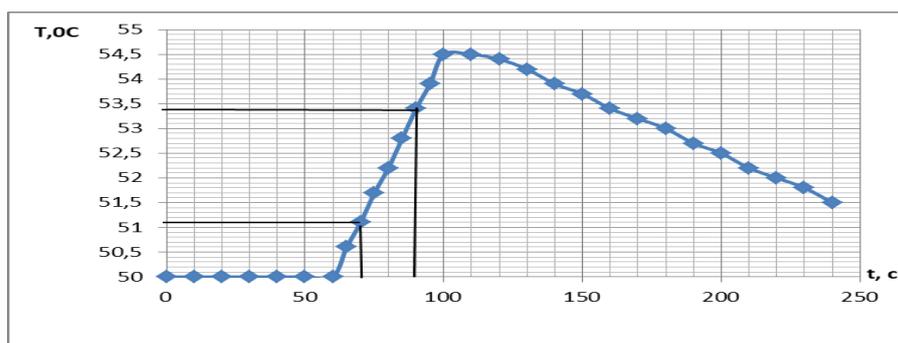


Рисунок А.11 – Измерение второе при влажности 45 процентов и 50<sup>0</sup>С

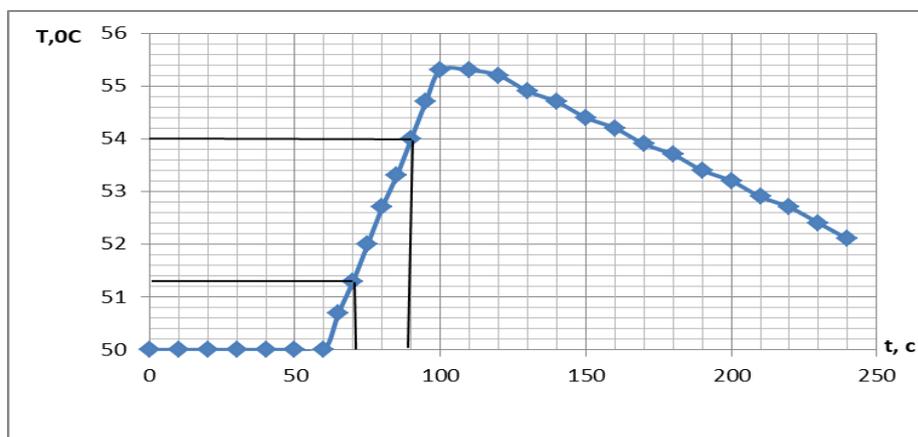


Рисунок А.12 – Измерение первое при влажности 45 процентов и 50<sup>0</sup>С

## Продолжение Приложения А

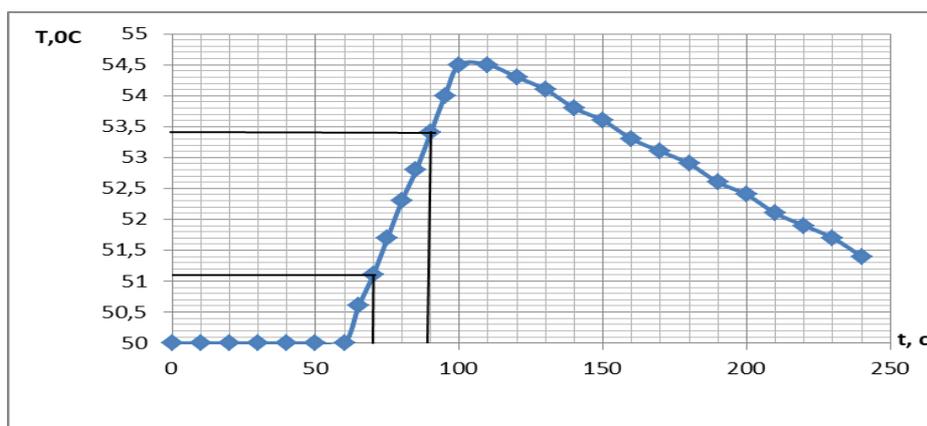


Рисунок А.13 – Измерение второе при влажности 45 процентов и 50°C

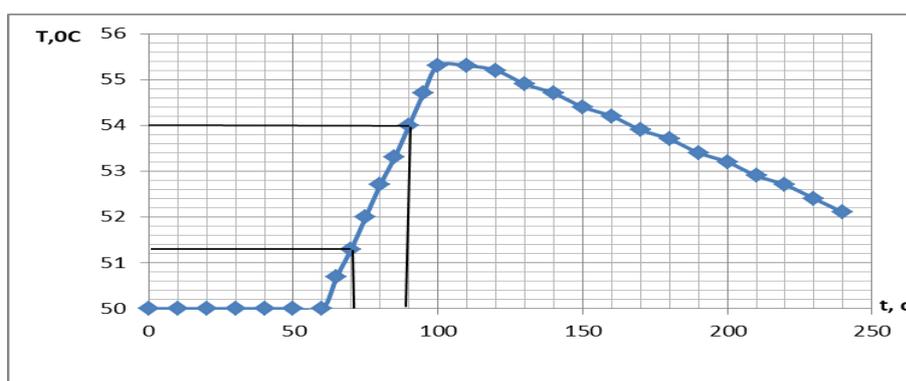


Рисунок А.14 – Измерение первое при влажности 45 процентов и 50°C

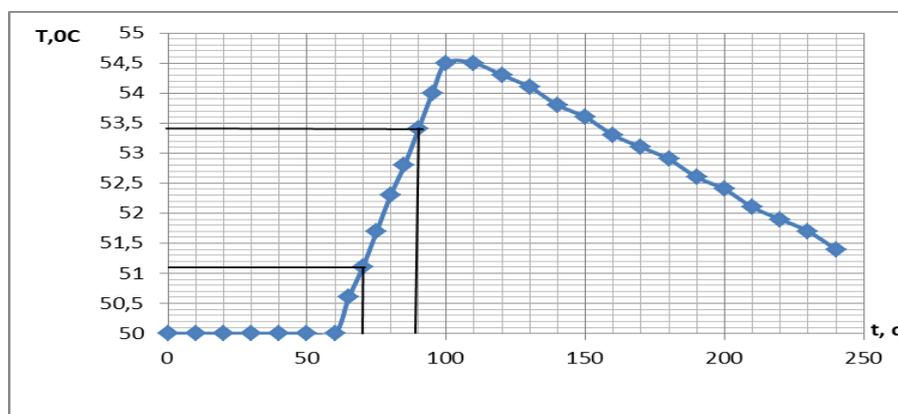


Рисунок А.15 – Измерение второе при влажности 45 процентов и 50°C

## Продолжение Приложения А

Произведем расчеты согласно формулам А.29 и А.30:

$$G_{30-20-1} = \frac{24,4-21,5}{90-70} = 0,145$$

$$G_{30-20-2} = \frac{23,8-21,3}{90-70} = 0,125$$

$$G_{30-80-1} = \frac{84,2-81,4}{90-70} = 0,140$$

$$G_{30-80-2} = \frac{83,6-81,0}{90-70} = 0,120$$

$$G_{60-20-1} = \frac{23,7-21,2}{90-70} = 0,125$$

$$G_{60-20-2} = \frac{23,1-21,0}{90-70} = 0,105$$

$$G_{60-80-1} = \frac{83,5-81,0}{90-70} = 0,125$$

$$G_{60-80-2} = \frac{83,0-80,9}{90-70} = 0,105$$

$$G_{45-50-1} = \frac{54,0-51,3}{90-70} = 0,135$$

$$G_{45-50-2} = \frac{53,4-51,1}{90-70} = 0,115$$

$$G_{45-50-1} = \frac{54,0-51,3}{90-70} = 0,135$$

$$G_{45-50-2} = \frac{53,4-51,1}{90-70} = 0,115$$

$$G_{45-50-1} = \frac{54,0-51,3}{90-70} = 0,135$$

## Продолжение Приложения А

$$G_{45-50-2} = \frac{53,4-51,1}{90-70} = 0,115$$

$$C_{30-20} = \frac{50 \cdot \left( \frac{1}{0,125} - \frac{1}{0,145} \right)}{(0,2431302-0,1030251)-(0,2230274-0,1030251)} = 2744,514 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$$

$$C_{30-80} = \frac{50 \cdot \left( \frac{1}{0,120} - \frac{1}{0,140} \right)}{(0,2443441-0,1040382)-(0,2240433-0,1040382)} = 2932,092 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$$

$$C_{60-20} = \frac{50 \cdot \left( \frac{1}{0,105} - \frac{1}{0,125} \right)}{(0,2433437-0,1030336)-(0,2229428-0,1030336)} = 3734,662 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$$

$$C_{60-80} = \frac{50 \cdot \left( \frac{1}{0,105} - \frac{1}{0,125} \right)}{(0,2428115-0,1029034)-(0,2234106-0,1029034)} = 3927,162 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$$

$$C_{45-50}' = \frac{50 \cdot \left( \frac{1}{0,115} - \frac{1}{0,135} \right)}{(0,2431563-0,1030595)-(0,2229604-0,1030595)} = 3189,372 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$$

$$C_{45-50}'' = \frac{50 \cdot \left( \frac{1}{0,115} - \frac{1}{0,135} \right)}{(0,2430976-0,1028997)-(0,2228275-0,1028997)} = 3177,697 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$$

$$C_{45-50}''' = \frac{50 \cdot \left( \frac{1}{0,115} - \frac{1}{0,135} \right)}{(0,2442075-0,1040012)-(0,2241183-0,1040012)} = 3206,312 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$$

Приступим к обработке результатов активного эксперимента. Приведем план эксперимента в таблице А.9.

Таблица А.9 – План эксперимента

$X_1$	$X_2$	$Y$
-	-	2744,514
-	+	2932,092
+	-	3734,662
+	+	3927,162

## Продолжение Приложения А

Определим коэффициенты уравнения по формулам А.3 – А.5:

$$b_0 = \frac{1}{4} \cdot (2744,514 + 2932,092 + 3734,662 + 3927,162) = 3334,608$$

$$b_1 = \frac{1}{4} \cdot ((-1) \cdot 2744,514 + (-1) \cdot 2932,092 + 1 \cdot 3734,662 + 1 \cdot 3927,162) = 496,305$$

$$b_2 = \frac{1}{4} \cdot ((-1) \cdot 2744,514 + 1 \cdot 2932,092 + (-1) \cdot 3734,662 + 1 \cdot 3927,162) = 95,0195$$

$$b_{12} = \frac{1}{4} \cdot ((-1) \cdot (-1) \cdot 2744,514 + (-1) \cdot 1 \cdot 2932,092 + 1 \cdot (-1) \cdot 3734,662 + 1 \cdot 1 \cdot 3927,162) = 1,231$$

Запишем функцию отклика согласно формуле 32, получим формулу А.31:

$$C_{w-T} = 3334,608 + 496,305 \cdot x_1 + 95,0195 \cdot x_2 + 1,231 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (\text{А.31})$$

Для трех определений в центре плана найдем среднее согласно формуле 21:

$$C_{\text{ср}} = \frac{3189,372 + 3177,697 + 3206,312}{3} = 3191,127 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Дисперсию воспроизводимости определим по формуле А.6:

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{(3189,372 - 3191,127)^2 + (3177,697 - 3191,127)^2 + (3206,312 - 3191,127)^2}{3-1} = 207,015$$

## Продолжение Приложения А

Оценку дисперсии коэффициента уравнения определим по формуле А.7, расчётные коэффициенты Стьюдента по формуле А.8:

$$S_b = \sqrt{\frac{207,015}{4}} = 7,194$$

$$t_{b0} = \frac{|3334,608|}{7,194} = 463,526$$

$$t_{b1} = \frac{|496,305|}{7,194} = 68,989$$

$$t_{b2} = \frac{|95,0195|}{7,194} = 13,208$$

$$t_{b12} = \frac{|1,231|}{7,194} = 0,171$$

Определим число степеней свободы по формуле А.9:

$$f_2 = 3 - 1 = 2$$

При уровне значимости, равном 0,05 (доверительная вероятность 0,95), и числе степеней свободы 2, табличный критерий Стьюдента – 12,706. Таким образом, значимыми признаются коэффициенты  $b_0$ ,  $b_1$  и  $b_2$ . Коэффициент  $b_{12}$  признается незначимым и исключается из уравнения, в результате чего получаем формулу А.32:

$$C_{w-T} = 3334,608 + 496,305 \cdot x_1 + 95,0195 \cdot x_2 \quad (\text{A.32})$$

## Продолжение Приложения А

Согласно формуле 62 определим расчетные значения функции отклика для всех вариантов условий.

$$C_{30-20} = 3334,608 + 496,305 \cdot (-1) + 95,0195 \cdot (-1) = 2743,284 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$$

$$C_{30-80} = 3334,608 + 496,305 \cdot (-1) + 95,0195 \cdot 1 = 2933,323 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$$

$$C_{60-20} = 3334,608 + 496,305 \cdot 1 + 95,0195 \cdot (-1) = 3735,894 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$$

$$C_{60-80} = 3334,608 + 496,305 \cdot 1 + 95,0195 \cdot 1 = 3925,933 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$$

Остаточную дисперсию определяют по формуле А.10, критерий Фишера – по формуле А.11:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{(2744,514 - 2743,284)^2 + (2932,092 - 2933,323)^2 + (3734,662 - 3735,894)^2 + (3927,162 - 3925,933)^2}{4 - 3} = 6,057$$

$$F = \frac{6,057}{207,015} = 0,0293$$

Число степеней свободы для дисперсии воспроизводимости определяется по формуле А.9, для остаточной дисперсии – по формуле А.12:

$$f_1 = 4 - 3 = 1$$

$$f_2 = 3 - 1 = 2$$

## Продолжение Приложения А

При уровне значимости, равном 0,05 (доверительная вероятность 0,95), и числах степеней свободы  $f_1$  и  $f_2$  равных 1 и 2 соответственно, табличный критерий Фишера равен 18,51. Поскольку расчётный критерий Фишера много меньше табличного, признаем уравнение адекватным.

Переведем уравнение в декодированный вид, для этого подставляем формулы А.20 и А.21 в формулу А.31, получаем формулу А.33:

$$C_{w-T} = 1687,327 + 33,087 \cdot W + 3,167 \cdot T \quad (\text{А.33})$$

Итак, разработана модель зависимости теплоемкости нефтешлама от влажности и температуры, доказана ее адекватность.

Приступим к разработке модели для теплопроводности. Определение теплопроводности проводили следующим образом. В измерительную капсулу помещали нефтешлам, предварительно выдержанный при температуре измерения, заполняя им капсулу на высоту, измеряемую глубиномером штангенциркуля.

После этого расположили нагреватель на оси цилиндрической капсулы и закрепили его на крышке, которой накрыта измерительная капсула. Включаем нагреватель, фиксируем изменение температуры каждые 30 секунд в двух точках на расстояниях 3 и 4 сантиметров от оси до установления постоянной разности температур между указанными точками. В отличие от определения теплоемкости капсула не изолируется для создания стационарного теплового потока.

## Продолжение Приложения А

Теплопроводность определяем по формуле А.34, разность температур по формуле А.35:

$$\lambda_{w-T} = \frac{W}{2 \cdot \pi \cdot \Delta T \cdot h} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (\text{А.34})$$

где  $W$  – мощность нагревателя, Вт;

$\Delta T$  – разность температур в двух точках  $^{\circ}\text{C}$ ;

$h$  – высота нагреваемого слоя, м;

$r_i$  – расстояние от оси до данной точки, м.

$$\Delta T = T_2 - T_1 \quad (\text{А.35})$$

где  $T_i$  – температура в данной точке,  $^{\circ}\text{C}$ .

Результаты измерений предоставим в таблицах А.10, А.11 и А.12.

Таблица А.10 – Результаты измерений

Влажность – 30 процентов и температура – 20 $^{\circ}\text{C}$				Влажность – 30 процентов и температура – 80 $^{\circ}\text{C}$				Влажность – 60 процентов и температура – 20 $^{\circ}\text{C}$				Влажность – 60 процентов и температура – 80 $^{\circ}\text{C}$			
t	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	$\Delta T$	t	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	$\Delta T$	t	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	$\Delta T$	t	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	$\Delta T$
0	20,0	20,0	0,0	0	80,0	80,0	0,0	0	20,0	20,0	0,0	0	80,0	80,0	0,0
30	20,9	20,0	0,9	30	80,7	80,0	0,7	30	20,8	20,0	0,8	30	80,8	80,0	0,8
60	21,7	20,1	1,6	60	81,5	80,0	1,5	60	21,6	20,0	1,6	60	81,4	80,0	1,4
90	22,5	20,1	2,4	90	82,3	79,9	2,4	90	22,3	20,1	2,2	90	82,2	79,9	2,3
120	23,6	20,1	3,5	120	83,1	79,9	3,2	120	23,1	20,1	3,0	120	82,9	79,9	3,0
150	23,9	20,2	3,7	150	83,7	79,9	3,8	150	24,1	20,2	3,9	150	83,5	79,9	3,6
180	24,5	20,2	4,3	180	84,5	79,9	4,6	180	24,7	20,2	4,5	180	84,2	79,9	4,3
210	25,1	20,2	4,9	210	85,4	79,9	5,5	210	25,5	20,3	5,2	210	84,9	79,9	5,0
240	26,0	20,2	5,8	240	86,1	79,7	6,4	240	26,5	20,3	6,2	240	85,4	79,9	5,5
270	27,1	20,3	6,8	270	86,6	79,6	7,0	270	26,8	20,4	6,4	270	85,6	79,8	5,8
300	28,0	20,3	7,7	300	86,6	79,6	7,0	300	27,1	20,4	6,7	300	85,8	79,8	6,0
330	28,0	20,3	7,7	330	86,6	79,6	7,0	330	27,1	20,4	6,7	330	85,8	79,8	6,0
360	28,0	20,3	7,7	360	86,6	79,6	7,0	360	27,1	20,4	6,7	360	85,8	79,8	6,0

## Продолжение Приложения А

Таблица А.11 – Результаты измерений

Влажность – 45 процентов и температура – 50 <sup>0</sup> С				Влажность – 45 процентов и температура – 50 <sup>0</sup> С				Влажность – 45 процентов и температура – 50 <sup>0</sup> С			
Т	Т <sub>1</sub>	Т <sub>2</sub>	ΔТ	Т	Т <sub>1</sub>	Т <sub>2</sub>	ΔТ	t	Т <sub>1</sub>	Т <sub>2</sub>	ΔТ
0	50,0	50,0	0,0	0	50,0	50,0	0,0	0	50,0	50,0	0,0
30	50,7	50,0	0,7	30	50,9	50,0	0,9	30	50,0	50,0	0,0
60	51,6	50,0	1,6	60	52,0	50,1	1,9	60	50,7	50,0	0,7
90	52,1	50,1	2,0	90	52,7	50,1	2,6	90	51,6	50,0	1,6
120	53,0	50,1	2,9	120	53,5	50,1	3,4	120	52,1	50,1	2,0
150	53,9	50,1	3,8	150	54,2	50,2	4,0	150	53,0	50,1	2,9
180	54,7	50,1	4,6	180	55,3	50,2	5,1	180	53,9	50,1	3,8
210	55,6	50,1	5,5	210	55,5	50,2	5,3	210	54,7	50,1	4,6
240	56,1	50,2	5,9	240	56,8	50,2	6,6	240	55,6	50,1	5,5
270	56,7	50,2	6,5	270	57,1	50,3	6,8	270	56,1	50,2	5,9
300	56,9	50,2	6,7	300	57,1	50,3	6,8	300	56,9	50,2	6,7
330	56,9	50,2	6,7	330	57,1	50,3	6,8	330	57,1	50,2	6,9
360	56,9	50,2	6,7	360	57,1	50,3	6,8	360	57,1	50,2	6,9

Таблица А.12 – Результаты измерений

Условия	Высота слоя нефтешлама в цилиндре, м
Влажность – 30 процентов и температура – 20 <sup>0</sup> С	0,1011
Влажность – 30 процентов и температура – 80 <sup>0</sup> С	0,1002
Влажность – 60 процентов и температура – 20 <sup>0</sup> С	0,0997
Влажность – 60 процентов и температура – 80 <sup>0</sup> С	0,1017
Влажность – 45 процентов и температура – 50 <sup>0</sup> С	0,1025
Влажность – 45 процентов и температура – 50 <sup>0</sup> С	0,1019
Влажность – 45 процентов и температура – 50 <sup>0</sup> С	0,1011

Произведем расчеты согласно формуле А.34:

$$\lambda_{30-20} = \frac{8}{2 \cdot \pi \cdot 7,7 \cdot 0,1011} \cdot \ln \frac{4}{3} = 0,471 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

$$\lambda_{30-80} = \frac{8}{2 \cdot \pi \cdot 7,0 \cdot 0,1002} \cdot \ln \frac{4}{3} = 0,522 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

$$\lambda_{60-20} = \frac{8}{2 \cdot \pi \cdot 6,7 \cdot 0,0997} \cdot \ln \frac{4}{3} = 0,548 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

$$\lambda_{60-80} = \frac{8}{2 \cdot \pi \cdot 6,0 \cdot 0,1017} \cdot \ln \frac{4}{3} = 0,600 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

## Продолжение Приложения А

$$\lambda_{45-50'} = \frac{8}{2 \cdot \pi \cdot 6,7 \cdot 0,1025} \cdot \ln \frac{4}{3} = 0,533 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

$$\lambda_{45-50''} = \frac{8}{2 \cdot \pi \cdot 6,8 \cdot 0,1019} \cdot \ln \frac{4}{3} = 0,529 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

$$\lambda_{45-50'''} = \frac{8}{2 \cdot \pi \cdot 6,9 \cdot 0,1011} \cdot \ln \frac{4}{3} = 0,525 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Приступим к обработке результатов активного эксперимента. Приведем план эксперимента в таблице А.13.

Таблица А.13 – План эксперимента

X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Y
-	-	0,471
-	+	0,522
+	-	0,548
+	+	0,600

Определим коэффициенты уравнения по формулам А.3 – А.5:

$$b_0 = \frac{1}{4} \cdot (0,471 + 0,522 + 0,548 + 0,600) = 0,5353$$

$$b_1 = \frac{1}{4} \cdot ((-1) \cdot 0,471 + (-1) \cdot 0,522 + 1 \cdot 0,548 + 1 \cdot 0,600) = 0,0388$$

$$b_2 = \frac{1}{4} \cdot ((-1) \cdot 0,471 + 1 \cdot 0,522 + (-1) \cdot 0,548 + 1 \cdot 0,600) = 0,0258$$

$$b_{12} = \frac{1}{4} \cdot ((-1) \cdot (-1) \cdot 0,471 + (-1) \cdot 1 \cdot 0,522 + 1 \cdot (-1) \cdot 0,548 + 1 \cdot 1 \cdot 0,600) = 0,00025$$

## Продолжение Приложения А

Запишем функцию отклика согласно формуле А.2, получим формулу А.36:

$$\lambda_{w-T} = 0,5353 + 0,0388 \cdot x_1 + 0,0258 \cdot x_2 + 0,00025 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (\text{А.6})$$

Для трех определений в центре плана найдем среднее согласно формуле 21:

$$\lambda_{\text{cp}} = \frac{0,533+0,529+0,525}{3} = 0,529 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$$

Дисперсию воспроизводимости определим по формуле А.6:

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{(0,533-0,529)^2 + (0,529-0,529)^2 + (0,525-0,529)^2}{3-1} = 0,000016$$

Оценку дисперсии коэффициента уравнения определим по формуле А.7, расчётные коэффициенты Стьюдента по формуле А.8:

$$S_b = \sqrt{\frac{0,000016}{4}} = 0,002$$

$$t_{b0} = \frac{|0,5353|}{0,002} = 267,650$$

$$t_{b1} = \frac{|0,0388|}{0,002} = 19,400$$

$$t_{b2} = \frac{|0,0258|}{0,002} = 12,900$$

$$t_{b12} = \frac{|0,00025|}{0,002} = 0,125$$

## Продолжение Приложения А

Определим число степеней свободы по формуле А.9:

$$f_2 = 3 - 1 = 2$$

При уровне значимости, равном 0,05 (доверительная вероятность 0,95), и числе степеней свободы 2, табличный критерий Стьюдента – 12,706. Таким образом, значимыми признаются коэффициенты  $b_0$ ,  $b_1$  и  $b_2$ . Коэффициент  $b_{12}$  признается незначимым и исключается из уравнения, в результате чего получаем формулу А.37:

$$\lambda_{w-T} = 0,5353 + 0,0388 \cdot x_1 + 0,0258 \cdot x_2 \quad (\text{А.37})$$

Согласно формуле А.37 определим расчетные значения функции отклика для всех вариантов условий.

$$\lambda_{30-20} = 0,5353 + 0,0388 \cdot (-1) + 0,0258 \cdot (-1) = 0,471 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$$

$$\lambda_{30-80} = 0,5353 + 0,0388 \cdot (-1) + 0,0258 \cdot 1 = 0,522 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$$

$$\lambda_{60-20} = 0,5353 + 0,0388 \cdot 1 + 0,0258 \cdot (-1) = 0,548 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$$

$$\lambda_{60-80} = 0,5353 + 0,0388 \cdot 1 + 0,0258 \cdot 1 = 0,600 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$$

Остаточную дисперсию определяют по формуле А.10, критерий Фишера – по формуле А.11:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{(0,471-0,471)^2 + (0,522-0,522)^2 + (0,548-0,548)^2 + (0,600-0,600)^2}{4-3} = 0$$

## Продолжение Приложения А

$$F = \frac{0}{0,000016} = 0$$

Число степеней свободы для дисперсии воспроизводимости определяется по формуле А.9, для остаточной дисперсии – по формуле А.12:

$$f_1 = 4 - 3 = 1$$

$$f_2 = 3 - 1 = 2$$

При уровне значимости, равном 0,05 (доверительная вероятность 0,95), и числах степеней свободы  $f_1$  и  $f_2$  равных 1 и 2 соответственно, табличный критерий Фишера равен 18,51. Поскольку расчётный критерий Фишера много меньше табличного, признаем уравнение адекватным.

Переведем уравнение в декодированный вид, для этого подставляем формулы А.20 и А.21 в формулу А.37, получаем формулу А.38:

$$\lambda_{w-T} = 0,3759 + 0,00259 \cdot W + 0,00086 \cdot T \quad (\text{А.38})$$

Итак, разработана модель зависимости теплоемкости нефтешлама от влажности и температуры, доказана ее адекватность [7,9,13,16,22,23].

## Приложение Б

### Расчет теплообменных аппаратов

Таблица Б.1 – Расчет аппарата Т – 1, часть 1

W, %	t <sub>ср</sub> , °C	ρ <sub>2</sub> , кг/м <sup>3</sup>	μ <sub>2</sub> , Па·с	C <sub>2</sub> , Дж/кг·K	λ <sub>2</sub> , Вт/м·K	V <sub>2</sub> , м <sup>3</sup> /ч	G <sub>2</sub> , кг/с	t <sub>2н</sub> , °C	t <sub>2к</sub> , °C
30	30	1039,141	0,0687	2774,947	0,479	60	17,319	10	50
35	30	1035,981	0,0737	2940,382	0,492	60	17,266	10	50
40	30	1032,821	0,0787	3105,817	0,505	60	17,217	10	50
45	30	1029,661	0,0837	3271,252	0,518	60	17,161	10	50
50	30	1026,501	0,0887	3436,687	0,531	60	17,108	10	50
55	30	1023,341	0,0937	3602,122	0,544	60	17,0557	10	50
60	30	1020,181	0,0987	3767,557	0,557	60	17,00302	10	50

Таблица Б.2 – Расчет аппарата Т – 1, часть 2

W, %	t <sub>1н</sub> , °C	t <sub>1к</sub> , °C	Δt <sub>2</sub> , °C	Q, Вт	γ <sub>1</sub> , Дж/кг	G <sub>1</sub> , кг/с	Δt <sub>δ</sub> , °C	Δt <sub>м</sub> , °C	ΔT <sub>ср</sub> , °C
30	80	80	40	1922374,134	2310000	0,832	70	30	47,209
35	80	80	40	2030786,590	2310000	0,879	70	30	47,209
40	80	80	40	2138502,013	2310000	0,926	70	30	47,209
45	80	80	40	2245520,404	2310000	0,972	70	30	47,209
50	80	80	40	2351841,761	2310000	1,0181	70	30	47,209
55	80	80	40	2457466,086	2310000	1,0638	70	30	47,209
60	80	80	40	2562393,379	2310000	1,109	70	30	47,209

Таблица Б.3 – Расчет аппарата Т – 1, часть 3

W, %	K <sub>оп</sub> , Вт/м <sup>2</sup> ·K	F <sub>оп</sub> , м <sup>2</sup>	d <sub>внеш</sub> , м	δ <sub>ст</sub> , м	d <sub>внутр</sub> , м	Re <sub>2оп</sub>	n/z <sub>оп</sub>	n	z
30	160	254,504	0,025	0,002	0,021	100	153	958	6
35	160	268,856	0,025	0,002	0,021	100	142	958	6
40	160	283,117	0,025	0,002	0,021	100	133	958	6
45	160	297,285	0,025	0,002	0,021	100	124	958	6
50	160	311,361	0,025	0,002	0,021	100	117	958	6
55	160	325,345	0,025	0,002	0,021	100	110	958	6
60	160	339,236	0,025	0,002	0,021	100	105	958	6

Таблица Б.4 – Расчет аппарата Т – 1, часть 4

W, %	L, м	D, м	F, м <sup>2</sup>	P	R	η	δ	ε	ΔT <sub>ср</sub> , °C
30	4	1,2	301	0,571	0	1	1,180	1	47,209
35	4	1,2	301	0,571	0	1	1,180	1	47,209
40	4	1,2	301	0,571	0	1	1,180	1	47,209

## Продолжение Приложения Б

Продолжение таблицы Б.4

W, %	L, м	D, м	F, м <sup>2</sup>	P	R	η	δ,	ε	ΔT <sub>ср</sub> , 0С
45	4	1,2	301	0,571	0	1	1,180	1	47,209
50	4	1,2	301	0,571	0	1	1,180	1	47,209
55	4	1,2	301	0,571	0	1	1,180	1	47,209
60	4	1,2	301	0,571	0	1	1,180	1	47,209

Таблица Б.5 – Расчет аппарата Т – 1, часть 5

W, %	F <sub>оре</sub> , м <sup>2</sup>	Re <sub>2</sub>	B, 1/К	t <sub>ср1</sub> , 0С	t <sub>ср2</sub> , 0С	ΔT, 0С	Gr <sub>2</sub>	Pr <sub>2</sub>	a <sub>1ор</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К
30	254,504	95,791	0,000527	79,600	78,804	45,937	503,343	397,604	18861,420
35	268,856	89,0202	0,000527	79,592	78,751	45,882	434,172	440,0868	18519,620
40	283,117	83,110	0,000527	79,585	78,700	45,826	377,977	483,667	18203,310
45	297,285	77,905	0,000527	79,578	78,649	45,772	331,726	528,261	17909,410
50	311,361	73,288	0,000527	79,572	78,598	45,718	293,221	573,795	17635,360
55	325,345	69,163	0,000527	79,565	78,548	45,665	260,840	620,202	17378,990
60	339,236	65,456	0,000527	79,559	78,498	45,612	233,359	667,421	17138,460

Таблица Б.6 – Расчет аппарата Т – 1, часть 6

W, %	Gr <sub>2</sub> Pr <sub>2</sub>	Re <sub>2</sub> Pr <sub>2</sub> d/l	a <sub>2</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	a <sub>1</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	λ <sub>ср</sub> , Вт/м·К	1/r <sub>1</sub> , м <sup>2</sup> К/Вт	1/r <sub>2</sub> , м <sup>2</sup> К/Вт	K, Вт/м <sup>2</sup> К	F <sub>y</sub> , м <sup>2</sup>
30	200130,757	199,957	177,992	18861,417	17,5	5800	1160	146,627	277,715
35	191073,287	205,677	181,683	18519,625	17,5	5800	1160	149,101	288,509
40	182814,628	211,036	185,773	18203,311	17,5	5800	1160	151,823	298,366
45	175237,537	216,060	190,126	17909,410	17,5	5800	1160	154,696	307,477
50	168248,810	220,773	194,662	17635,357	17,5	5800	1160	157,665	315,973
55	161773,141	225,198	199,328	17378,986	17,5	5800	1160	160,690	323,948
60	155748,805	229,355	204,088	17138,455	17,5	5800	1160	163,747	331,472

Таблица Б.7 – Расчет аппарата Т – 1, часть 7

W, %	Δ, %	w <sub>тп</sub> , м/с	w <sub>ш</sub> , м/с	A	λ	d <sub>ш</sub> , м
30	7,736	0,0503	0,944	64	0,668	0,150
35	4,150	0,0503	0,944	64	0,719	0,150
40	0,875	0,0503	0,944	64	0,770	0,150
45	-2,152	0,0503	0,944	64	0,822	0,150
50	-4,974	0,0503	0,944	64	0,873	0,150
55	-7,624	0,0503	0,944	64	0,925	0,150
60	-10,124	0,0503	0,944	64	0,978	0,150

## Продолжение Приложения Б

Таблица Б.8 – Расчет аппарата Т – 1, часть 8

W, %	$\Delta P_{тр}$ , Па	$\mu_{2ст}$ , Па·с	$\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu_1$ , Па·с	$C_1$ , Дж/кг·К	$\lambda_1$ , Вт/м·К
30	2421,987	0,0254	972	0,000355	4190	0,675
35	2490,600	0,0304	972	0,000355	4190	0,675
40	2559,213	0,0355	972	0,000355	4190	0,675
45	2627,827	0,0405	972	0,000355	4190	0,675
50	2696,440	0,0456	972	0,000355	4190	0,675
55	2765,053	0,0506	972	0,000355	4190	0,675
60	2833,667	0,0557	972	0,000355	4190	0,675

Таблица Б.9 – Расчет аппарата Т – 2, часть 1

W, %	$t_{ср}$ , °C	$\rho_2$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu_2$ , Па·с	$C_2$ , Дж/кг·К	$\lambda_2$ , Вт/м·К	$V_2$ , м <sup>3</sup> /ч	$G_2$ , кг/с	$t_{2н}$ , °C	$t_{2к}$ , °C
30	30	1039,141	0,0687	2774,947	0,479	60	17,319	10	50
35	30	1035,981	0,0737	2940,382	0,492	60	17,266	10	50
40	30	1032,821	0,0787	3105,817	0,505	60	17,217	10	50
45	30	1029,661	0,0837	3271,252	0,518	60	17,161	10	50
50	30	1026,501	0,0887	3436,687	0,531	60	17,108	10	50
55	30	1023,341	0,0937	3602,122	0,544	60	17,0557	10	50
60	30	1020,181	0,0987	3767,557	0,557	60	17,00302	10	50

Таблица Б.10 – Расчет аппарата Т – 2, часть 2

W, %	$t_{1н}$ , °C	$t_{1к}$ , °C	$\Delta t_2$ , °C	Q, Вт	$r_1$ , Дж/кг	$G_1$ , кг/с	$\Delta t_5$ , °C	$\Delta t_m$ , °C	$\Delta T_{ср}$ , °C
30	80	80	40	1922374,134	2310000	0,832	70	30	47,209
35	80	80	40	2030786,590	2310000	0,879	70	30	47,209
40	80	80	40	2138502,013	2310000	0,926	70	30	47,209
45	80	80	40	2245520,404	2310000	0,972	70	30	47,209
50	80	80	40	2351841,761	2310000	1,0181	70	30	47,209
55	80	80	40	2457466,086	2310000	1,0638	70	30	47,209
60	80	80	40	2562393,379	2310000	1,109	70	30	47,209

Таблица Б.11 – Расчет аппарата Т – 2, часть 3

W, %	$K_{ор}$ , Вт/м <sup>2</sup> ·К	$F_{ор}$ , м <sup>2</sup>	$d_{внеш}$ , м	$\delta_{ст}$ , м	$d_{внутр}$ , м	$Re_{2ор}$	n/z оп	n	z
30	160	254,504	0,025	0,002	0,021	100	153	986	4
35	160	268,856	0,025	0,002	0,021	100	142	986	4
40	160	283,117	0,025	0,002	0,021	100	133	986	4
45	160	297,285	0,025	0,002	0,021	100	125	986	4
50	160	311,361	0,025	0,002	0,021	100	117	986	4
55	160	325,345	0,025	0,002	0,021	100	110	986	4
60	160	339,236	0,025	0,002	0,021	100	105	986	4

## Продолжение Приложения Б

Таблица Б.12 – Расчет аппарата Т – 2, часть 4

W, %	L, м	D, м	F, м <sup>2</sup>	P	R	η	δ,	ε	ΔT <sub>ср</sub> , °C
30	4	1,2	310	0,571	0	1	1,180	1	47,209
35	4	1,2	310	0,571	0	1	1,180	1	47,209
40	4	1,2	310	0,571	0	1	1,180	1	47,209
45	4	1,2	310	0,571	0	1	1,180	1	47,209
50	4	1,2	310	0,571	0	1	1,180	1	47,209
55	4	1,2	310	0,571	0	1	1,180	1	47,209
60	4	1,2	310	0,571	0	1	1,180	1	47,209

Таблица Б.13 – Расчет аппарата Т – 2, часть 5

W, %	F <sub>оп</sub> , м <sup>2</sup>	Re <sub>2</sub>	B, 1/K	t <sub>cr1</sub> , °C	t <sub>cr2</sub> , °C	ΔT, °C	Gr <sub>2</sub>	Pr <sub>2</sub>	a <sub>1оп</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К
30	254,504	62,047	0,000527	79,603	200253,351	45,965	503,651	397,603	19043,413
35	268,856	57,662	0,000527	79,596	191196,4584	45,911	434,452	440,087	18698,323
40	283,117	53,833	0,000527	79,589	182938,3028	45,857	378,232	483,667	18378,957
45	297,285	50,462	0,000527	79,582	175361,6407	45,804	331,960	528,261	18082,220
50	311,361	47,471	0,000527	79,575	168373,2693	45,752	293,438	573,795	17805,522
55	325,345	44,799	0,000527	79,570	161897,8823	45,700	261,041	620,202	17546,678
60	339,236	42,398	0,000527	79,563	155873,7582	45,649	233,546	667,421	17303,826

Таблица Б.14 – Расчет аппарата Т – 2, часть 6

W, %	Gr <sub>2</sub> Pr <sub>2</sub>	Re <sub>2</sub> Pr <sub>2</sub> d/l	a <sub>2</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	a <sub>1</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	λ <sub>cr</sub> , Вт/м·К	1/r <sub>1</sub> , м <sup>2</sup> К/Вт	1/r <sub>2</sub> , м <sup>2</sup> К/Вт	K, Вт/м <sup>2</sup> К	F <sub>y</sub> , м <sup>2</sup>
30	200253,351	129,519	154,024	19043,413	17,5	5800	1160	129,976	313,294
35	191196,458	133,224	157,216	18698,323	17,5	5800	1160	132,224	325,335
40	182938,303	136,695	160,753	18378,957	17,5	5800	1160	134,700	336,294
45	175361,641	139,949	164,518	18082,220	17,5	5800	1160	137,317	346,393
50	168373,269	143,002	168,442	17805,522	17,5	5800	1160	140,023	355,782
55	161897,882	145,869	172,479	17546,678	17,5	5800	1160	142,784	364,572
60	155873,758	148,561	176,597	17303,826	17,5	5800	1160	145,578	372,843

Таблица Б.15 – Расчет аппарата Т – 2, часть 7

W, %	Δ, %	w <sub>тр</sub> , м/с	w <sub>ш</sub> , м/с	A	λ	d <sub>ш</sub> , м
30	-1,063	0,0488	0,943	64	1,031	0,150
35	-4,947	0,0488	0,943	64	1,110	0,150
40	-8,482	0,0488	0,943	64	1,189	0,150

Продолжение Приложения Б

Продолжение таблицы Б.15

W, %	$\Delta$ , %	$w_{тр}$ , М/с	$w_{ш}$ , М/с	A	$\lambda$	$d_{ш}$ , М
45	-11,740	0,0488	0,943	64	1,268	0,150
50	-14,769	0,0488	0,943	64	1,348	0,150
55	-17,604	0,0488	0,943	64	1,429	0,150
60	-20,272	0,0488	0,943	64	1,509	0,150

Таблица Б.16 – Расчет аппарата Т – 1, часть 8

W, %	$\Delta P_{тр}$ , Па	$\mu_{2ст}$ , Па·с	$\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu_1$ , Па·с	$C_1$ , Дж/кг·К	$\lambda_1$ , Вт/м·К
30	2380,586	0,02537	972	0,000355	4190	0,675
35	2447,167	0,03042	972	0,000355	4190	0,675
40	2513,749	0,03547	972	0,000355	4190	0,675
45	2580,331	0,04051	972	0,000355	4190	0,675
50	2646,912	0,04556	972	0,000355	4190	0,675
55	2713,494	0,05060	972	0,000355	4190	0,675
60	2780,076	0,05564	972	0,000355	4190	0,675

Таблица Б.17 – Расчет аппарата Т – 3, часть 1

W, %	$t_{ср}$ , °C	$\rho_2$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu_2$ , Па·с	$C_2$ , Дж/кг·К	$\lambda_2$ , Вт/м·К	$V_2$ , м <sup>3</sup> /ч	$G_2$ , кг/с	$t_{2н}$ , °C	$t_{2к}$ , °C
30	30	1039,141	0,0687	2774,947	0,479	60	17,319	10	50
35	30	1035,981	0,0737	2940,382	0,492	60	17,266	10	50
40	30	1032,821	0,0787	3105,817	0,505	60	17,217	10	50
45	30	1029,661	0,0837	3271,252	0,518	60	17,161	10	50
50	30	1026,501	0,0887	3436,687	0,531	60	17,108	10	50
55	30	1023,341	0,0937	3602,122	0,544	60	17,0557	10	50
60	30	1020,181	0,0987	3767,557	0,557	60	17,00302	10	50

Таблица Б.18 – Расчет аппарата Т – 3, часть 2

W, %	$t_{1н}$ , °C	$t_{1к}$ , °C	$\Delta t_2$ , °C	Q, Вт	$\gamma_1$ , Дж/кг	$G_1$ , кг/с	$\Delta t_6$ , °C	$\Delta t_m$ , °C	$\Delta T_{ср}$ , °C
30	80	80	40	1922374,134	2310000	0,832	70	30	47,209
35	80	80	40	2030786,590	2310000	0,879	70	30	47,209
40	80	80	40	2138502,013	2310000	0,926	70	30	47,209
45	80	80	40	2245520,404	2310000	0,972	70	30	47,209
50	80	80	40	2351841,761	2310000	1,0181	70	30	47,209
55	80	80	40	2457466,086	2310000	1,0638	70	30	47,209
60	80	80	40	2562393,379	2310000	1,109	70	30	47,209

## Продолжение Приложения Б

Таблица Б.19 – Расчет аппарата Т – 3, часть 3

W, %	K <sub>оп</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	F <sub>оп</sub> , м <sup>2</sup>	d <sub>внеш</sub> , м	δ <sub>ст</sub> , м	d <sub>внутр</sub> , м	Re <sub>2оп</sub>	n/z <sub>оп</sub>	n	z
30	160	254,504	0,025	0,002	0,021	100	152,9469294	465	1
35	160	268,856	0,025	0,002	0,021	100	142,135654	465	1
40	160	283,117	0,025	0,002	0,021	100	132,6982858	465	1
45	160	297,285	0,025	0,002	0,021	100	124,3885753	465	1
50	160	311,361	0,025	0,002	0,021	100	117,0158038	465	1
55	160	325,345	0,025	0,002	0,021	100	110,4299648	465	1
60	160	339,236	0,025	0,002	0,021	100	104,5114516	465	1

Таблица Б.20 – Расчет аппарата Т – 3, часть 4

W, %	L, м	D, м	F, м <sup>2</sup>	P	R	η	δ,	ε	ΔT <sub>ср</sub> , 0С
30	9	0,8	329	0,571	0	1	1,180	1	47,209
35	9	0,8	329	0,571	0	1	1,180	1	47,209
40	9	0,8	329	0,571	0	1	1,180	1	47,209
45	9	0,8	329	0,571	0	1	1,180	1	47,209
50	9	0,8	329	0,571	0	1	1,180	1	47,209
55	9	0,8	329	0,571	0	1	1,180	1	47,209
60	9	0,8	329	0,571	0	1	1,180	1	47,209

Таблица Б.21 – Расчет аппарата Т – 3, часть 5

W, %	F <sub>оре</sub> , м <sup>2</sup>	Re <sub>2</sub>	B, 1/К	t <sub>ср1</sub> , 0С	t <sub>ср2</sub> , 0С	ΔT, 0С	Gr <sub>2</sub>	Pr <sub>2</sub>	a <sub>1оп</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К
30	254,504	32,892	0,000527	79,611	200495,908	30,515	504,261	397,603	19423,655
35	268,856	30,567	0,000527	79,604	191440,123	31,388	435,005	440,087	19071,675
40	283,117	28,537	0,000527	79,597	183182,933	32,206	378,738	483,667	18745,932
45	297,285	26,750	0,000527	79,590	175607,091	32,973	332,425	528,261	18443,270
50	311,361	25,165	0,000527	79,584	168619,394	33,692	293,867	573,795	18161,047
55	325,345	23,748	0,000527	79,578	162144,541	34,367	261,438	620,202	17897,035
60	339,236	22,476	0,000527	79,572	156120,813	35,002	233,917	667,421	17649,334

Таблица Б.22 – Расчет аппарата Т – 3, часть 6

W, %	Gr <sub>2</sub> Pr <sub>2</sub>	Re <sub>2</sub> Pr <sub>2</sub> d/l	a <sub>2</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	a <sub>1</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	λ <sub>ст</sub> , Вт/м·К	1/r <sub>1</sub> , м <sup>2</sup> К/Вт	1/r <sub>2</sub> , м <sup>2</sup> К/Вт	K, Вт/м <sup>2</sup> К	F <sub>y</sub> , м <sup>2</sup>
30	200495,908	30,515	95,154	19423,655	17,5	5800	1160	85,401	476,818
35	191440,123	31,388	97,123	19071,674	17,5	5800	1160	86,976	494,586
40	183182,933	32,206	99,305	18745,932	17,5	5800	1160	88,715	510,609

## Продолжение Приложения Б

Продолжение таблицы Б.22

W, %	Gr <sub>2</sub> Pr <sub>2</sub>	Re <sub>2</sub> Pr <sub>2</sub> d/l	a <sub>2</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	a <sub>1</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	λ <sub>ст</sub> , Вт/м·К	1/r <sub>1</sub> , м <sup>2</sup> К/Вт	1/r <sub>2</sub> , м <sup>2</sup> К/Вт	K, Вт/м <sup>2</sup> К	F <sub>y</sub> , м <sup>2</sup>
45	175607,091	32,973	101,630	18443,270	17,5	5800	1160	90,558	525,248
50	168619,394	33,692	104,053	18161,048	17,5	5800	1160	92,470	538,747
55	162144,541	34,367	106,545	17897,035	17,5	5800	1160	94,425	551,283
60	156120,8123	35,002	109,088	17649,334	17,5	5800	1160	96,410	562,988

Таблица Б.23 – Расчет аппарата Т – 3, часть 7

W, %	Δ, %	w <sub>тр</sub> , м/с	w <sub>ш</sub> , м/с	A	λ	d <sub>ш</sub> , м
30	-44,930	0,104	0,944	64	1,946	0,150
35	-50,330	0,104	0,944	64	2,094	0,150
40	-55,200	0,104	0,944	64	2,243	0,150
45	-59,650	0,104	0,944	64	2,393	0,150
50	-63,753	0,104	0,944	64	2,543	0,150
55	-67,563	0,104	0,944	64	2,695	0,150
60	-71,121	0,104	0,944	64	2,848	0,150

Таблица Б.24 – Расчет аппарата Т – 3, часть 8

W, %	ΔP <sub>тр</sub> , Па	μ <sub>2ст</sub> , Па·с	ρ <sub>1</sub> , кг/м <sup>3</sup>	μ <sub>1</sub> , Па·с	C <sub>1</sub> , Дж/кг·К	λ <sub>1</sub> , Вт/м·К
30	6043,499	0,0253	972	0,000355	4190	0,675
35	6377,318	0,0304	972	0,000355	4190	0,675
40	6711,137	0,0354	972	0,000355	4190	0,675
45	7044,956	0,0405	972	0,000355	4190	0,675
50	7378,776	0,0455	972	0,000355	4190	0,675
55	7712,595	0,0505	972	0,000355	4190	0,675
60	8046,414	0,0556	972	0,000355	4190	0,675

Таблица Б.25 – Расчет аппарата Т – 4, часть 1

W, %	t <sub>ср</sub> , °С	ρ <sub>2</sub> , кг/м <sup>3</sup>	μ <sub>2</sub> , Па·с	C <sub>2</sub> , Дж/кг·К	λ <sub>2</sub> , Вт/м·К	V <sub>2</sub> , м <sup>3</sup> /ч	G <sub>2</sub> , кг/с	t <sub>2н</sub> , °С	t <sub>2к</sub> , °С
30	30	1039,141	0,0687	2774,947	0,479	60	17,319	10	50
35	30	1035,981	0,0737	2940,382	0,492	60	17,266	10	50
40	30	1032,821	0,0787	3105,817	0,505	60	17,217	10	50
45	30	1029,661	0,0837	3271,252	0,518	60	17,161	10	50
50	30	1026,501	0,0887	3436,687	0,531	60	17,108	10	50
55	30	1023,341	0,0937	3602,122	0,544	60	17,0557	10	50
60	30	1020,181	0,0987	3767,557	0,557	60	17,00302	10	50

## Продолжение Приложения Б

Таблица Б.26 – Расчет аппарата Т – 4, часть 2

W, %	t <sub>н</sub> , °C	t <sub>к</sub> , °C	Δt <sub>2</sub> , °C	Q, Вт	г <sub>1</sub> , Дж/кг	G <sub>1</sub> , кг/с	Δt <sub>6</sub> , °C	Δt <sub>м</sub> , °C	ΔT <sub>ср</sub> , °C
30	80	80	40	1922374,134	2310000	0,832	70	30	47,209
35	80	80	40	2030786,590	2310000	0,879	70	30	47,209
40	80	80	40	2138502,013	2310000	0,926	70	30	47,209
45	80	80	40	2245520,404	2310000	0,972	70	30	47,209
50	80	80	40	2351841,761	2310000	1,0181	70	30	47,209
55	80	80	40	2457466,086	2310000	1,0638	70	30	47,209
60	80	80	40	2562393,379	2310000	1,109	70	30	47,209

Таблица Б.27 – Расчет аппарата Т – 4, часть 3

W, %	K <sub>оп</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	F <sub>оп</sub> , м <sup>2</sup>	d <sub>внеш</sub> , м	δ <sub>ст</sub> , м	d <sub>внутр</sub> , м	Re <sub>2оп</sub>	n/z оп	n	z
30	160	254,504	0,025	0,002	0,021	100	152,9469294	718	2
35	160	268,856	0,025	0,002	0,021	100	142,135654	718	2
40	160	283,117	0,025	0,002	0,021	100	132,6982858	718	2
45	160	297,285	0,025	0,002	0,021	100	124,3885753	718	2
50	160	311,361	0,025	0,002	0,021	100	117,0158038	718	2
55	160	325,345	0,025	0,002	0,021	100	110,4299648	718	2
60	160	339,236	0,025	0,002	0,021	100	104,5114516	718	2

Таблица Б.28 – Расчет аппарата Т – 4, часть 4

W, %	L, м	D, м	F, м <sup>2</sup>	P	R	η	δ,	ε	ΔT <sub>ср</sub> , °C
30	6	1	338	0,571	0	1	1,180	1	47,209
35	6	1	338	0,571	0	1	1,180	1	47,209
40	6	1	338	0,571	0	1	1,180	1	47,209
45	6	1	338	0,571	0	1	1,180	1	47,209
50	6	1	338	0,571	0	1	1,180	1	47,209
55	6	1	338	0,571	0	1	1,180	1	47,209
60	6	1	338	0,571	0	1	1,180	1	47,209

Таблица Б.29 – Расчет аппарата Т – 4, часть 5

W, %	F <sub>оп</sub> , м <sup>2</sup>	Re <sub>2</sub>	B, 1/К	t <sub>ср1</sub> , °C	t <sub>ср2</sub> , °C	ΔT, °C	Gr <sub>2</sub>	Pr <sub>2</sub>	a <sub>1оп</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К
30	254,504	42,604	0,000527	79,615	78,907	46,047	504,547	397,603	19612,112
35	268,856	39,592	0,000527	79,608	78,860	45,997	435,265	440,087	19256,717
40	283,117	36,963	0,000527	79,601	78,813	45,948	378,975	483,667	18927,814
45	297,285	34,649	0,000527	79,594	78,767	45,899	332,643	528,261	18622,215
50	311,361	32,595	0,000527	79,588	78,722	45,850	294,068	573,795	18337,254
55	325,345	30,760	0,000527	79,582	78,677	45,802	261,625	620,202	18070,680
60	339,236	29,112	0,000527	79,576	78,633	45,755	234,090	667,421	17820,576

## Продолжение Приложения Б

Таблица Б.30 – Расчет аппарата Т – 4, часть 6

W, %	$Gr_2Pr_2$	$Re_2Pr_2d/l$	$a_2$ , Вт/м <sup>2</sup> К	$a_1$ , Вт/м <sup>2</sup> К	$\lambda_{ст}$ , Вт/м·К	$1/r_1$ , м <sup>2</sup> К/Вт	$1/r_2$ , м <sup>2</sup> К/Вт	K, Вт/м <sup>2</sup> К	$F_y$ , м <sup>2</sup>
30	200609,734	59,288	118,749	19612,112	17,5	5800	1160	103,941	391,768
35	191554,453	60,984	121,203	19256,717	17,5	5800	1160	105,806	406,565
40	183297,701	62,573	123,926	18927,814	17,5	5800	1160	107,864	419,960
45	175722,230	64,062	126,826	18622,215	17,5	5800	1160	110,044	432,241
50	168734,837	65,460	129,849	18337,254	17,5	5800	1160	112,302	443,606
55	162260,221	66,772	132,958	18070,680	17,5	5800	1160	114,610	454,195
60	156236,667	68,004	136,131	17820,576	17,5	5800	1160	116,949	464,116

Таблица Б.31 – Расчет аппарата Т – 4, часть 7

W, %	$\Delta$ , %	$w_{TP}$ , м/с	$w_{ш}$ , м/с	A	$\lambda$	$d_{ш}$ , м
30	-15,908	0,067	0,944	64	1,502	0,150
35	-20,285	0,067	0,944	64	1,616	0,150
40	-24,248	0,067	0,944	64	1,731	0,150
45	-27,882	0,067	0,944	64	1,847	0,150
50	-31,244	0,067	0,944	64	1,963	0,150
55	-34,377	0,067	0,944	64	2,081	0,150
60	-37,312	0,067	0,944	64	2,198	0,150

Таблица Б.32 – Расчет аппарата Т – 4, часть 8

W, %	$\Delta P_{TP}$ , Па	$\mu_{2ст}$ , Па·с	$\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu_1$ , Па·с	$C_1$ , Дж/кг·К	$\lambda_1$ , Вт/м·К
30	3408,353	0,0253	972	0,000355	4190	0,675
35	3550,052	0,0304	972	0,000355	4190	0,675
40	3691,750	0,0354	972	0,000355	4190	0,675
45	3833,448	0,0404	972	0,000355	4190	0,675
50	3975,146	0,0455	972	0,000355	4190	0,675
55	4116,845	0,0505	972	0,000355	4190	0,675
60	4258,543	0,0556	972	0,000355	4190	0,675

Таблица Б.33 – Расчет аппарата Т – 5, часть 1

W, %	$t_{cp}$ , °C	$\rho_2$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu_2$ , Па·с	$C_2$ , Дж/кг·К	$\lambda_2$ , Вт/м·К	$V_2$ , м <sup>3</sup> /ч	$G_2$ , кг/с	$t_{2н}$ , °C	$t_{2к}$ , °C
30	30	1039,141	0,0687	2774,947	0,479	60	17,319	10	50
35	30	1035,981	0,0737	2940,382	0,492	60	17,266	10	50
40	30	1032,821	0,0787	3105,817	0,505	60	17,217	10	50

## Продолжение Приложения Б

Продолжение таблицы Б.33

W, %	t <sub>ср</sub> , °C	ρ <sub>2</sub> , кг/м <sup>3</sup>	μ <sub>2</sub> , Па·с	C <sub>2</sub> , Дж/кг·K	λ <sub>2</sub> , Вт/м·K	V <sub>2</sub> , м <sup>3</sup> /ч	G <sub>2</sub> , кг/с	t <sub>н</sub> , °C	t <sub>к</sub> , °C
45	30	1029,661	0,0837	3271,252	0,518	60	17,161	10	50
50	30	1026,501	0,0887	3436,687	0,531	60	17,108	10	50
55	30	1023,341	0,0937	3602,122	0,544	60	17,0557	10	50
60	30	1020,181	0,0987	3767,557	0,557	60	17,00302	10	50

Таблица Б.34 – Расчет аппарата Т – 5, часть 2

W, %	t <sub>н</sub> , °C	t <sub>к</sub> , °C	Δt <sub>2</sub> , °C	Q, Вт	r <sub>1</sub> , Дж/кг	G <sub>1</sub> , кг/с	Δt <sub>δ</sub> , °C	Δt <sub>м</sub> , °C	ΔT <sub>ср</sub> , °C
30	80	80	40	1922374,134	2310000	0,832	70	30	47,209
35	80	80	40	2030786,590	2310000	0,879	70	30	47,209
40	80	80	40	2138502,013	2310000	0,926	70	30	47,209
45	80	80	40	2245520,404	2310000	0,972	70	30	47,209
50	80	80	40	2351841,761	2310000	1,0181	70	30	47,209
55	80	80	40	2457466,086	2310000	1,0638	70	30	47,209
60	80	80	40	2562393,379	2310000	1,109	70	30	47,209

Таблица Б.35 – Расчет аппарата Т – 5, часть 3

W, %	K <sub>оп</sub> , Вт/м <sup>2</sup> ·K	F <sub>оп</sub> , м <sup>2</sup>	d <sub>внеш</sub> , м	δ <sub>ст</sub> , м	d <sub>внутр</sub> , м	Re <sub>2оп</sub>	n/z оп	n	z
30	160	254,504	0,02	0,002	0,016	100	200,743	618	6
35	160	268,856	0,02	0,002	0,016	100	186,553	618	6
40	160	283,117	0,02	0,002	0,016	100	174,167	618	6
45	160	297,285	0,02	0,002	0,016	100	163,260	618	6
50	160	311,361	0,02	0,002	0,016	100	153,583	618	6
55	160	325,345	0,02	0,002	0,016	100	144,939	618	6
60	160	339,236	0,02	0,002	0,016	100	137,171	618	6

Таблица Б.36 – Расчет аппарата Т – 5, часть 4

W, %	L, м	D, м	F, м <sup>2</sup>	P	R	η	δ,	ε	ΔT <sub>ср</sub> , °C
30	9	0,8	349	0,571	0	1	1,180	1	47,209
35	9	0,8	349	0,571	0	1	1,180	1	47,209
40	9	0,8	349	0,571	0	1	1,180	1	47,209
45	9	0,8	349	0,571	0	1	1,180	1	47,209
50	9	0,8	349	0,571	0	1	1,180	1	47,209
55	9	0,8	349	0,571	0	1	1,180	1	47,209
60	9	0,8	349	0,571	0	1	1,180	1	47,209

Продолжение Приложения Б

Таблица Б.37 – Расчет аппарата Т – 5, часть 5

W, %	F <sub>оре</sub> , м <sup>2</sup>	Re <sub>2</sub>	B, 1/К	t <sub>ст1</sub> , °С	t <sub>ст2</sub> , °С	ΔТ, °С	Gr <sub>2</sub>	Pr <sub>2</sub>	a <sub>1оп</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К
30	254,504	194,896	0,000527	79,646	88803,786	137,762	223,348	397,603	21355,486
35	268,856	181,119	0,000527	79,640	84797,201	141,704	192,683	440,087	20968,499
40	283,117	169,094	0,000527	79,634	81143,889	145,396	167,768	483,667	20610,359
45	297,285	158,505	0,000527	79,627	77791,979	148,857	147,261	528,261	20277,595
50	311,361	149,110	0,000527	79,622	74700,237	152,104	130,186	573,795	19967,303
55	325,345	140,718	0,000527	79,616	71835,348	155,153	115,826	620,202	19677,032
60	339,236	133,176	0,000527	79,611	69170,009	158,017	103,638	667,421	19404,696

Таблица Б.38 – Расчет аппарата Т – 5, часть 6

W, %	Gr <sub>2</sub> Pr <sub>2</sub>	Re <sub>2</sub> Pr <sub>2</sub> d/l	a <sub>2</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	a <sub>1</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	λ <sub>ст</sub> , Вт/м·К	1/Γ <sub>1</sub> , м <sup>2</sup> К/Вт	1/Γ <sub>2</sub> , м <sup>2</sup> К/Вт	K, Вт/м <sup>2</sup> К	F <sub>у</sub> , м <sup>2</sup>
30	88803,786	137,762	206,474	21355,486	17,5	5800	1160	165,595	245,904
35	84797,201	141,704	210,737	20968,499	17,5	5800	1160	168,301	255,595
40	81143,889	145,396	215,466	20610,359	17,5	5800	1160	171,280	264,471
45	77791,9799	148,857	220,505	20277,595	17,5	5800	1160	174,425	272,700
50	74700,237	152,104	225,757	19967,303	17,5	5800	1160	177,671	280,394
55	71835,348	155,153	231,161	19677,032	17,5	5800	1160	180,977	287,635
60	69170,009	158,0167	236,675	19404,696	17,5	5800	1160	184,314	294,484

Таблица Б.39 – Расчет аппарата Т – 5, часть 7

W, %	Δ, %	w <sub>тп</sub> , м/с	w <sub>шт</sub> , м/с	A	λ	d <sub>шт</sub> , м
30	29,540	0,134	0,944	64	0,328	0,150
35	26,764	0,134	0,944	64	0,353	0,150
40	24,220	0,134	0,944	64	0,378	0,150
45	21,862	0,134	0,944	64	0,404	0,150
50	19,658	0,134	0,944	64	0,429	0,150
55	17,583	0,134	0,944	64	0,455	0,150
60	15,621	0,134	0,944	64	0,481	0,150

Таблица Б.40 – Расчет аппарата Т – 5, часть 8

W, %	ΔP <sub>тп</sub> , Па	μ <sub>2ст</sub> , Па·с	ρ <sub>1</sub> , кг/м <sup>3</sup>	μ <sub>1</sub> , Па·с	C <sub>1</sub> , Дж/кг·К	λ <sub>1</sub> , Вт/м·К
30	11987,582	0,0253	972	0,000355	4190	0,675
35	12737,536	0,0303	972	0,000355	4190	0,675
40	13487,490	0,0354	972	0,000355	4190	0,675

## Продолжение Приложения Б

### Продолжение таблицы Б.40

W, %	$\Delta P_{тр}$ , Па	$\mu_{2ст}$ , Па·с	$\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu_1$ , Па·с	$C_1$ , Дж/кг·К	$\lambda_1$ , Вт/м·К
45	14237,444	0,0403	972	0,000355	4190	0,675
50	14987,398	0,0454	972	0,000355	4190	0,675
55	15737,352	0,0505	972	0,000355	4190	0,675
60	16487,306	0,0555	972	0,000355	4190	0,675

### Таблица Б.41 – Расчет аппарата Т – б, часть 1

W, %	$t_{ср}$ , °С	$\rho_2$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu_2$ , Па·с	$C_2$ , Дж/кг·К	$\lambda_2$ , Вт/м·К	$V_2$ , м <sup>3</sup> /ч	$G_2$ , кг/с	$t_{2н}$ , °С	$t_{2к}$ , °С
30	30	1039,141	0,0687	2774,947	0,479	60	17,319	10	50
35	30	1035,981	0,0737	2940,382	0,492	60	17,266	10	50
40	30	1032,821	0,0787	3105,817	0,505	60	17,217	10	50
45	30	1029,661	0,0837	3271,252	0,518	60	17,161	10	50
50	30	1026,501	0,0887	3436,687	0,531	60	17,108	10	50
55	30	1023,341	0,0937	3602,122	0,544	60	17,0557	10	50
60	30	1020,181	0,0987	3767,557	0,557	60	17,00302	10	50

### Таблица Б.42 – Расчет аппарата Т – б, часть 2

W, %	$t_{1н}$ , °С	$t_{1к}$ , °С	$\Delta t_2$ , °С	Q, Вт	$\gamma_1$ , Дж/кг	$G_1$ , кг/с	$\Delta t_6$ , °С	$\Delta t_m$ , °С	$\Delta T_{ср}$ , °С
30	80	80	40	1922374,134	2310000	0,832	70	30	47,209
35	80	80	40	2030786,590	2310000	0,879	70	30	47,209
40	80	80	40	2138502,013	2310000	0,926	70	30	47,209
45	80	80	40	2245520,404	2310000	0,972	70	30	47,209
50	80	80	40	2351841,761	2310000	1,0181	70	30	47,209
55	80	80	40	2457466,086	2310000	1,0638	70	30	47,209
60	80	80	40	2562393,379	2310000	1,109	70	30	47,209

### Таблица Б.43 – Расчет аппарата Т – б, часть 3

W, %	$K_{оп}$ , Вт/м <sup>2</sup> ·К	$F_{оп}$ , м <sup>2</sup>	$d_{внеш}$ , м	$\delta_{ст}$ , м	$d_{внутр}$ , м	$Re_{2оп}$	n/z оп	n	z
30	160	254,504	0,02	0,002	0,016	100	201	638	4
35	160	268,856	0,02	0,002	0,016	100	187	638	4
40	160	283,117	0,02	0,002	0,016	100	174	638	4
45	160	297,285	0,02	0,002	0,016	100	163	638	4
50	160	311,361	0,02	0,002	0,016	100	154	638	4
55	160	325,345	0,02	0,002	0,016	100	145	638	4
60	160	339,236	0,02	0,002	0,016	100	137	638	4

Продолжение Приложения Б

Таблица Б.44 – Расчет аппарата Т – б, часть 4

W, %	L, м	D, м	F, м <sup>2</sup>	P	R	η	δ,	ε	ΔT <sub>ср</sub> , 0C
30	9	0,8	361	0,571	0	1	1,180	1	47,209
35	9	0,8	361	0,571	0	1	1,180	1	47,209
40	9	0,8	361	0,571	0	1	1,180	1	47,209
45	9	0,8	361	0,571	0	1	1,180	1	47,209
50	9	0,8	361	0,571	0	1	1,180	1	47,209
55	9	0,8	361	0,571	0	1	1,180	1	47,209
60	9	0,8	361	0,571	0	1	1,180	1	47,209

Таблица Б.45 – Расчет аппарата Т – б, часть 5

W, %	F <sub>оре</sub> , м <sup>2</sup>	Re <sub>2</sub>	B, 1/K	t <sub>ср1</sub> , 0C	t <sub>ср2</sub> , 0C	ΔT, 0C	Gr <sub>2</sub>	Pr <sub>2</sub>	a <sub>1оп</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К
30	254,504	125,858	0,000527	79,650	88856,563	88,963	223,480	397,603	21583,417
35	268,856	116,961	0,000527	79,644	84850,224	91,508	192,803	440,087	21192,299
40	283,117	109,195	0,000527	79,637	81197,128	93,892	167,878	483,667	20830,337
45	297,285	102,357	0,000527	79,631	77845,401	96,127	147,362	528,261	20494,021
50	311,361	96,290	0,000527	79,626	74753,810	98,224	130,280	573,795	20180,417
55	325,345	90,871	0,000527	79,620	71889,041	100,193	115,912	620,202	19887,048
60	339,236	86,001	0,000527	79,615	69223,792	102,042	103,718	667,421	19611,805

Таблица Б.46 – Расчет аппарата Т – б, часть 6

W, %	Gr <sub>2</sub> Pr <sub>2</sub>	Re <sub>2</sub> Pr <sub>2</sub> d/l	a <sub>2</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	a <sub>1</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	λ <sub>ср</sub> , Вт/м·К	1/r <sub>1</sub> , м <sup>2</sup> К/Вт	1/r <sub>2</sub> , м <sup>2</sup> К/Вт	K, Вт/м <sup>2</sup> К	F <sub>y</sub> , м <sup>2</sup>
30	88856,563	88,963	178,489	21583,417	17,5	5800	1160	147,1099 0507	276,805
35	84850,224	91,508	182,171	21192,299	17,5	5800	1160	149,582	287,581
40	81197,128	93,892	186,258	20830,337	17,5	5800	1160	152,307	297,417
45	77845,401	96,127	190,612	20494,021	17,5	5800	1160	155,187	306,505
50	74753,810	98,224	195,151	20180,417	17,5	5800	1160	158,164	314,976
55	71889,041	100,193	199,821	19887,048	17,5	5800	1160	161,199	322,926
60	69223,792	102,042	204,587	19611,805	17,5	5800	1160	164,267	330,424

Таблица Б.47 – Расчет аппарата Т – б, часть 7

W, %	Δ, %	w <sub>тр</sub> , м/с	w <sub>ш</sub> , м/с	A	λ	d <sub>ш</sub> , м
30	23,323	0,130	0,944	64	0,509	0,150
35	20,338	0,130	0,944	64	0,547	0,150
40	17,613	0,130	0,944	64	0,586	0,150

## Продолжение Приложения Б

Продолжение таблицы Б.47

W, %	$\Delta$ , %	$w_{TP}$ , М/с	$w_{ш}$ , М/с	A	$\lambda$	$d_{ш}$ , М
45	15,096	0,130	0,944	64	0,625	0,150
50	12,749	0,130	0,944	64	0,665	0,150
55	10,547	0,130	0,944	64	0,704	0,150
60	8,470	0,130	0,944	64	0,744	0,150

Таблица Б.48 – Расчет аппарата Т – 6, часть 8

W, %	$\Delta P_{TP}$ , Па	$\mu_{2ст}$ , Па·с	$\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu_1$ , Па·с	$C_1$ , Дж/кг·К	$\lambda_1$ , Вт/м·К
30	11569,324	0,0253	972	0,000355	4190	0,675
35	12295,898	0,0303	972	0,000355	4190	0,675
40	13022,472	0,0353	972	0,000355	4190	0,675
45	13749,046	0,0404	972	0,000355	4190	0,675
50	14475,619	0,0454	972	0,000355	4190	0,675
55	15202,193	0,0504	972	0,000355	4190	0,675
60	15928,767	0,0555	972	0,000355	4190	0,675

Таблица Б.49 – Расчет аппарата Т – 7, часть 1

W, %	$t_{cp}$ , °C	$\rho_2$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu_2$ , Па·с	$C_2$ , Дж/кг·К	$\lambda_2$ , Вт/м·К	$V_2$ , м <sup>3</sup> /ч	$G_2$ , кг/с	$t_{2н}$ , °C	$t_{2к}$ , °C
30	30	1039,141	0,0687	2774,947	0,479	60	17,319	10	50
35	30	1035,981	0,0737	2940,382	0,492	60	17,266	10	50
40	30	1032,821	0,0787	3105,817	0,505	60	17,217	10	50
45	30	1029,661	0,0837	3271,252	0,518	60	17,161	10	50
50	30	1026,501	0,0887	3436,687	0,531	60	17,108	10	50
55	30	1023,341	0,0937	3602,122	0,544	60	17,0557	10	50
60	30	1020,181	0,0987	3767,557	0,557	60	17,00302	10	50

Таблица Б.50 – Расчет аппарата Т – 7, часть 2

W, %	$t_{1н}$ , °C	$t_{1к}$ , °C	$\Delta t_2$ , °C	Q, Вт	$\Gamma_1$ , Дж/кг	$G_1$ , кг/с	$\Delta t_6$ , °C	$\Delta t_m$ , °C	$\Delta T_{cp}$ , °C
30	80	80	40	1922374,134	2310000	0,832	70	30	47,209
35	80	80	40	2030786,590	2310000	0,879	70	30	47,209
40	80	80	40	2138502,013	2310000	0,926	70	30	47,209
45	80	80	40	2245520,404	2310000	0,972	70	30	47,209
50	80	80	40	2351841,761	2310000	1,0181	70	30	47,209
55	80	80	40	2457466,086	2310000	1,0638	70	30	47,209
60	80	80	40	2562393,379	2310000	1,109	70	30	47,209

## Продолжение Приложения Б

Таблица Б.51 – Расчет аппарата Т – 7, часть 3

W, %	K <sub>оп</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	F <sub>оп</sub> , м <sup>2</sup>	d <sub>внеш</sub> , м	δ <sub>ст</sub> , м	d <sub>внутр</sub> , м	Re <sub>2оп</sub>	n/z оп	n	z
30	160	254,504	0,02	0,002	0,016	100	201	1544	6
35	160	268,856	0,02	0,002	0,016	100	186,553	1544	6
40	160	283,117	0,02	0,002	0,016	100	174,167	1544	6
45	160	297,285	0,02	0,002	0,016	100	163,260	1544	6
50	160	311,361	0,02	0,002	0,016	100	153,583	1544	6
55	160	325,345	0,02	0,002	0,016	100	144,939	1544	6
60	160	339,236	0,02	0,002	0,016	100	137,171	1544	6

Таблица Б.52 – Расчет аппарата Т – 7, часть 4

W, %	L, м	D, м	F, м <sup>2</sup>	P	R	η	δ,	ε	ΔT <sub>ср</sub> , 0С
30	4	1,2	388	0,571	0	1	1,180	1	47,209
35	4	1,2	388	0,571	0	1	1,180	1	47,209
40	4	1,2	388	0,571	0	1	1,180	1	47,209
45	4	1,2	388	0,571	0	1	1,180	1	47,209
50	4	1,2	388	0,571	0	1	1,180	1	47,209
55	4	1,2	388	0,571	0	1	1,180	1	47,209
60	4	1,2	388	0,571	0	1	1,180	1	47,209

Таблица Б.53 – Расчет аппарата Т – 7, часть 5

W, %	F <sub>оре</sub> , м <sup>2</sup>	Re <sub>2</sub>	B, 1/К	t <sub>ст1</sub> , 0С	t <sub>ст2</sub> , 0С	ΔT, 0С	Gr <sub>2</sub>	Pr <sub>2</sub>	a <sub>1оп</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К
30	254,504	78,009	0,000527	79,658	88971,737	124,066	223,770	397,603	22114,047
35	268,856	72,495	0,000527	79,652	84965,917	127,616	193,066	440,087	21713,314
40	283,117	67,681	0,000527	79,646	81313,273	130,941	168,118	483,667	21342,452
45	297,285	63,443	0,000527	79,640	77961,930	134,058	147,582	528,261	20997,868
50	311,361	59,683	0,000527	79,635	74870,653	136,982	130,483	573,795	20676,555
55	325,345	56,324	0,000527	79,629	72006,132	139,728	116,101	620,202	20375,973
60	339,236	53,305	0,000527	79,624	69341,066	142,307	103,894	667,421	20093,963

Таблица Б.54 – Расчет аппарата Т – 7, часть 6

W, %	Gr <sub>2</sub> Pr <sub>2</sub>	Re <sub>2</sub> Pr <sub>2</sub> d/l	a <sub>2</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	a <sub>1</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	λ <sub>ст</sub> , Вт/м·К	1/r <sub>1</sub> , м <sup>2</sup> К/Вт	1/r <sub>2</sub> , м <sup>2</sup> К/Вт	K, Вт/м <sup>2</sup> К	F <sub>y</sub> , м <sup>2</sup>
30	88971,737	124,066	199,472	22114,047	17,5	5800	1160	161,102	252,762
35	84965,917	127,616	203,580	21713,314	17,5	5800	1160	163,749	262,701
40	81313,273	130,941	208,141	21342,452	17,5	5800	1160	166,665	271,795

## Продолжение Приложения Б

Продолжение таблицы Б.54

W, %	Gr <sub>2</sub> Pr <sub>2</sub>	Re <sub>2</sub> Pr <sub>2</sub> d/l	a <sub>2</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	a <sub>1</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	λ <sub>ст</sub> , Вт/м·К	1/r <sub>1</sub> , м <sup>2</sup> К/Вт	1/r <sub>2</sub> , м <sup>2</sup> К/Вт	K, Вт/м <sup>2</sup> К	F <sub>y</sub> , м <sup>2</sup>
45	77961,930	134,058	213,002	20997,868	17,5	5800	1160	169,746	280,217
50	74870,653	136,982	218,071	20676,555	17,5	5800	1160	172,927	288,085
55	72006,132	139,728	223,288	20375,973	17,5	5800	1160	176,169	295,484
60	69341,066	142,307	228,611	20093,963	17,5	5800	1160	179,444	302,478

Таблица Б.55 – Расчет аппарата Т – 7, часть 7

W, %	Δ, %	w <sub>тр</sub> , м/с	w <sub>ш</sub> , м/с	A	λ	d <sub>ш</sub> , м
30	34,855	0,0537	0,944	64	0,820	0,150
35	32,294	0,0537	0,944	64	0,883	0,150
40	29,950	0,0537	0,944	64	0,946	0,150
45	27,779	0,0537	0,944	64	1,009	0,150
50	25,751	0,0537	0,944	64	1,072	0,150
55	23,844	0,0537	0,944	64	1,136	0,150
60	22,042	0,0537	0,944	64	1,201	0,150

Таблица Б.56 – Расчет аппарата Т – 7, часть 8

W, %	ΔP <sub>тр</sub> , Па	μ <sub>2ст</sub> , Па·с	ρ <sub>1</sub> , кг/м <sup>3</sup>	μ <sub>1</sub> , Па·с	C <sub>1</sub> , Дж/кг·К	λ <sub>1</sub> , Вт/м·К
30	3269,456	0,0252	972	0,000355	4190	0,675
35	3399,410	0,0302	972	0,000355	4190	0,675
40	3529,364	0,0353	972	0,000355	4190	0,675
45	3659,318	0,0403	972	0,000355	4190	0,675
50	3789,272	0,0453	972	0,000355	4190	0,675
55	3919,226	0,0504	972	0,000355	4190	0,675
60	4049,180	0,0554	972	0,000355	4190	0,675

Таблица Б.57 – Расчет аппарата Т – 8, часть 1

W, %	t <sub>ср</sub> , °С	ρ <sub>2</sub> , кг/м <sup>3</sup>	μ <sub>2</sub> , Па·с	C <sub>2</sub> , Дж/кг·К	λ <sub>2</sub> , Вт/м·К	V <sub>2</sub> , м <sup>3</sup> /ч	G <sub>2</sub> , кг/с	t <sub>2н</sub> , °С	t <sub>2к</sub> , °С
30	30	1039,141	0,0687	2774,947	0,479	60	17,319	10	50
35	30	1035,981	0,0737	2940,382	0,492	60	17,266	10	50
40	30	1032,821	0,0787	3105,817	0,505	60	17,217	10	50
45	30	1029,661	0,0837	3271,252	0,518	60	17,161	10	50
50	30	1026,501	0,0887	3436,687	0,531	60	17,108	10	50
55	30	1023,341	0,0937	3602,122	0,544	60	17,0557	10	50
60	30	1020,181	0,0987	3767,557	0,557	60	17,00302	10	50

Продолжение Приложения Б

Таблица Б.58 – Расчет аппарата Т – 8, часть 2

W, %	t <sub>н</sub> , °C	t <sub>к</sub> , °C	Δt <sub>2</sub> , °C	Q, Вт	г <sub>1</sub> , Дж/кг	G <sub>1</sub> , кг/с	Δt <sub>6</sub> , °C	Δt <sub>м</sub> , °C	ΔT <sub>ср</sub> , °C
30	80	80	40	1922374,134	2310000	0,832	70	30	47,209
35	80	80	40	2030786,590	2310000	0,879	70	30	47,209
40	80	80	40	2138502,013	2310000	0,926	70	30	47,209
45	80	80	40	2245520,404	2310000	0,972	70	30	47,209
50	80	80	40	2351841,761	2310000	1,0181	70	30	47,209
55	80	80	40	2457466,086	2310000	1,0638	70	30	47,209
60	80	80	40	2562393,379	2310000	1,109	70	30	47,209

Таблица Б.59 – Расчет аппарата Т – 8, часть 3

W, %	K <sub>оп</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	F <sub>оп</sub> , м <sup>2</sup>	d <sub>внеш</sub> , м	δ <sub>ст</sub> , м	d <sub>внутр</sub> , м	Re <sub>2оп</sub>	n/z <sub>оп</sub>	n	z
30	160	254,504	0,02	0,002	0,016	100	201	1044	6
35	160	268,856	0,02	0,002	0,016	100	187	1044	6
40	160	283,117	0,02	0,002	0,016	100	174	1044	6
45	160	297,285	0,02	0,002	0,016	100	163	1044	6
50	160	311,361	0,02	0,002	0,016	100	154	1044	6
55	160	325,345	0,02	0,002	0,016	100	145	1044	6
60	160	339,236	0,02	0,002	0,016	100	137	1044	6

Таблица Б.60 – Расчет аппарата Т – 8, часть 4

W, %	L, м	D, м	F, м <sup>2</sup>	P	R	η	δ,	ε	ΔT <sub>ср</sub> , °C
30	6	1	393	0,571	0	1	1,180	1	47,209
35	6	1	393	0,571	0	1	1,180	1	47,209
40	6	1	393	0,571	0	1	1,180	1	47,209
45	6	1	393	0,571	0	1	1,180	1	47,209
50	6	1	393	0,571	0	1	1,180	1	47,209
55	6	1	393	0,571	0	1	1,180	1	47,209
60	6	1	393	0,571	0	1	1,180	1	47,209

Таблица Б.61 – Расчет аппарата Т – 8, часть 5

W, %	F <sub>оп</sub> , м <sup>2</sup>	Re <sub>2</sub>	B, 1/К	t <sub>ср1</sub> , °C	t <sub>ср2</sub> , °C	ΔT, °C	Gr <sub>2</sub>	Pr <sub>2</sub>	a <sub>1оп</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К
30	254,504	115,369	0,000527	79,660	88993,236	122,323	223,824	397,603	22218,585
35	268,856	107,214	0,000527	79,654	84987,511	125,823	193,115	440,087	21815,957
40	283,117	100,096	0,000527	79,648	81334,949	129,101	168,163	483,667	21443,342
45	297,285	93,828	0,000527	79,642	77983,674	132,174	147,623	528,261	21097,129
50	311,361	88,266	0,000527	79,636	74892,453	135,058	130,521	573,795	20774,297
55	325,345	83,298	0,000527	79,631	72027,977	137,765	116,136	620,202	20472,294
60	339,236	78,834	0,000527	79,626	69362,943	140,308	103,927	667,421	20188,951

## Продолжение Приложения Б

Таблица Б.62 – Расчет аппарата Т – 8, часть 6

W, %	Gr <sub>2</sub> Pr <sub>2</sub>	Re <sub>2</sub> Pr <sub>2</sub> d/l	a <sub>2</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	a <sub>1</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	λ <sub>ст</sub> , Вт/м·К	1/r <sub>1</sub> , м <sup>2</sup> К/Вт	1/r <sub>2</sub> , м <sup>2</sup> К/Вт	K, Вт/м <sup>2</sup> К	F <sub>y</sub> , м <sup>2</sup>
30	88993,236	122,323	198,543	22218,585	17,5	5800	1160	160,502	253,708
35	84987,511	125,823	202,631	21815,957	17,5	5800	1160	163,141	263,681
40	81334,949	129,101	207,170	21443,342	17,5	5800	1160	166,048	272,805
45	77983,674	132,174	212,009	21097,129	17,5	5800	1160	169,120	281,254
50	74892,454	135,058	217,053	20774,297	17,5	5800	1160	172,293	289,146
55	72027,977	137,765	222,245	20472,294	17,5	5800	1160	175,526	296,567
60	69362,943	140,308	227,543	20188,951	17,5	5800	1160	178,792	303,580

Таблица Б.63 – Расчет аппарата Т – 8, часть 7

W, %	Δ, %	w <sub>тп</sub> , м/с	w <sub>шт</sub> , м/с	A	λ	d <sub>шт</sub> , м
30	35,443	0,0794	0,944	64	0,555	0,150
35	32,906	0,0794	0,944	64	0,597	0,150
40	30,584	0,0794	0,944	64	0,639	0,150
45	28,434	0,0794	0,944	64	0,682	0,150
50	26,426	0,0794	0,944	64	0,725	0,150
55	24,538	0,0794	0,944	64	0,768	0,150
60	22,753	0,0794	0,944	64	0,812	0,150

Таблица Б.64 – Расчет аппарата Т – 8, часть 8

W, %	ΔP <sub>тп</sub> , Па	μ <sub>2ст</sub> , Па·с	ρ <sub>1</sub> , кг/м <sup>3</sup>	μ <sub>1</sub> , Па·с	C <sub>1</sub> , Дж/кг·К	λ <sub>1</sub> , Вт/м·К
30	5560,779	0,0252	972	0,000355	4190	0,675
35	5854,213	0,0302	972	0,000355	4190	0,675
40	6147,648	0,0353	972	0,000355	4190	0,675
45	6441,083	0,0403	972	0,000355	4190	0,675
50	6734,518	0,0453	972	0,000355	4190	0,675
55	7027,952	0,05041	972	0,000355	4190	0,675
60	7321,387	0,0554	972	0,000355	4190	0,675

Таблица Б.65 – Расчет аппарата Т – 9, часть 1

W, %	t <sub>ср</sub> , °С	ρ <sub>2</sub> , кг/м <sup>3</sup>	μ <sub>2</sub> , Па·с	C <sub>2</sub> , Дж/кг·К	λ <sub>2</sub> , Вт/м·К	V <sub>2</sub> , м <sup>3</sup> /ч	G <sub>2</sub> , кг/с	t <sub>2н</sub> , °С	t <sub>2к</sub> , °С
30	30	1039,141	0,0687	2774,947	0,479	60	17,319	10	50
35	30	1035,981	0,0737	2940,382	0,492	60	17,266	10	50
40	30	1032,821	0,0787	3105,817	0,505	60	17,217	10	50

Продолжение Приложения Б

Продолжение таблицы Б.65

W, %	t <sub>ср</sub> , °C	ρ <sub>2</sub> , кг/м <sup>3</sup>	μ <sub>2</sub> , Па·с	C <sub>2</sub> , Дж/кг·К	λ <sub>2</sub> , Вт/м·К	V <sub>2</sub> , м <sup>3</sup> /ч	G <sub>2</sub> , кг/с	t <sub>2п</sub> , °C	t <sub>2к</sub> , °C
45	30	1029,661	0,0837	3271,252	0,518	60	17,161	10	50
50	30	1026,501	0,0887	3436,687	0,531	60	17,108	10	50
55	30	1023,341	0,0937	3602,122	0,544	60	17,0557	10	50
60	30	1020,181	0,0987	3767,557	0,557	60	17,00302	10	50

Таблица Б.66 – Расчет аппарата Т – 9, часть 2

W, %	t <sub>1п</sub> , °C	t <sub>1к</sub> , °C	Δt <sub>2</sub> , °C	Q, Вт	r <sub>1</sub> , Дж/кг	G <sub>1</sub> , кг/с	Δt <sub>6</sub> , °C	Δt <sub>м</sub> , °C	ΔT <sub>ср</sub> , °C
30	80	80	40	1922374,134	2310000	0,832	70	30	47,209
35	80	80	40	2030786,590	2310000	0,879	70	30	47,209
40	80	80	40	2138502,013	2310000	0,926	70	30	47,209
45	80	80	40	2245520,404	2310000	0,972	70	30	47,209
50	80	80	40	2351841,761	2310000	1,0181	70	30	47,209
55	80	80	40	2457466,086	2310000	1,0638	70	30	47,209
60	80	80	40	2562393,379	2310000	1,109	70	30	47,209

Таблица Б.67 – Расчет аппарата Т – 9, часть 3

W, %	K <sub>оп</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	F <sub>оп</sub> , м <sup>2</sup>	d <sub>внеш</sub> , м	δ <sub>ст</sub> , м	d <sub>внутр</sub> , м	Re <sub>2оп</sub>	n/z оп	n	z
30	160	254,504	0,02	0,002	0,016	100	201	1072	4
35	160	268,856	0,02	0,002	0,016	100	187	1072	4
40	160	283,117	0,02	0,002	0,016	100	174	1072	4
45	160	297,285	0,02	0,002	0,016	100	163	1072	4
50	160	311,361	0,02	0,002	0,016	100	153	1072	4
55	160	325,345	0,02	0,002	0,016	100	145	1072	4
60	160	339,236	0,02	0,002	0,016	100	137	1072	4

Таблица Б.68 – Расчет аппарата Т – 9, часть 4

W, %	L, м	D, м	F, м <sup>2</sup>	P	R	η	δ,	ε	ΔT <sub>срε</sub> , 0C
30	6	1	404	0,571	0	1	1,180	1	47,209
35	6	1	404	0,571	0	1	1,180	1	47,209
40	6	1	404	0,571	0	1	1,180	1	47,209
45	6	1	404	0,571	0	1	1,180	1	47,209
50	6	1	404	0,571	0	1	1,180	1	47,209
55	6	1	404	0,571	0	1	1,180	1	47,209
60	6	1	404	0,571	0	1	1,180	1	47,209

## Продолжение Приложения Б

Таблица Б.69 – Расчет аппарата Т – 9, часть 5

W, %	F <sub>оре</sub> , м <sup>2</sup>	Re <sub>2</sub>	B, 1/К	t <sub>ст1</sub> , °С	t <sub>ст2</sub> , °С	ΔТ, °С	Gr <sub>2</sub>	Pr <sub>2</sub>	a <sub>1оп</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К
30	254,504	74,904	0,000527	79,663	79,056	46,206	223,923	397,603	22415,468
35	268,856	69,609	0,000527	79,657	79,016	46,163	193,205	440,087	22009,273
40	283,117	64,988	0,000527	79,651	78,976	46,120	168,246	483,667	21633,356
45	297,285	60,918	0,000527	79,645	78,936	46,078	147,699	528,261	21284,075
50	311,361	57,307	0,000527	79,640	78,897	46,037	130,591	573,795	20958,382
55	325,345	54,082	0,000527	79,634	78,859	45,996	116,201	620,202	20653,704
60	339,236	51,183	0,000527	79,629	78,820	45,955	103,987	667,421	20367,850

Таблица Б.70 – Расчет аппарата Т – 9, часть 6

W, %	Gr <sub>2</sub> Pr <sub>2</sub>	Re <sub>2</sub> Pr <sub>2</sub> d/l	a <sub>2</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	a <sub>1</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	λ <sub>ст</sub> , Вт/м·К	1/r <sub>1</sub> , м <sup>2</sup> К/Вт	1/r <sub>2</sub> , м <sup>2</sup> К/Вт	K, Вт/м <sup>2</sup> К	F <sub>y</sub> , м <sup>2</sup>
30	89032,729	79,419	171,937	18861,417	17,5	5800	1160	142,664	285,430
35	85027,173	81,691	175,474	18519,625	17,5	5800	1160	145,074	296,518
40	81374,758	83,819	179,404	18203,311	17,5	5800	1160	147,732	306,628
45	78023,608	85,815	183,592	17909,410	17,5	5800	1160	150,543	315,960
50	74932,489	87,687	187,960	17635,357	17,5	5800	1160	153,450	324,651
55	72068,091	89,444	192,455	17378,986	17,5	5800	1160	156,416	332,800
60	69403,114	91,096	197,042	17138,455	17,5	5800	1160	159,415	340,480

Таблица Б.71 – Расчет аппарата Т – 9, часть 7

W, %	Δ, %	w <sub>тр</sub> , м/с	w <sub>ш</sub> , м/с	A	λ	d <sub>ш</sub> , м
30	29,349	0,0773	0,944	64	0,854	0,150
35	26,604	0,0773	0,944	64	0,919	0,150
40	24,102	0,0773	0,944	64	0,985	0,150
45	21,792	0,0773	0,944	64	1,051	0,150
50	19,641	0,0773	0,944	64	1,117	0,150
55	17,623	0,0773	0,944	64	1,183	0,150
60	15,723	0,0773	0,944	64	1,250	0,150

Таблица Б.72 – Расчет аппарата Т – 9, часть 8

W, %	ΔP <sub>тр</sub> , Па	μ <sub>2ст</sub> , Па·с	ρ <sub>1</sub> , кг/м <sup>3</sup>	μ <sub>1</sub> , Па·с	C <sub>1</sub> , Дж/кг·К	λ <sub>1</sub> , Вт/м·К
30	5421,754	0,0252	972	0,000355	4190	0,675
35	5707,505	0,0302	972	0,000355	4190	0,675
40	5993,257	0,0352	972	0,000355	4190	0,675

## Продолжение Приложения Б

### Продолжение таблицы Б.72

W, %	$\Delta P_{тр}, \text{Па}$	$\mu_{2ст}, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\rho_1, \text{кг/м}^3$	$\mu_1, \text{Па}\cdot\text{с}$	$C_1, \text{Дж/кг}\cdot\text{К}$	$\lambda_1, \text{Вт/м}\cdot\text{К}$
45	6279,008	0,0403	972	0,000355	4190	0,675
50	6564,760	0,0453	972	0,000355	4190	0,675
55	6850,511	0,0504	972	0,000355	4190	0,675
60	7136,263	0,0554	972	0,000355	4190	0,675

### Таблица Б.73 – Расчет аппарата Т – 10, часть 1

W, %	$t_{ср}, \text{°C}$	$\rho_2, \text{кг/м}^3$	$\mu_2, \text{Па}\cdot\text{с}$	$C_2, \text{Дж/кг}\cdot\text{К}$	$\lambda_2, \text{Вт/м}\cdot\text{К}$	$V_2, \text{м}^3/\text{ч}$	$G_2, \text{кг/с}$	$t_{2н}, \text{°C}$	$t_{2к}, \text{°C}$
30	30	1039,141	0,0687	2774,947	0,479	60	17,319	10	50
35	30	1035,981	0,0737	2940,382	0,492	60	17,266	10	50
40	30	1032,821	0,0787	3105,817	0,505	60	17,217	10	50
45	30	1029,661	0,0837	3271,252	0,518	60	17,161	10	50
50	30	1026,501	0,0887	3436,687	0,531	60	17,108	10	50
55	30	1023,341	0,0937	3602,122	0,544	60	17,0557	10	50
60	30	1020,181	0,0987	3767,557	0,557	60	17,00302	10	50

### Таблица Б.74 – Расчет аппарата Т – 10, часть 2

W, %	$t_{1н}, \text{°C}$	$t_{1к}, \text{°C}$	$\Delta t_2, \text{°C}$	Q, Вт	$\gamma_1, \text{Дж/кг}$	$G_1, \text{кг/с}$	$\Delta t_6, \text{°C}$	$\Delta t_m, \text{°C}$	$\Delta T_{ср}, \text{°C}$
30	80	80	40	1922374,134	2310000	0,832	70	30	47,209
35	80	80	40	2030786,590	2310000	0,879	70	30	47,209
40	80	80	40	2138502,013	2310000	0,926	70	30	47,209
45	80	80	40	2245520,404	2310000	0,972	70	30	47,209
50	80	80	40	2351841,761	2310000	1,0181	70	30	47,209
55	80	80	40	2457466,086	2310000	1,0638	70	30	47,209
60	80	80	40	2562393,379	2310000	1,109	70	30	47,209

### Таблица Б.75 – Расчет аппарата Т – 10, часть 3

W, %	$K_{оп}, \text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$	$F_{оп}, \text{м}^2$	$d_{внеш}, \text{м}$	$\delta_{ст}, \text{м}$	$d_{внутр}, \text{м}$	$Re_{2оп}$	n/z оп	n	z
30	160	254,504	0,025	0,002	0,021	100	153	958	6
35	160	268,856	0,025	0,002	0,021	100	142	958	6
40	160	283,117	0,025	0,002	0,021	100	133	958	6
45	160	297,285	0,025	0,002	0,021	100	124	958	6
50	160	311,361	0,025	0,002	0,021	100	117	958	6
55	160	325,345	0,025	0,002	0,021	100	110	958	6
60	160	339,236	0,025	0,002	0,021	100	105	958	6

## Продолжение Приложения Б

Таблица Б.76 – Расчет аппарата Т – 10, часть 4

W, %	L, м	D, м	F, м <sup>2</sup>	P	R	η	δ,	ε	ΔT <sub>ср</sub> , 0С
30	6	1,2	451	0,571	0	1	1,180	1	47,209
35	6	1,2	451	0,571	0	1	1,180	1	47,209
40	6	1,2	451	0,571	0	1	1,180	1	47,209
45	6	1,2	451	0,571	0	1	1,180	1	47,209
50	6	1,2	451	0,571	0	1	1,180	1	47,209
55	6	1,2	451	0,571	0	1	1,180	1	47,209
60	6	1,2	451	0,571	0	1	1,180	1	47,209

Таблица Б.77 – Расчет аппарата Т – 10, часть 5

W, %	F <sub>оре</sub> , м <sup>2</sup>	Re <sub>2</sub>	B, 1/К	t <sub>ср1</sub> , 0С	t <sub>ср2</sub> , 0С	ΔT, 0С	Gr <sub>2</sub>	Pr <sub>2</sub>	a <sub>1ор</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К
30	254,504	95,791	0,000527	79,650	79,120	46,273	507,027	397,603	21590,932
35	268,856	89,020	0,000527	79,644	79,083	46,234	437,514	440,087	21199,678
40	283,117	83,110	0,000527	79,638	79,047	46,196	381,028	483,667	20837,590
45	297,285	77,905	0,000527	79,632	79,012	46,159	334,528	528,261	20501,157
50	311,361	73,286	0,000527	79,626	78,977	46,121	295,808	573,795	20187,444
55	325,345	69,163	0,000527	79,620	78,942	46,084	263,237	620,202	19893,973
60	339,236	65,456	0,000527	79,615	78,908	46,048	235,590	667,421	19618,634

Таблица Б.78 – Расчет аппарата Т – 10, часть 6

W, %	Gr <sub>2</sub> Pr <sub>2</sub>	Re <sub>2</sub> Pr <sub>2</sub> d/l	a <sub>2</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	a <sub>1</sub> , Вт/м <sup>2</sup> К	λ <sub>ср</sub> , Вт/м·К	1/r <sub>1</sub> , м <sup>2</sup> К/Вт	1/r <sub>2</sub> , м <sup>2</sup> К/Вт	K, Вт/м <sup>2</sup> К	F <sub>y</sub> , м <sup>2</sup>
30	201595,623	133,304	155,732	21590,932	17,5	5800	1160	131,296	310,143
35	192544,195	137,118	158,931	21199,678	17,5	5800	1160	133,547	322,111
40	184290,763	140,691	162,486	20837,590	17,5	5800	1160	136,033	332,998
45	176718,061	144,040	166,276	20501,157	17,5	5800	1160	138,665	343,026
50	169732,887	147,182	170,230	20187,444	17,5	5800	1160	141,388	352,348
55	163259,948	150,132	174,298	19893,973	17,5	5800	1160	144,168	361,072
60	157237,544	152,904	178,451	19618,634	17,5	5800	1160	146,982	369,280

Таблица Б.79 – Расчет аппарата Т – 10, часть 7

W, %	Δ, %	w <sub>тп</sub> , м/с	w <sub>ш</sub> , м/с	A	λ	d <sub>ш</sub> , м
30	31,232	0,0503	0,944	64	0,668	0,150
35	28,579	0,0503	0,944	64	0,719	0,150
40	26,165	0,0503	0,944	64	0,770	0,150

## Продолжение Приложения Б

Продолжение таблицы Б.79

W, %	$\Delta$ ,%	$w_{TP}$ ,М/с	$w_{ш}$ ,М/с	A	$\lambda$	$d_{ш}$ ,м
45	23,941	0,0503	0,944	64	0,822	0,150
50	21,874	0,0503	0,944	64	0,873	0,150
55	19,940	0,0503	0,944	64	0,925	0,150
60	18,120	0,0503	0,944	64	0,978	0,150

Таблица Б.80 – Расчет аппарата Т – 10, часть 8

W, %	$\Delta P_{TP}$ , Па	$\mu_{2ст}$ ,Па·с	$\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu_1$ ,Па·с	$C_1$ ,Дж/кг·К	$\lambda_1$ , Вт/м·К
30	2922,954	0,0251	972	0,000355	4190	0,675
35	3028,034	0,0302	972	0,000355	4190	0,675
40	3133,113	0,0352	972	0,000355	4190	0,675
45	3238,192	0,0402	972	0,000355	4190	0,675
50	3343,271	0,0452	972	0,000355	4190	0,675
55	3448,351	0,0503	972	0,000355	4190	0,675
60	3553,430	0,0553	972	0,000355	4190	0,675