

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	2
1 ХАРАКТЕРИСТИКА ВОПРОСА ПО ЛИТЕРАТУРНЫМ ДАННЫМ	3
1.1 Обзор химического оборудования, применяемого в условиях теплонапряженных массообменных процессов	3
1.2 Обзор существующих методов и моделей теплоотдачи к плоскому элементу.	9
1.3 Техничко-экономическое обоснование проекта	13
2 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА И ИССЛЕДУЕМОГО УСТРОЙСТВА	14
2.1 Описание лабораторной колонны с установленным контактным устройством	14
2.2 Описание исследуемого объекта	15
2.3 Описание лабораторной установки	17
2.3 Описание основного оборудования.....	18
2.4 Выбор конструкторских материалов.....	20
3 РАСЧЕТ АППАРАТА.....	21
3.1 Технологический расчет колонны	21
3.2 Прочностной расчет аппарата	29
3.3 Расчет пластинчатого модуля на прочность методом конечных элементов.....	34
4 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ.....	37
4.1 Численное моделирование	37
4.2 Проведение физических экспериментов.....	45
5 МОНТАЖ АППАРАТА.....	48
6 РЕМОНТ АППАРАТА	51
7 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ПРОЕКТА	53
7.1 Вредные и опасные факторы, присущие данной научно-исследовательской лаборатории.....	53
7.2 Санитарно-гигиенические мероприятия	54
7.3 Техника безопасности.....	59
7.4 Пожарная безопасность	61
7.5 Экологичность проекта.....	62
7.6 Заключение	62
8 ОРГАНИЗАЦИОННАЯ ЧАСТЬ	63
8.1 График выполнения работ	63
8.2 Экономическая часть	68
8.4 Выводы по разделу.....	78
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	79
ЛИТЕРАТУРНЫЕ ИСТОЧНИКИ	80
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Опись чертежей	83
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Спецификации	85

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

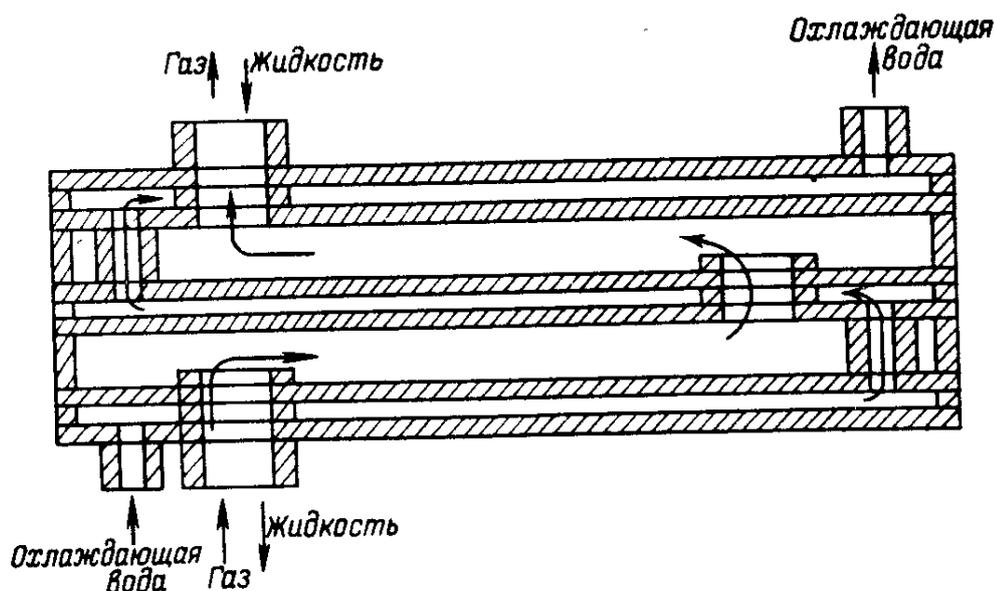
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата				
Разраб.		Тутанина Е.М.			Разработка лабораторной установки и исследование теплообменных характеристик блочно-модульного контактного устройства	Литер.	Лист	Листов
Пров.		Степлькин А.В.				У	1	85
Н. Контр.		Балахнин И.А.				ДПИ НГТУ		
Чтв		Ликав В.А.				гр. 17-ТМО		

1 ХАРАКТЕРИСТИКА ВОПРОСА ПО ЛИТЕРАТУРНЫМ ДАННЫМ

1.1 Обзор химического оборудования, применяемого в условиях теплонпряженных массообменных процессов

Массообменные процессы, сопровождающиеся выделением или поглощением тепловой энергии, получили широкое распространение в химической и нефтехимической промышленности. К ним относят ректификацию, процессы абсорбции и десорбции ряда газов. Традиционным вариантом отвода/подвода теплоты в аппаратах является использование стандартных теплообменников, которые либо вынесены за пределы аппарата, либо встроены в него. Первый вариант широко используется в промышленности начиная с 30-х годов [1]. Использование технологии связано с большими финансовыми затратами. Второй вариант подразумевает достаточно сложную технологию изготовления так как внедрение теплообменника в колонный аппарат достаточно трудоемкая задача. Кроме этого поверхность массообменная в теплообменном блоке небольшая, а самому теплообменнику требуется особое распределительное устройство для качественной работы. В связи с этим наиболее перспективным вариантом исполнения колонных аппаратов является использование комбинированных тепло и массообменных контактных устройств.

В процессе развития данного типа оборудования можно наблюдать определенную эволюцию вариантов его исполнения. Например, ниже представлен один из самых простых аппаратов – поверхностный абсорбер [2] (приведен на рис 1.1).



1 – зона контакта фаз; 2 – теплообменная зона.

Рисунок 1.1 – Поверхностный абсорбер из графита

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

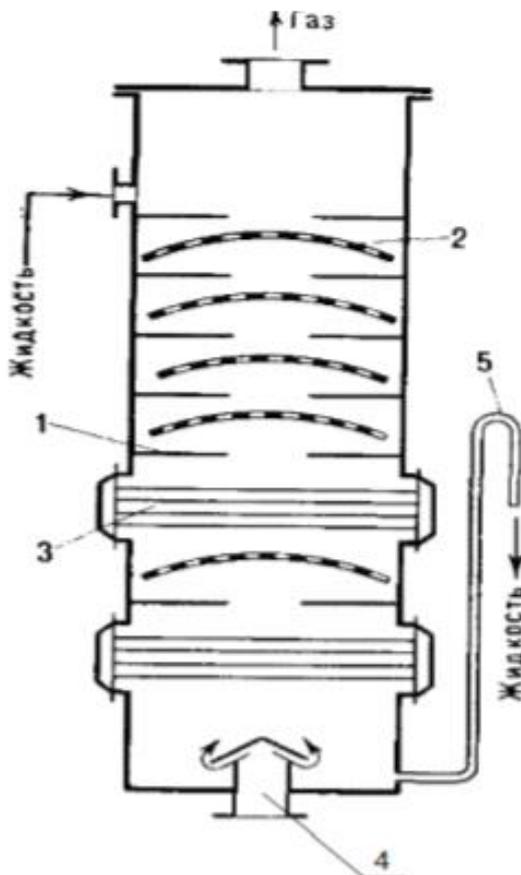
ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

3

Достоинством таких аппаратов является простота конструкции. Область его применения – малотоннажные установки для поглощения хорошо растворимых газов. Недостатки данного типа оборудования – малая эффективность, также производительность, и интенсивность процесса в целом.

Также были распространены аппараты со встроенными теплообменными секциями [2] (представлен на рисунке 1.2)



1– Опоры; 2 – контактные элементы, 3 – теплообменные устройства,
4 – штуцер ввода газа, 5– гидрозатвор.

Рисунок 1.2 – Аппарат со встроенными теплообменными секциями

У данного типа аппаратов особенностью является наличие теплообменных секций, расположенных отдельно от контактных устройств. Недостатки аппарата со встроенными теплообменными секциями – сложность ремонта и монтажа, трудности со смачиваемостью при отсутствии гидрозатвора, ступенчатость теплообмена, что ухудшает условия проведения процесса в аппарате.

Простое сочетание элементов для массо- и теплообменного типа достигается в конструкции пленочных аппаратов. Пучок параллельных труб центральный элемент аппарата. Данный элемент закреплен в трубных решетках и заключен в кожух. Он формирует две полости – трубную и межтрубную. Распределитель устанавливается в верхней части аппарата, формирует

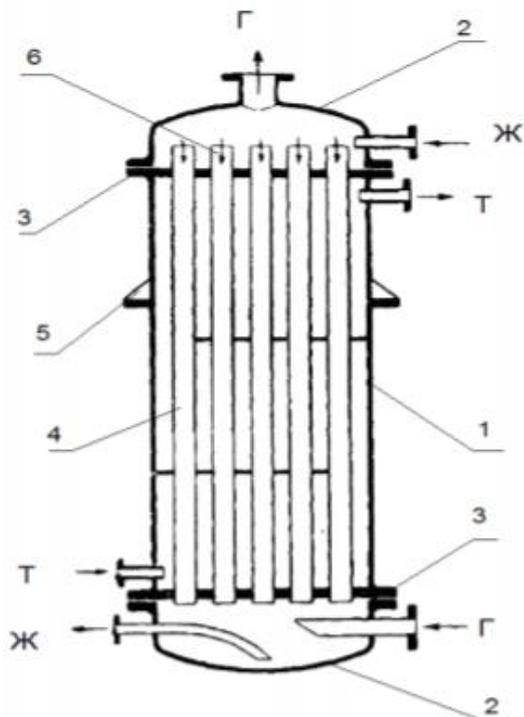
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

4

пленку жидкости на внутренней поверхности труб. Теплоноситель подается в межтрубное пространство. Конструкция такого аппарата для абсорбции [3] показана на рисунке 1.3



1 – корпус, 2 – крышка, 3 – трубна решетка, 4 – трубы, 5 – опоры лапы,
6 – распределитель жидкости, Г – газ, Ж – жидкость, Т – теплоноситель.

Рисунок 1.3 – Пленочный абсорбер

Можно отметить следующие преимущества данного типа оборудования: относительная простота, хорошая эффективность по тепло переносу, однако пропускная способность невелика, как и скорость массообмена.

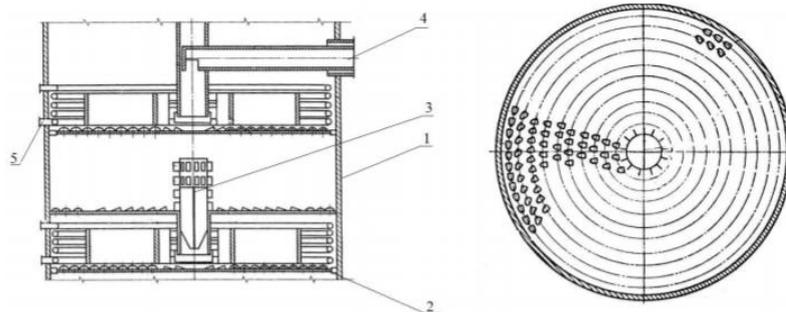
Для встраивания теплообменных элементов менее удобны тарельчатые контактные устройства. Конструкции такого типа включают полотно провальной или переливной тарелки, на котором смонтированы теплообменные пластины, трубы или иные теплообменные элементы [4]. На рисунке 1.4 представлена переливная тарелка. В качестве теплообменных элементов выступают змеевики [5]. Существует аналогичная конструкция, отличающаяся формой змеевиков, переливной трубы [6].

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

5

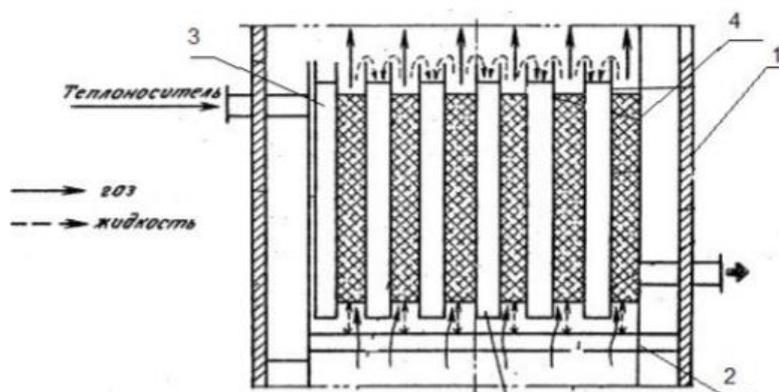


1 – корпус аппарата, 2 – просечное полотно, 3 – переливное устройство, 4 – штуцер входа жидкости на орошение колонны, 5 – теплообменные трубы.

Рисунок 1.4 – Тарелка со змеевиком

Эти устройства обладают достоинствами, такими как высокая эффективность по тепло и массопереносу и сравнительная простота. Недостатками устройства являются – невозможность работы с загрязнёнными средами, малая поверхность теплопередачи и малый диапазон работы по газу.

Кроме трубчатых, на тарелке могут располагаться теплообменные элементы пластинчатого типа [7 - 8]. Наиболее совершенная конструкция [9] из этой группы тарелок приведена на рисунке 1.5.



1 – корпус, 2 – коллектор, 3 – пластины теплообменные, 4 – контактные элементы.

Рисунок 1.5 – Тарелка с пластинчатыми теплообменными элементами

Устройство содержит щелевой коллектор 2, блок плоскопараллельных пластин 3, специальные контактные элементы 4, расположенные между ними. Основной частью устройства является тарелка расположена в самом низу. На ней происходит барботаж жидкости и высота слоя барботажа соответствует высоте пластин. Внутри пластин находится теплоноситель. Он и стабилизирует температуру в барботажном слое. Для увеличения турбулизации восходящего

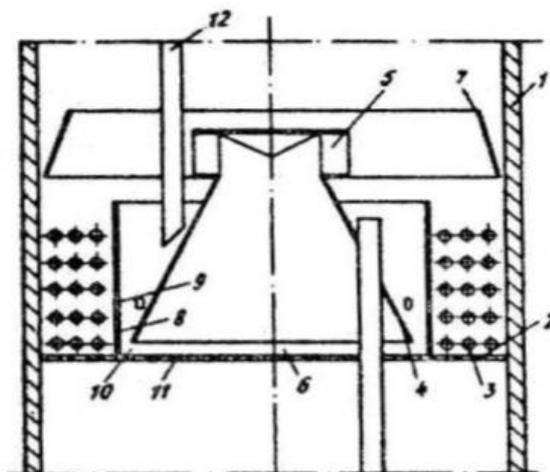
потока устанавливается насадка в каналах между теплообменными элементами. Она дополнительно разбивает струи формирует вихри и способствует массообмену.

Тарельчатые контактные устройства обладают высокой эффективностью проводимых процессов, тем не менее их гидравлическое сопротивление весьма велико. Теплообменные устройства, могут нарушать гидродинамику газо-жидкостного слоя и значительно повышать металлоемкость конструкции. Перфорированные тарелки используют в узком рабочем диапазоне скоростей газа, так как при малых скоростях возможен ее провал, при высоких скоростях возможен унос жидкости.

Для проведения теплонапряженных массообменных процессов могут использоваться вихревые контактные устройства. Особенностью конструкций вихревых контактных устройств является наличие специальных завихрителей, выполненных в виде спиральных каналов или розеток с тангенциально установленными отводами.

Контактное устройство вихревого типа показано на рисунке 1.6 [10].

В устройстве формируются вихревые потоки. Это очень интенсифицирует процесс тепло и массо передачи. Такой диспергированный слой жидкости в устройстве значительно улучшает свои свойства по отношению к чистой жидкости - это позволяет очень эффективно подводить/отводить теплоту устанавливая теплообменные трубы 3. Наличие теплообменных труб нарушает вихревой слой, однако формируются новые особенности вихревого течения, которые могут дополнительно улучшать условия тепло и массообмена.



1 – корпус; 2 – полотно; 3 – теплообменный элемент; 4 – конический патрубок;
5 – завихритель; 6, 10 – зазор; 7 – отбойный элемент; 8 – перелив; 9 – перфорированный участок; 11 –
неперфорированный участок полотна, 12 – переливные трубы.

Рисунок 1.6 – Вихревое тепломассообменное устройство

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

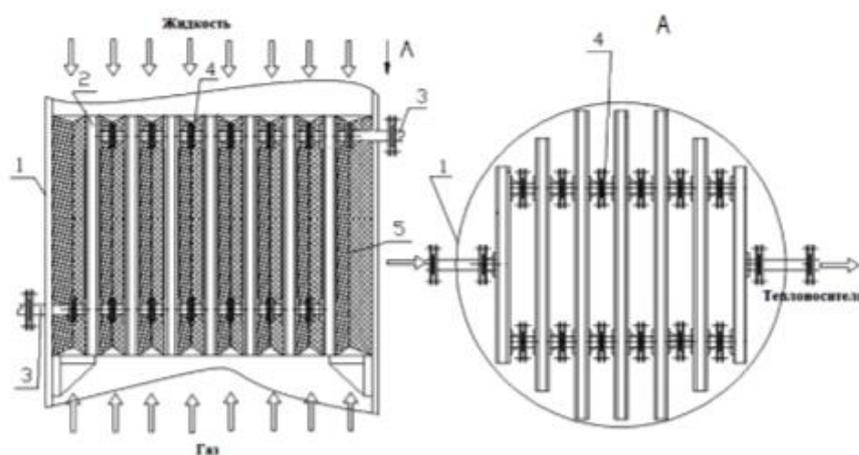
ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

7

Аппараты с вихревыми элементами обладают преимуществами: высокой эффективностью и интенсивностью процесса массообмена. Тем не менее их работа сопровождается высокими энергозатратами на преодоление гидравлического сопротивления. А также сложность самой конструкции устройства связанной с установленными теплообменными элементами затрудняет их обслуживание и ремонт, особенно при использовании сред, оставляющих загрязнения. Пропускная способность таких устройств тоже невысока.

Абсолютно все типы контактных устройств обладают возможностью встраивания в них теплообменных элементов. Отметим, что пленочные аппараты оказываются наиболее удобными и простыми, однако производительность таких установок чрезвычайно ограничена, поэтому такие аппараты нашли применение лишь там, где требуется значительная тепловая стабилизация, а продукт достаточно дорог. Тарельчатые аппараты требуют значительных энергозатрат, однако их применение в ректификации и десорбции может оказаться оправданным. При абсорбции часто имеется ограничение в давлении очищаемых газов. В связи с чем использование насадочных контактных устройств является единственным вариантом. Кроме низкого гидравлического сопротивления внутри насадочных контактных устройств достаточно легко разместить большое количество теплообменных элементов. Стеkanie жидкости в виде пленки по ним позволяет производить процесс теплообмена достаточно эффективным. В связи с чем в качестве базовой конструкции может найти применение насадочные блоки с внедренными теплообменными элементами. Примером данной конструкции может стать [11]:



1 – корпус аппарата; 2 – ТМ (теплообменный модуль); 3 – патрубки ввода и вывода теплоносителя; 4 – штуцер; 5 – СН (сетчатая насадка)

Рисунок 1.7 – Схема контактного устройства

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Контактное устройство показано на рисунке 1.7. Оно состоит из пластинчатых теплообменных модулей 2 и сетчатой насадки 5, установленной в пространстве между последними. Каждый модуль состоит из двух параллельных металлических пластин, скрепленных по периметру перегородкой. Стенки модуля гофрируются для увеличения поверхности тепло- и массообмена. Гофры могут быть выполнены треугольными или полукруглыми по профилю, расположены горизонтально или под наклоном. Они позволяют увеличить поверхность теплообменных модулей на 15%. Модули имеют штуцера 4, количество которых определяется необходимыми расходными характеристиками

Данное устройство было в большей степени изучено в работах [12-13]. Изучение внутренней теплоотдачи не проводилось. В рамках ранних исследований были взяты стандартизованные зависимости, однако теплоотдача имеет целый ряд особенностей и эти особенности будут рассмотрены в рамках данной ВКР.

1.2 Обзор существующих методов и моделей теплоотдачи к плоскому элементу.

В качестве опорных моделей теплообмена рассматривают три варианта: аналитические, численные модели, построенные на основе дифференциальных уравнений. Особое место занимают эмпирические модели. Их особенность в том, что они построены в результате обработки экспериментальных численных данных.

Аналитические модели, как правило, достаточно сложны. Они используют в своей основе вариации уравнений Навье-Стокса и уравнений неразрывности потока (1.1- 1.3).

$$\frac{dv_x}{dt} + v_x \frac{dv_x}{dx} + v_y \frac{dv_x}{dy} = -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} + \nu \left(\frac{d^2 v_x}{dx^2} + \frac{d^2 v_x}{dy^2} \right) + g \quad , \quad (1.1)$$

$$\frac{dv_y}{dt} + v_x \frac{dv_y}{dx} + v_y \frac{dv_y}{dy} = -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dy} + \nu \left(\frac{d^2 v_y}{dx^2} + \frac{d^2 v_y}{dy^2} \right) \quad , \quad (1.2)$$

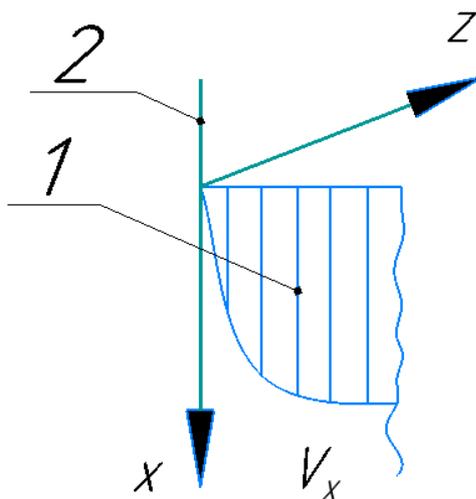
$$\frac{dv_x}{dx} + \frac{dv_y}{dy} = 0 \quad . \quad (1.3)$$

где v_x , v_y – составляющие скорости потока, полученные при разложении ее величины по соответствующим осям;

g – ускорение свободного падения, выражающее удельную силу тяжести;

P – давление, действующее на жидкость.

Схема осей приведена на рисунке 1.8.



1 – эпюра скоростей в пленке жидкости, 2 – вертикальная стенка

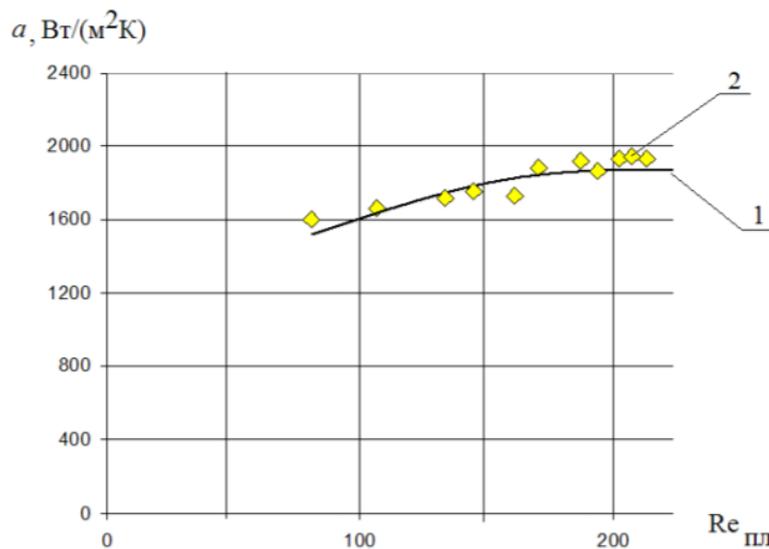
Рисунок 1.8 – Расчетная схема потоков

Ряд литературных источников описывает такие модели. Как правило зависимости в них все равно используют отчасти эмпирические данные. Данные модели можно встретить, например, в работах Левича В.Г., Кутателадзе С.С. [14-15]. В работе используются приближенные значения как для слоистых течений введу небольшой толщины пластинчатых модулей [16]:

Коэффициент теплоотдачи, рассчитан как:

$$\alpha = A_\alpha \sqrt{\frac{3\bar{v} \cdot C_{ж} \cdot \rho \cdot \lambda}{2\pi \cdot H}}, \quad (1.4)$$

Вариант расчета коэффициентов теплоотдачи приведен на рисунке 1.9.



1 – Теоретическая кривая, 2 – Экспериментальные значения

Рисунок 1.9 – Зависимость коэффициента теплоотдачи

Эмпирические модели связаны с проведением экспериментов по определению коэффициента теплоотдачи. Коэффициент теплоотдачи связан с критерием Нуссельта.

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{H_n}, \quad (1.5)$$

где, Nu – критерий Нуссельта;

λ – теплопроводность теплоносителя;

H_n – высота поверхности.

Как правило определение критерия Нуссельта и является основной целью таких экспериментов.

Уравнение вида:

$$Nu = A \cdot Re^a \cdot Pr^b, \quad (1.6)$$

где, Nu – критерий Нуссельт, определяется:

$$Nu = \alpha \cdot l / \lambda; \quad (1.7)$$

Re – критерий Рейнольдса, рассчитывается:

$$Re = w \cdot l / \nu; \quad (1.8)$$

Pr – критерий Прандтля, определяемый:

$$Pr = C \cdot \mu / \lambda; \quad (1.9)$$

A , a , b – коэффициенты.

В качестве базовых эмпирических моделей используются две разновидности. Первая – учитывает теплоотдачу к плоской поверхности из значительного по ширине потока. В данных зависимостях определяющим размером является высота пластин [17-18].

Приведенные в моделях зависимости:

$$Nu = 0,664 Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33}, \quad (1.10)$$

$$Nu = 0,03 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \quad (1.11)$$

При $Re < 500000$ (L - длина пластины) предлагается использовать зависимость (1.10). При $Re > 500000$ применяют зависимость (1.11).

При использовании другого алгоритма в качестве основного определяющего размера выступает гидравлический радиус [4], данный параметр в разработанном устройстве составляет 8,5 мм:

$$d_s = \frac{4S}{P}, \quad (1.12)$$

где S – площадь проходного сечения пластины, мм;

P – смоченный периметр.

Один из вариантов зависимостей, при $2000 < Re < 35000$ (1.11) приведен в [4]

$$Nu = 0,491 Re^{0,63} \cdot Pr^{0,33}, \quad (1.13)$$

Коэффициент теплоотдачи также рассчитывается по уравнению (1.5). Основные параметры для уравнения (1.6) приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Основные параметры

№	Тип пластины (площадь, м ²)	Коэффициенты <i>A, a, b</i>	Эквивалентный размер, мм	Проходное сечение, м ²
1	0,6	0,135; 0,73; 0,43	8,3	0,00245
2	0,3	0,1; 0,73; 0,43	8	0,0011
3	0,2	0,065; 0,73; 0,43	8,8	0,00178

Для решения задач со сложной и нестандартной геометрией часто прибегают к численным методам. Эти методы включают решение уравнений (1.1) (1.2). Как правило, для решения данных уравнений используются специализированные программы, например, FlowVision. Программный комплекс вычислительной гидродинамики FlowVision предназначен для проведения математического моделирования различных физических процессов и объектов промышленной инфраструктуры. Зависимости по критерию Нуссельта из этих моделей получил, например, автор [19]. Авторы использовали к-ε модель турбулентности потока. В результате была получена следующая зависимость:

$$Nu = 0,693 Re^{0,568} \cdot Pr^{0,42}, \quad (1.14)$$

Параметры построения конечно элементных моделей обычно связаны с граничными условиями. Результат вычислений – это графические карты или таблицы. Пример интерпретации результатов расчета приведен на рисунке (1.10).

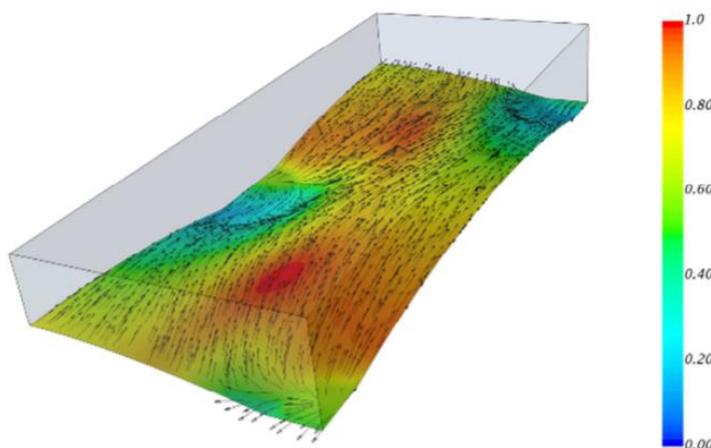
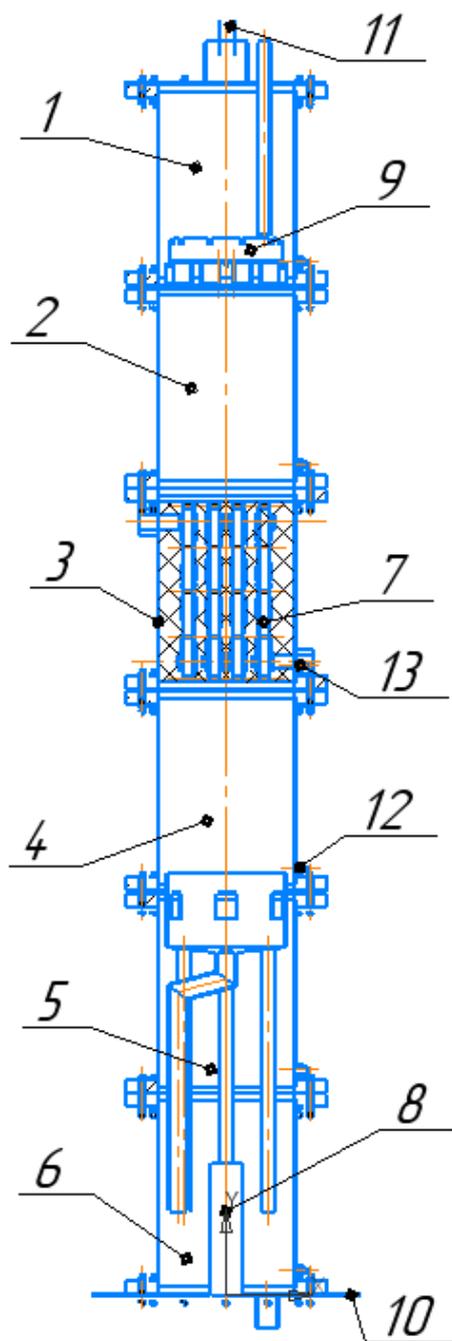


Рисунок 1.10 – Контур теплового потока стенки [20]



1-6 – царги; 7 – контактное устройство; 8 – распределительное устройство на входе газа; 9 – распределительное устройство жидкости; 10 – опора колонны; 11 – психрометр; 12,13 – патрубки для соединения с микроманометром;

Рисунок 2.1 – Лабораторная колонна

2.2 Описание исследуемого объекта

В лабораторную колонну устанавливалось устройство, приведенное на рисунке 2.2.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

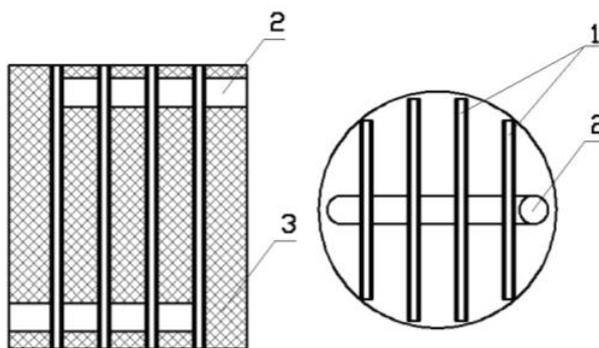
Лист

15



Рисунок 2.2 – Тепломассообменное устройство на колонну

Контактное устройство для колонны (рисунок 2.3), имеет до 4 теплообменных модулей 1 и сетчатая насадка между ними 3.



1 – Пластины, 2 – коллектор, 3 – сетчатая насадка

Рисунок 2.3 – Схема блока КУ для лабораторной колонны, диаметром 200 мм.

Внешний вид теплообменных модулей показан на рис 2.4. Штуцера прикрепляются к металлическому листу посредством резьбы. Основными характеристиками контактного устройства являются удельная поверхность массообмена, удельная поверхность теплообмена, свободный объем, удельная масса, проходное сечение для теплоносителя, эквивалентные диаметры.

Таблица 2.1 – Характеристика контактного устройства, применяемого при проведении тепломассообменных процессов

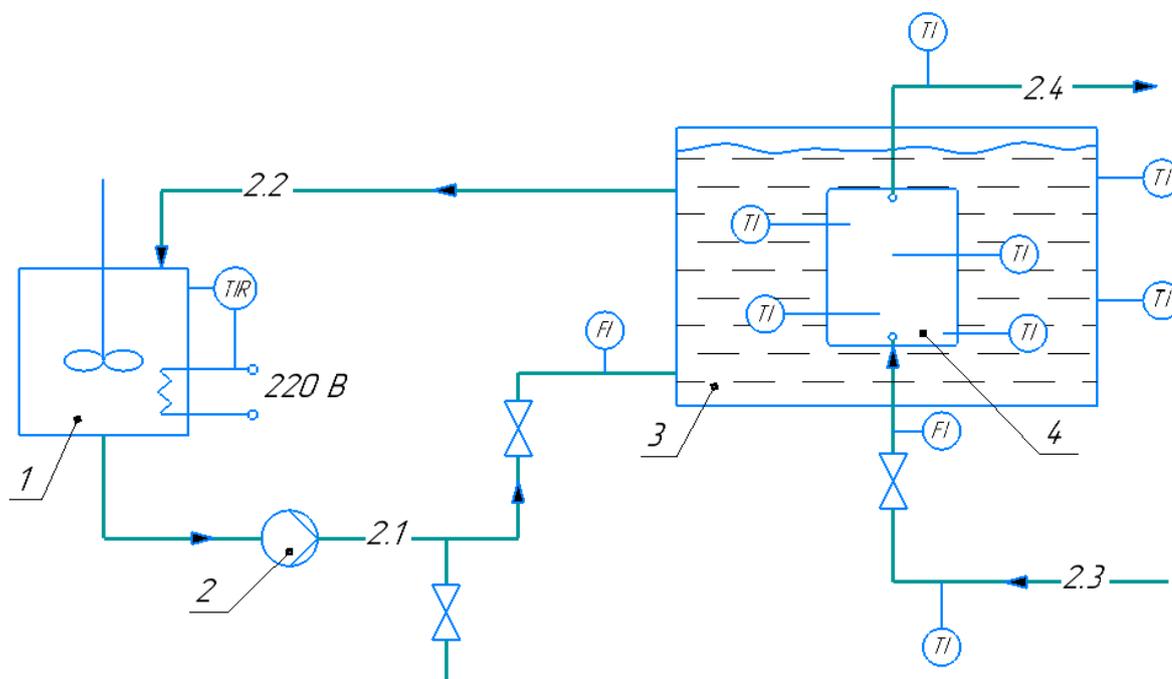
Устройство	Удельная поверхность $\text{м}^2/\text{м}^3$	Удельная поверхность теплообмена $\text{м}^2/\text{м}^3$	Удельная масса $\text{кг}/\text{м}^3$	Свободный объем, %
	230 – 360	0 – 80	380* – 600*	70 – 98



Рисунок 2.4 – Теплообменные модули на колонну

2.3 Описание лабораторной установки

Установка состоит из двух контуров теплоносителя которые обеспечивают процесс теплопередачи. Основными компонентами установки являются емкость 1 с термостатом, насос 2, который осуществляет перекачку горячего теплоносителя, прозрачная емкость 3, в которую погружается исследуемый блок 4. На блоке и в пространстве около него расположены термодатчики. Технологическая схема установки изображена на рисунке 2.5.



1 – термостат; 2 – насос; 3 – ёмкость; 4 – пластина;

Рисунок 2.5 – Технологическая схема установки изучения теплообмена

2.1 – поток жидкости в аквариум; 2.2 – поток жидкости из аквариума; 2.3 – техническая вода;
2.4 – поток отработанной воды; FI – датчик контроля расхода; TI – датчик контроля температуры;

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

17

Для определения температур потоков на установке использовались термопары типа ТХК. Выбор был связан с доступностью данного оборудования, а также в связи с быстродействием устройств. Термопары подключены к вторичному прибору типа УКТ-38Щ. Данные с УКТ-38Щ передаются с помощью кабеля на ЭВМ.

Для удобства проведения исследования и снижения трудоёмкости обработки данных была разработана программа на ЭВМ. Такая программа позволяет производить мониторинг и запись данных эксперимента в режиме реального времени. Рабочее окно программы представлена на рисунке 2.6.

Рабочее окно программы разделено на несколько интуитивно понятных областей. Для начала работы программы необходимо установить соединение с УКТ-38Щ и расходомером. После формулирования всех исходных данных необходимо создать электронную таблицу Excel, нажав на кнопку в рабочем окне программы. Запись данных в электронную таблицу позволяет организовать удобную систему для дальнейшего хранения и обработки данных, полученных в ходе эксперимента. После создания файла Excel, становится активной кнопка «Начать запись». При нажатии этой кнопки происходит запись всех исходных данных в созданную электронную таблицу Excel, а также запускается ряд алгоритмов по обработке информации. Функционал программы позволяет настраивать и выполнять следующие задачи: запись и вывод данных в виде таблицы в рабочем окне программы с заданным интервалом, построение графика зависимости температуры от времени проведения эксперимента, сохранение данных в формате электронной таблицы.

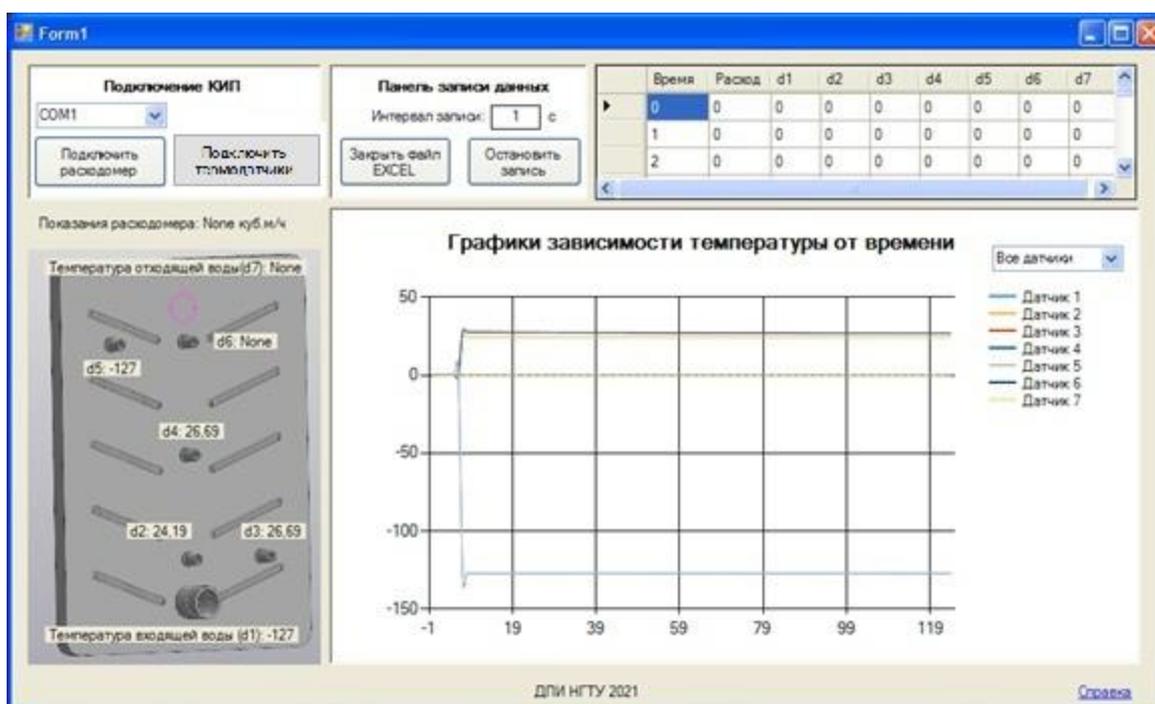


Рисунок 2.6 – Рабочее окно программы

Основные контролируемые параметры представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Перечень контролируемых параметров процесса

Местоположение	Измеряемый параметр	
	Наименование	Размерность
Трубопровод на вход в пластину	Расход воды	м ³ /ч
	Температура воды	°С
Трубопровод на выход из пластины	Температура воды	°С
Термостат	Температура воды	°С
Пластина	Температура поверхности	°С
Емкость	Температура воды	°С
Трубопровод на вход в емкость	Расход воды	м ³ /ч

Все контрольно-измерительные приборы стенда проходили поверку в метрологической службе.

2.4 Выбор конструкторских материалов.

При проведении экспериментов на лабораторной установке применялись устройства, выполненные из обычной, стали Ст3Сп. Уплотнительные устройства из резины АМС [21], штуцера из латуни или стали Ст3, для изоляции элементов применялся герметик ВГО-1 [22]. Для изготовления термостат применялась нержавеющая сталь 12Х18Н10Т. Для крепежных изделий применялась Сталь 20. Для изготовления емкости в которую погружается устройство используется прозрачное оргстекло марки СО-95 ГОСТ 10667-90, что позволяет проводить наблюдения за процессом внутри емкости. Для трубопроводов использовался полипропилен марки РР-Р.

3 РАСЧЕТ АППАРАТА

3.1 Технологический расчет колонны

Внутренний диаметр колонны $D = 200$ мм.

Высота слоя насадки $H_{сл} = 0.3$ м.

Насадка – плоскопараллельная регулярная.

Температура воздуха на входе в колонну 25°C .

Влажность воздуха на входе в колонну $\varphi_1 = 40\%$.

Конечная влажность – не менее $\varphi_1 = 90\%$.

Температура воды на входе в колонну 15°C .

Максимальный расход воздуха $V_B = 170 \text{ м}^3/\text{ч} = 0.0472 \text{ м}^3/\text{с}$.

Расход воды $L = 0.2$ кг/с.

3.1.2 Материальный баланс

Сумма масс потоков на выходе из колонны должна быть равна сумме масс потоков на входе в нее. В колонну входят два потока, из нее выходят также два – вода и влажный воздух. Расчет всегда удобнее вести по сухой части воздуха, так как она практически неизменна. Для определения параметров процесса необходимо определить плотности воздуха и воды. Для воздуха при температуре входа (изменение величины при прохождении через слой насадки будет невелико):

$$\rho = \rho_0 \frac{273 \cdot P}{(t + 273) \cdot 0.1013}, \quad (3.1)$$

где t – температура входа воздуха, согласно исходным данным $t = 25^{\circ}\text{C}$;

P – давление, при проведении эксперимента. Среднее избыточное давление в слое насадки составляет около 200 Па (при перепаде в 400 Па), тогда среднее давление, с учетом атмосферного $P = 0.1015$ МПа;

ρ_0 - плотность воздуха при нормальных условиях $\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$ по [2].

$$\rho_B = 1.293 \frac{273 \cdot 0.1015}{(25 + 273) \cdot 0.1013} = 1.19 \text{ кг/м}^3.$$

Коэффициенты A^3 и B^3 рассчитываются, как

$$A^3 = A_n \cdot x_n + A_c \cdot (1 - x_n), \quad B^3 = B_n \cdot x_n + B_c \cdot (1 - x_n)$$

где A_n , B_n , A_c , B_c – коэффициенты, учитывающие долю теплообменных модулей и сетчатой насадки; x_n – объемная доля в блоке, занимаемая пластинчатыми теплообменными модулями.

$$A^3 = 0,955 \cdot 0,45 + 0,637 \cdot (1 - 0,45) = 0,7801;$$

$$B^3 = 2,17 \cdot 0,45 + 1,22 \cdot (1 - 0,45) = 1,65.$$

Скорость захлебывания определяется из формулы (6.6):

$$\lg \left(\frac{\omega_{\text{захл}}^2}{9,81} \cdot \frac{240}{0,68^3} \cdot \frac{1,19}{998} \right) = 0,7801 - 1,65 \left(\frac{0,2}{0,056} \right)^{0,25} \left(\frac{1,19}{998} \right)^{0,125}$$

$$\omega_{\text{захл}} = 2,61 \text{ м/с.}$$

Проверим достижение скорости захлебывания при данном диаметре колонны и заданном расходе воздуха, создаваемом вентилятором:

$$\omega_p = \frac{4V_B}{\pi D^2}, \quad (3.7)$$

$$\omega_p = \frac{4 \cdot 0,0472}{\pi \cdot 0,2^2} = 1,5 \text{ м/с.}$$

Таким образом, скорость захлебывания не превышена. При этом насадка работает в режиме подвисания.

3.1.4 Гидравлический расчет

Гидравлическое сопротивление слоя сухой насадки определяется:

$$\Delta P_{\text{сух}} = \zeta \cdot \frac{H_{\text{сл}}}{d_{\text{экв}}} \cdot \frac{\rho_{\text{возд}} \cdot \omega_p^2}{2\varepsilon^2}, \quad (3.8)$$

где $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр насадки, $d_{\text{экв}} = 0,0125$ м по [2].

ζ – коэффициент сопротивления, для плоскопараллельной регулярной насадки, определяется:

$$\zeta = \frac{14}{\text{Re}_r^{0,508}}, \quad (3.9)$$

Критерий Рейнольдса определяется:

$$\text{Re}_r = \frac{4w\rho_r}{a\mu_r}, \quad (3.10)$$

где μ_r – вязкость воздуха, $\mu_r = 18,5 \cdot 10^{-6}$ Па·с по [2].

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

23

$$Re_r = \frac{4 \cdot 1.5 \cdot 1.19}{240 \cdot 18.5 \cdot 10^{-6}} = 1607.$$

$$\zeta = \frac{14}{1607^{0.508}} = 0,33$$

$$\Delta P'_{сyx} = 0.33 \cdot \frac{0.3}{0.0125} \frac{1.19 \cdot 1.5^2}{2 \cdot 0.68^2} = 22.9 \text{ Па.}$$

Используя зависимость Лева, определим сопротивление слоя орошаемой насадки:

$$\Delta P_{op} = \Delta P'_{сyx} \cdot 10^{\beta U}, \quad (3.11)$$

В зоне режима подвисяния для расчета предлагается использовать зависимость:

$$\beta = 18.2 \cdot \omega^{0.76}$$

$$\beta = 18.2 \cdot 1.5^{0.76} = 24.8$$

Плотность орошения определяем по формуле:

$$U = \frac{L}{\rho \pi D^2}$$

$$U = \frac{0.2}{998 \cdot 3.14 \cdot 0.2^2} = 0.0016$$

Тогда значение сопротивления:

$$\Delta P_{op} = 22.9 \cdot 10^{24.8 \cdot 0.0016} = 25.1 \text{ Па.}$$

Данное значение сопротивления оказалось равным принятому ранее.

3.1.5 Тепловой баланс аппарата

При работе аппарата контактируют две фазы с разными температурами на входе, поэтому возникает движущая сила для процесса теплообмена. Также имеется тепловой эффект испарения влаги. Уравнение баланса имеет вид по [28]:

$$Q_{Вх}^{жс} + Q_{Вх}^{возд} = Q_{Вых}^{жс} + Q_{Вых}^{возд} + Q_{Эф} - Q_{пот}, \quad (3.12)$$

где $Q_{Вх}$, $Q_{Вых}$ – теплота, вносимая в систему и теплота, уходящая из нее с соответствующими потоками жидкости и воздуха, Вт.

$Q_{Эф}$ – тепловой эффект испарения влаги, Вт;

$Q_{пот}$ – тепловые потери в окружающую среду, Вт;

Количество тепла, отводимое от воздуха, определяется:

$$Q = Q_{Вх}^{возд} - Q_{Вых}^{возд} = Q_{Вых}^{жс} - Q_{Вх}^{жс} + Q_{Эф} - Q_{пот}, \quad (3.13)$$

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

Тепловые потери можно принять равными 10% от $Q_{эф}$. Знак “-” говорит о том, что тепловой поток вероятнее всего будет направлен в колонну.

Тепловой эффект при фазовом переходе, определяется в первом приближении:

$$Q_{эф} = W \cdot r, \quad (3.14)$$

где r – теплота испарения по [2] $r = 2450$ кДж/кг.

$$Q_{эф} = 5.256 \cdot 10^{-4} \cdot 2450000 = 1288 \text{ Вт.}$$

Количество тепла, которое может быть максимально передано газом, можно найти непосредственно по уравнению теплопередачи:

$$Q = KF\Delta t_{cp}, \quad (3.15)$$

где площадь контакта F определяется:

$$F = aH_{сл} \frac{\pi D^2}{4} \psi, \quad (3.16)$$

где ψ – доля активной поверхности насадки:

$$\Psi_{акт} = \frac{U}{a(b + rU)}, \quad (3.17)$$

где b, r – коэффициенты, зависящие от типа насадки и способа укладки. Для плоскопараллельной регулярной насадки:

$$b = 0.032.$$

$$r = 0.0043.$$

Плотность орошения определяется:

$$U = \frac{L}{\rho \pi D^2}, \quad (3.18)$$

$$U = \frac{0.2}{\pi \cdot 0.2^2 \cdot 998} = 0.0016 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{с.}$$

$$\Psi_{акт} = \frac{0.0016 \cdot 3600}{240(0.032 + 0.0043 \cdot 0.0016 \cdot 3600)} = 0.42.$$

$$F = 240 \cdot 0.3 \cdot \frac{\pi \cdot 0.2^2}{4} \cdot 0.42 = 0.95 \text{ м}^2.$$

Коэффициент теплопередачи определяется по (3.19):

$$K = 0.0011 \frac{\lambda}{d_s} \text{Re}_Г^{0.8} \text{Re}_ж^{0.7}, \quad (3.19)$$

где критерии $\text{Re}_Г$ и $\text{Re}_ж$ – критерии, определяющиеся по [29]:

$$\text{Re}_\Gamma = \frac{\omega_p d_\Delta \rho_\Gamma}{\varepsilon \cdot \mu_\Gamma}, \quad (3.20)$$

$$\text{Re}_\text{ж} = \frac{4U\rho_\text{ж}}{\mu_\text{ж} \cdot a}, \quad (3.21)$$

$$\text{Re}_\Gamma = \frac{1.5 \cdot 0.0125 \cdot 1.19}{0.679 \cdot 18.5 \cdot 10^{-6}} = 1774$$

$$\text{Re}_\text{ж} = \frac{4 \cdot 0.0016 \cdot 998}{1.1 \cdot 10^{-3} \cdot 240} = 24.13.$$

λ – теплопроводность газа, определяется по [2] $\lambda = 0.03 \text{ В/(м·К)}$.

$$K = 0.0011 \frac{0.03}{0.0215} 1774^{0.8} 24.13^{0.7} = 9.7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Примем с учетом последовательных приближений, что вода изменяет свою температуру до 13.7°C , а воздух до 24.1°C тогда движущая сила процесса:

$$\Delta t_{cp} = \frac{t_{1\Gamma} - t_{2\text{ж}} + t_{2\Gamma} - t_{1\text{ж}}}{2}, \quad (3.22)$$

$$\Delta t_{cp} = \frac{25 - 15 + 24.1 - 13.7}{2} = 10.2 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Тогда максимальное количество тепла, переданное через поверхность раздела

$$Q = 25.7 \cdot 1,65 \cdot 10.2 = 95 \text{ Вт}.$$

Тогда количество тепла, отданное воздухом:

$$Q_\text{в} = CG(t_{2\Gamma} - t_{1\Gamma}), \quad (3.23)$$

где теплоемкость воздуха по [2] $C = 1870 \text{ Дж/кг}$. Конечная температура воздуха:

$$t_{2\Gamma} = 25 - \frac{95}{1870 \cdot 0.056} = 24.1^\circ\text{C}.$$

Тогда по уравнению теплового баланса температура воды, с учетом того, что она будет охлаждаться:

$$t_{2\text{ж}} = t_{1\text{ж}} - \frac{(\frac{Q_{\text{эф}}}{1.1} - Q)}{C_\text{ж}}, \quad (3.24)$$

где теплоемкость жидкости по [2] $C_\text{ж} = 4200 \text{ Дж/кг}$.

$$t_{2\text{ж}} = 15 - \frac{(\frac{1288}{1.1} - 95)}{4200 \cdot 0.2} = 13.7^\circ\text{C}.$$

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата
------	------	---------	---------	------

В первом приближении по массе испаренной влаги, были определены основные температуры, тепловые эффекты. Теперь, имея эти данные необходимо уточнить количество испаренной влаги.

3.1.6 Эффективность работы слоя насадки

В качестве лимитирующей стадии выступает массоотдача в газовой фазе. Уравнение массопередачи имеет вид:

$$M = \beta_r F \Delta P_{cp}, \quad (3.25)$$

Коэффициент массопередачи по данным [2]:

$$\beta_2 = \frac{0.407 \cdot D \cdot a \cdot Re^{0.655} \cdot Pr^{0.33}}{4 \cdot \varepsilon}, \quad (3.26)$$

Средняя движущая сила определяется:

$$\Delta P_{cp} = \frac{(P_1^* - P_1) - (P_2^* - P_2)}{\ln \left(\frac{P_1^* - P_1}{P_2^* - P_2} \right)}, \quad (3.27)$$

где P^* - определяется, как максимальное давление насыщенных паров при данной температуре, $P_1^* = 3192$ Па, $P_2^* = 3024$ Па.

Давление насыщенных паров при текущих влажностях на входе и на выходе из колонны соответственно по [2]:

$$P_1 = 1277 \text{ Па}$$

$$P_2 = 2842 \text{ Па.}$$

$$\Delta P_{cp} = \frac{(3192 - 1277) - (3024 - 2842)}{\ln \left(\frac{3192 - 1277}{3024 - 2842} \right)} = 736 \text{ Па.}$$

где D – коэффициент диффузии воды в воздухе, $D = 24.2 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

$$Pr = \frac{\mu}{\rho \cdot D}, \quad (3.28)$$

$$Pr = \frac{18.5 \cdot 10^{-6}}{1.19 \cdot 24.2 \cdot 10^{-6}} = 0.644.$$

$$\beta_2 = \frac{0.407 \cdot 24.2 \cdot 10^{-6} \cdot 240 \cdot 1774^{0.655} \cdot 0.644^{0.33}}{4 \cdot 0.679} = 0.1 \text{ м/с.}$$

Масса одной царги определяется:

$$M_1 = \left[\pi(0.2 + 0.01)0.01 \cdot 0.3 + 2 \cdot 0.02 \frac{\pi(0.3^2 - (0.2 + 2 \cdot 0.01)^2)}{4} \right] 1080 = 3.55 \text{ кг.}$$

Масса основания определяется, как масса листа (без учета небольших отверстий под болты), масса дополнительных элементов – двух цилиндрических патрубков, масса уголков – опор.

$$M_{осн} = M_{л} + M_{дон} + 2M_{уз}, \quad (3.39)$$

Плотность стали принимается 7850 кг/м³. По чертежу основные размеры стального листа 380x380x6. Диаметры отверстий под патрубки: 80 мм, 36 мм. Длина, наружный диаметр и толщина труб соответственно: 314x80x2, 80x36x2.

Длина уголков $L_y = 860$ мм, погонная масса: 3.05 кг/м. Уголки крепятся на опоре на $l_1 = 350$ мм от своего конца. Масса основания будет рассчитана с полной длиной уголков, а при расчете опор это пойдет в запас.

$$M_{осн} = 7850 \left[\left(0.38 \cdot 0.38 \cdot 0.006 - \frac{\pi(0.08^2 + 0.036^2)}{4} \cdot 0.006 \right) + \pi \cdot 0.002 \cdot 0.08 \cdot 0.314 + \pi \cdot 0.002 \cdot 0.08 \cdot 0.036 \right] + 2 \cdot 0.86 \cdot 3.05 = 13.3 \text{ кг.}$$

$$M_{\text{о}} = 1.1 \cdot 3.55 \cdot 6 + 13.3 = 36,7 \text{ кг.}$$

Тогда масса всего аппарата:

$$M_A = 36.7 + 4.71 + 53 = 94.3 \text{ кг.}$$

3.2.3 Определение расчетных параметров

При обычной работе колонны, действующие на отдельные узлы нагрузки не очень велики. Самые большие нагрузки аппарат испытывает от собственного веса. Таким образом, самыми опасными условиями – будут условия при гидроиспытании под наливом воды.

3.2.4 Определение расчетного давления

Расчетное давление при гидроиспытании будет равно гидростатическому давлению от столба жидкости. Самое опасное сечение находится внизу колонны. Высота столба определяется:

$$P_p = \rho_{ж} g H_{вн}, \quad (3.40)$$

$H_{вн}$ – высота внутренней полости аппарата, определяется $H_{вн} = 1.73$ м.

$$P_p = 998 \cdot 9.81 \cdot 1.83 = 17.9 \cdot 10^3 \text{ Па} = 1.79 \cdot 10^{-2} \text{ МПа.}$$

3.2.5 Определение расчетной температуры

Расчетная температура принимается 20°C, как температура при гидроиспытании.

3.2.6 Определение допускаемых напряжений материалов

Для расчетов требуются допускаемые напряжения, предел текучести и модуль упругости органического стекла – СО-95, материал болтов – сталь 45, материал опор – Ст 3, материал решетки, штуцеров – сталь 12Х18Н10Т. Данные были взяты из [30]-[31].

Таблица 3.1 – Основные прочностные характеристики выбранных конструкционных материалов

№	Материал	[σ], МПа	σ_T , МПа	E, МПа
1	СО-95	66	–	2900
2	Сталь 45	180	245	200000
3	Ст 3 сп	154	250	199000
4	Сталь 12Х18Н10Т	184	240	215000
5	Сталь 09Г2С	196	300	199000

3.2.7 Определение прочности клеевого шва

Так как цилиндрическая часть обечайки склеена смолой ЭД-20, то прочность шва может отличаться от прочности обечайки. Напряжения растяжения смолы ЭД-20 по [32] составляют 40 – 90 МПа. Таким образом коэффициент прочности шва принимается $\varphi \approx 40/66 = 0.6$.

3.2.8 Определение прибавки к толщине

Так как органическое стекло практически не подвергается коррозии от воды, то прибавку к толщине можно принять равной нулю, то есть $s = 0$.

3.2.9 Расчет обечайки корпуса

Расчет обечайки корпуса аппарата заключается в проверке действующего и допускаемого избыточного давления. Допускаемое давление обечайки по [33]:

$$[p] = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D + (s - c)}; \quad (3.41)$$

$$[p] = \frac{2 \cdot 0.6 \cdot 66 \cdot 10}{200 + 10} = 3.77 \text{ МПа.}$$

Условие прочности выполняется:

$$p \leq [p]; \quad (3.42)$$

$$1.79 \cdot 10^{-2} \text{ МПа} \leq 3.77 \text{ МПа}$$

3.2.10 Расчет опор аппарата

Опоры аппарата рассчитываются на изгиб. Максимальные напряжения в опоре определяются:

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{2W_x}, \quad (3.43)$$

где W_x – момент сопротивления на изгиб. Для уголка 50x50x3 по [31]

$$W_x = 2.54 \text{ см}^3 = 2.54 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

M – Момент, действующий в расчетном сечении. За расчетное принимается сечение, отстоящее от края уголка на $l_1 = 350$ мм. Момент определяется:

$$M = QgL, \quad (3.44)$$

Расчет ведется приближенно. За нагрузку Q принимается масса аппарата, $Q = M_A$. Плечо действия силы рассчитывается:

$$L = L_y - l_1 - l_2, \quad (3.45)$$

где l_2 – длина уголка, выступающая за середину опоры, $l_2 = 0.17$ м.

$$L = 0.86 - 0.35 - 0.17 = 0.34 \text{ м.}$$

$$M = 94.3 \cdot 9.81 \cdot 0.34 = 314 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{314}{2 \cdot 2.54 \cdot 10^{-6}} = 62 \cdot 10^6 \text{ Па} = 62 \text{ МПа}.$$

Условие прочности:

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma]; \quad (3.46)$$

где $[\sigma]$ – допускаемые напряжения материала уголка, материал СтЗсп., по [31]: $[\sigma] = 154$ МПа.

Тогда условие прочности выполняется:

$$58 \text{ МПа} \leq 154 \text{ МПа}.$$

3.3 Расчет пластинчатого модуля на прочность методом конечных элементов

3.3.1 Постановка задачи

В качестве объекта для прочностного расчёта использовалась модель пластины, выполненная из стали Ст3сп. Основная проблемой данного элемента является не высокая стойкость к внутреннему избыточному давлению. Модель устройства со всеми размерами приведена на рисунке (3.1)

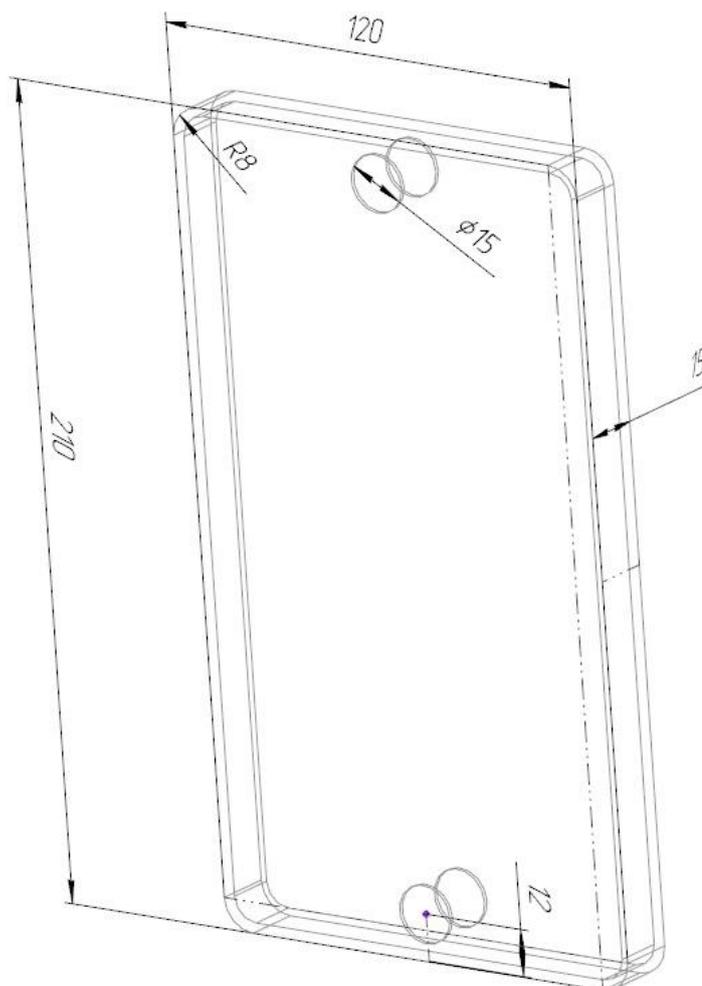


Рисунок 3.1 – модель устройства

Расчет проводился от избыточного давления $P = 1$ атмосферы. В качестве используется наружная сторона пластины, жестко закрепленная по периметру перегородки. С поверхности пластины убраны штуцера и пластина рассчитывалась на прочность без них (в качестве допущения). В программе КОМПАС 3D-19

Варианты разбиения пластины на конечные элементы максимальным размером 5 мм и 2,5 мм приведены на рисунках (3.2-3.3).

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

34



Результаты разбиения

Конечных элементов: 22406
Узлов: 7147
Тип элементов: 4-узловые тетраэдры
Параметры разбиения: Шаг = 5; Кс = 1.2; К
Глубина просмотра

Рисунок 3.2 – КЭ сетка 5 мм



Результаты разбиения

Конечных элементов: 90526
Узлов: 28664
Тип элементов: 4-узловые тетраэдры
Параметры разбиения: Шаг = 2.5; Кс = 1.2;
Глубина просмотра

Рисунок 3.3 – КЭ сетка 2,5 мм

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

35

В результате расчета методом конечных элементов получены следующее распределение напряжений по поверхности на рисунках (3.4).

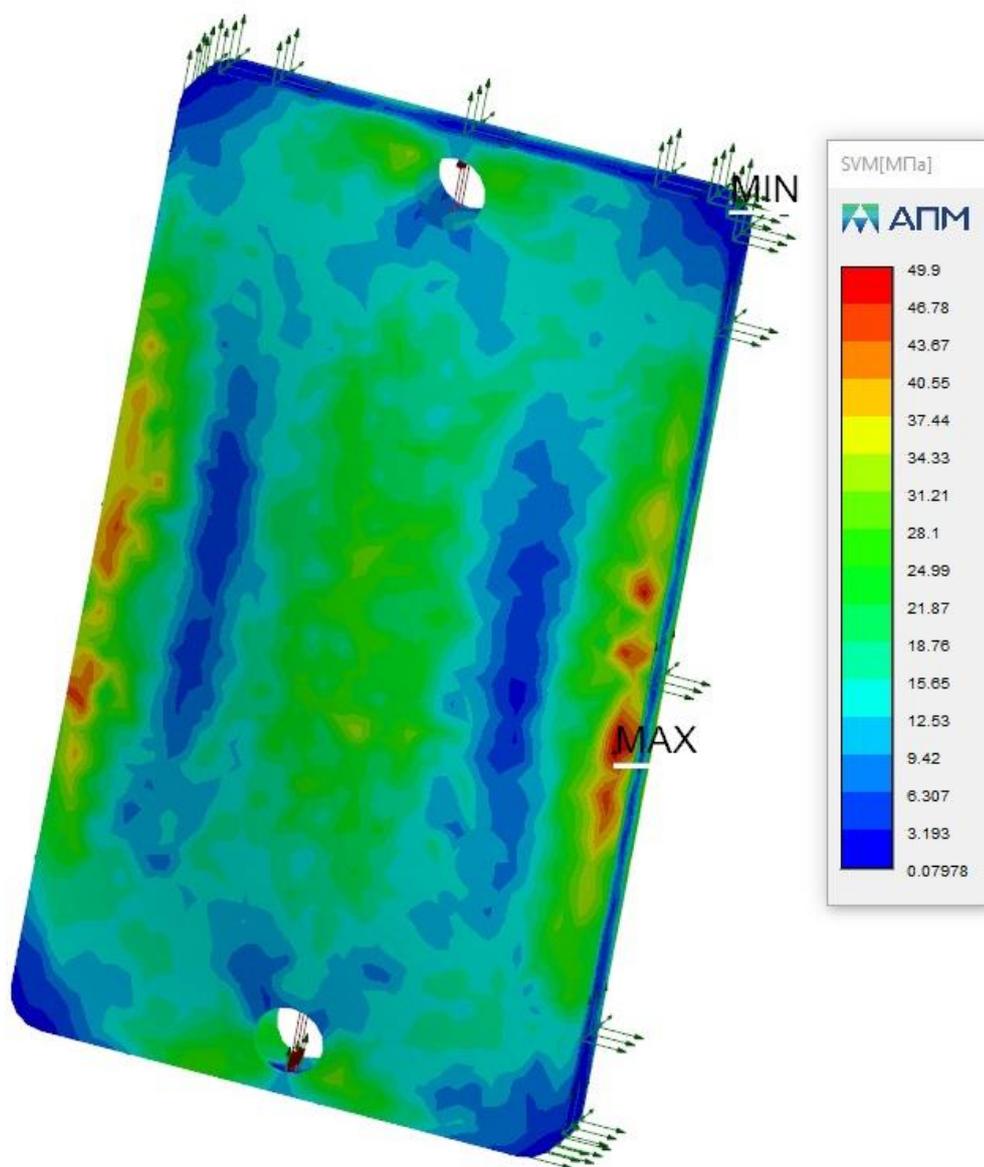


Рисунок 3.4 – Распределение напряжений по поверхности пластины размером сетки 2,5 мм

В результате анализа стоит отметить, что напряжения не превышают допусковые для стали Ст3 при максимальной температуре 70 °С. Таким образом данный теплообменный модуль может выдержать нагрузку 2 атмосферы. При увеличении давления возможно потребуются дополнительные силовые перегородки. Таким образом полученные напряжения не превышают допусковых 50 МПа < 154 МПа.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

36

4 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ

Основными целями проведенной исследовательской работы являлись:

- Проведение численного моделирования пластинчатого модуля, шириной 160 мм лабораторной колонны;
- проведение физического эксперимента на такой же модели на лабораторной установке;
- обработка и анализ полученных данных эксперимента.

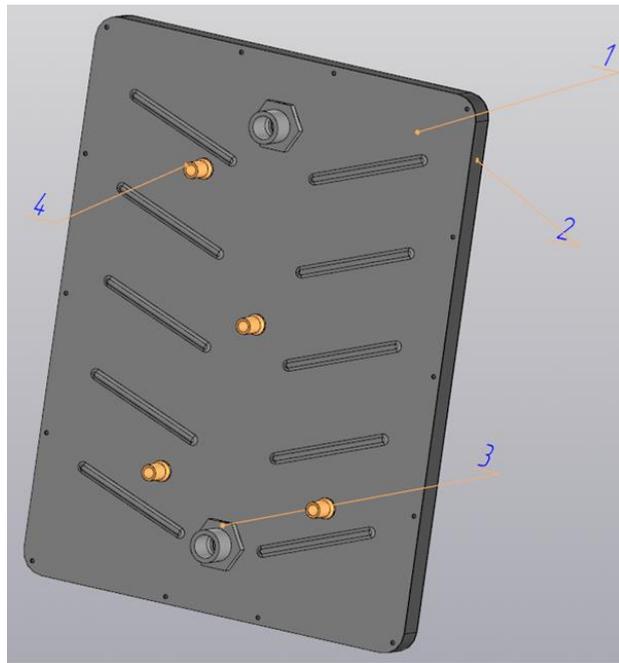
Согласно приведенным целям, основными этапами работы являлись:

- сборка, тестирование лабораторного стенда;
- исследование основных характеристик на ЭВМ;
- исследование работы установки в сопоставлении с численным моделированием.

4.1 Численное моделирование

4.1.1 Построение трехмерной модели

Была построена 3D - модель исследуемого объекта (теплообменный модуль). Конструкция полученной модели представлена на рисунке 4.1.



1–металлическая пластина; 2–пластиковая вставка; 3–штуцер; 4–гильза

Рисунок 4.1 – Теплообменный модуль

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

37

4.1.2 Методика построения конечно-элементной модели

Для расчёта в программе FLOWVISION компании «ТЕСИС» была создана 3D-модель внутренней полости теплообменного элемента (рисунок 4.2). Для упрощения геометрии и уменьшения времени расчёта было решено отказаться от рёбер на поверхности.

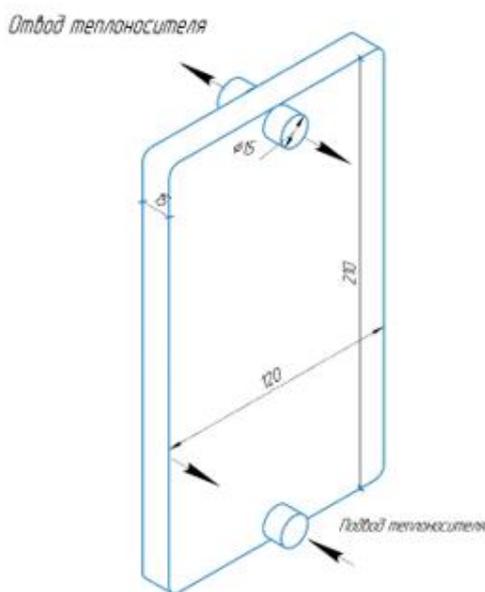


Рисунок 4.2 – Внутренняя полость теплообменного элемента

Проводим загрузку модели в программу Flow Vision. Расчетная область разбивалась на КЭ сетку. По оси X: 30 ячеек; по оси Y: 140 ячеек; по оси Z: 100 ячеек. Внешний вид КЭ сетки с заданными параметрами приведён на рисунке 4.3.

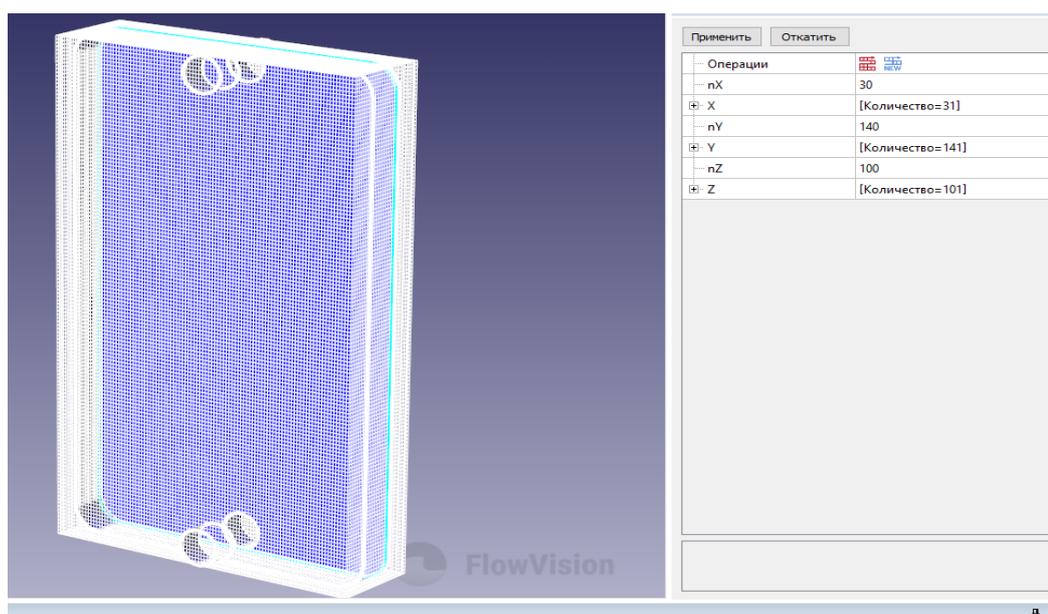


Рисунок 4.3 – Расчетная сетка блока

Устанавливаем основные опорные параметры, такие как температура, давление, вектор гравитации. Вещество: жидкость – вода и все свойства выбираются стандартными – из соответствующих таблиц внутри в программе. Основные физические процессы, выбранные в программе: движение (модель Навье-Стокса), турбулентность модель k-ε, теплоперенос – теплоперенос через h (энтальпия). Окно с установленными параметрами приведено на рисунке 4.4.

[-] Опорные величины	(Температура=273; Давление...
Температура	273
Давление	101000
[+] Вектор гравитации	(X=0; Y=-9.8; Z=0)
[+] g-Точка	(X=0; Y=0; Z=0)
g-Плотность	0
Слой	[Количество=0]

Рисунок 4.4 – Окно с общими установками

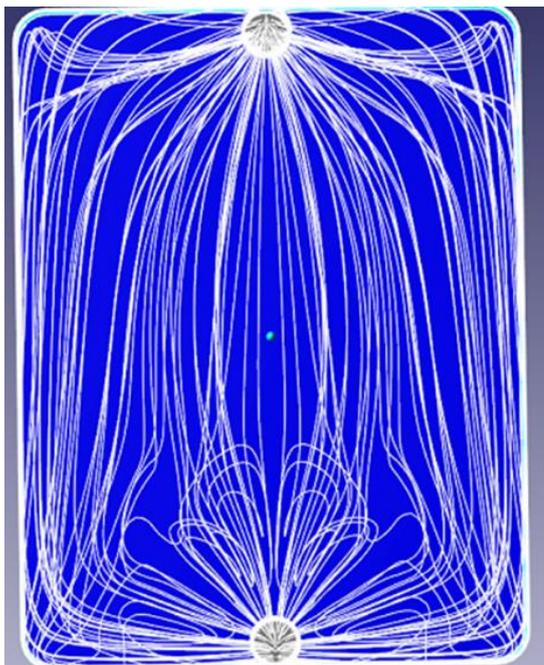
Проводились разные варианты разбиения и схождения было достигнуто при данном количестве ячеек. Дальнейшее увеличение числа ячеек не дает изменения результата более чем на 5%. В качестве исходных граничных условий принимается температура на стенке – 20°C. Температура на входе – 60°C. Кроме этого устанавливалась массовая скорость, согласно плану эксперимента.

В качестве результатов планируется проанализировать линии тока, распределение температур по внутреннему объему пластин, а также температуры на выходе из модуля.

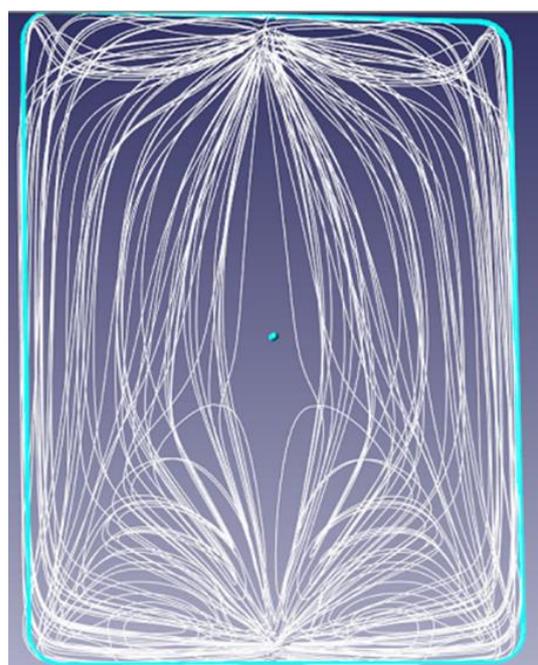
4.1.3 Обработка данных, полученных в результате численного эксперимента

В результате проведения ряда экспериментов были получены численные данные по основным параметрам работы модулей: температуре, давлению, скорости, линиям тока.

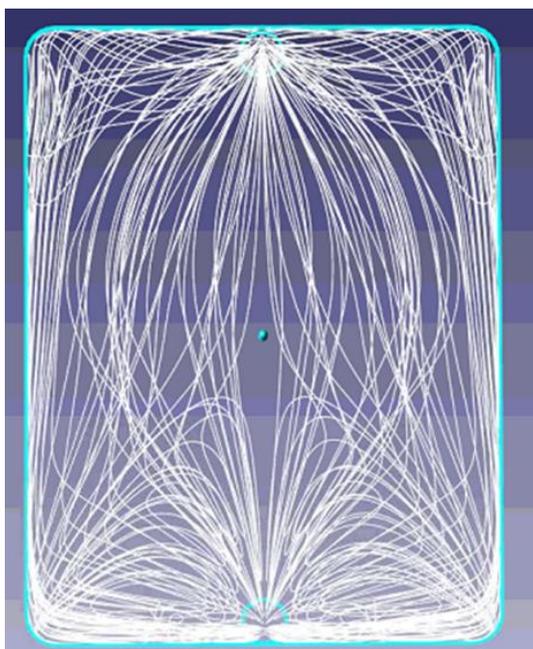
Ниже приведены примеры результатов в виде распределения параметров по площади пластинчатых модулей. На рисунке 4.5 приведены линии тока при различных расходах. На рисунке 4.6 приведены распределения температуры при различных расходах жидкости.



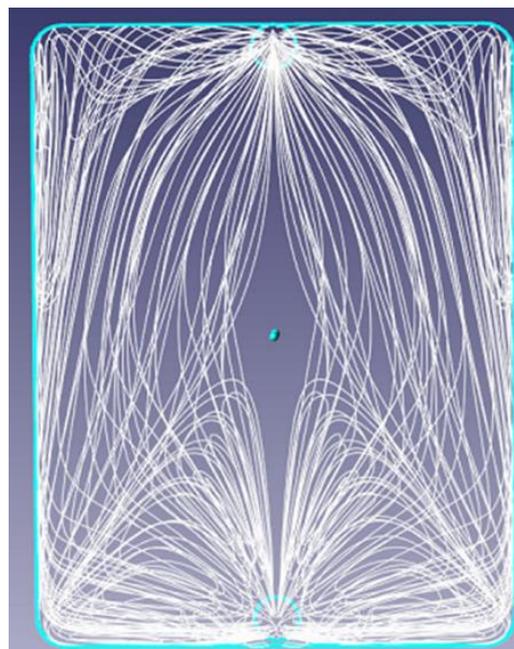
а



б



в



г

а – 42,5 кг/(м²·с) ; б – 85 кг/(м²·с) ; в – 238 кг/(м²·с) ; г – 2786 кг/(м²·с)

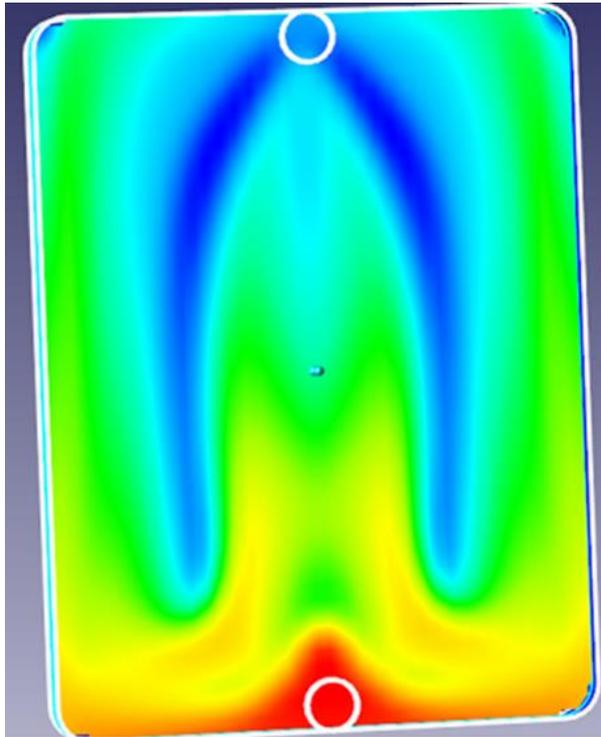
Рисунок 4.5 – распределение линий тока по объему пластинчатого модуля при различных массовых скоростях

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

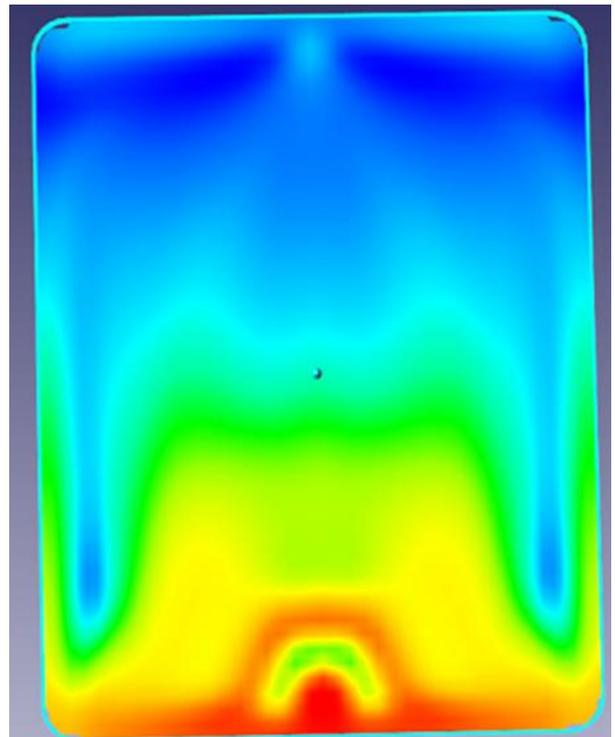
ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

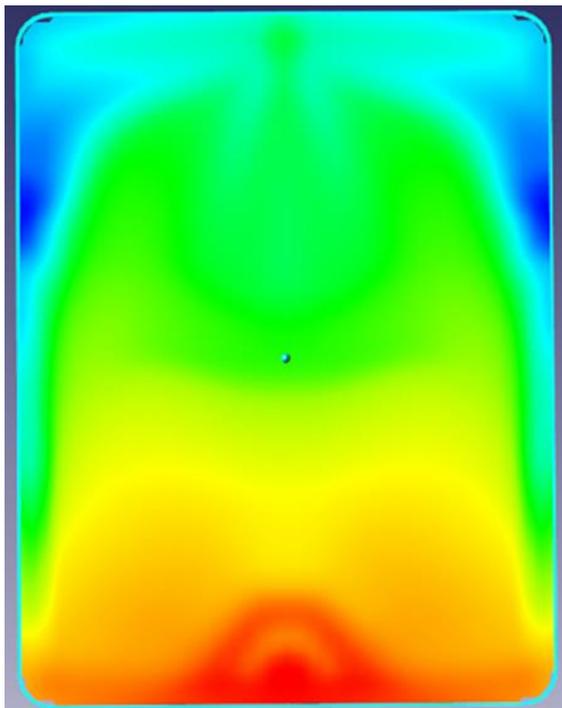
40



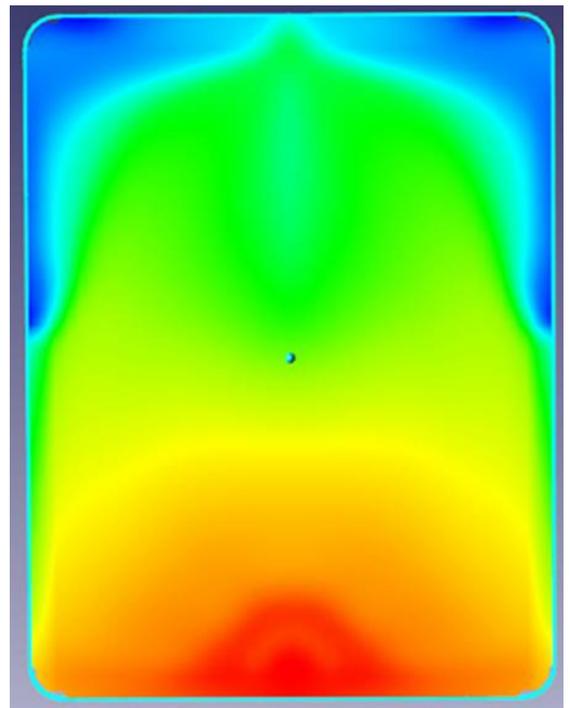
а



б



в



г

а – 42,5 кг/(м²·с) ; б – 85 кг/(м²·с) ; в – 238 кг/(м²·с) ; г – 2786 кг/(м²·с)

Рисунок 4.6 – Распределение температур по объему пластинчатого модуля при различных массовых скоростях

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

41

Обработка материалов проводится по уравнению теплоотдачи:

$$Q = \alpha \cdot F \cdot (t - t_{ст}), \quad (4.1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, фактически является определяемой величиной, Вт/(м² К);

F – поверхность теплообмена, составляет $F = 0,07875$ м²;

t – температура теплоносителя в пластине;

$t_{ст}$ – температура стенки.

Разность температур определяется, как средняя по пластине. Однозначно, для простоты температура стенки была принята постоянной и составила 20°C. Температура на входе также была постоянной и составляла 60 °С. Температура на выходе определяется по следующему алгоритму.

В программном комплексе Flow Vision был получен градиент температур в выходном штуцере представленный на рисунке 4.7. Для определения средней температуры теплоносителя на выходе из пластины были выделены цветовые контуры, соответствующие определенной температуре (рисунок 4.8). Далее была определена площадь каждого температурного контура и рассчитана средняя температура выходящего потока по зависимости (4.7).

$$t = \sum t_i (F_i / F_{сум}); \quad (4.2)$$

где t_i – температура i -ого контура;

F_i – площадь i -ого контура;

$F_{сум}$ – суммарная площадь.

Данные расчета температуры выходящего потока при массовой скорости 42,5 кг/(м² · с) представлены в таблице 4.1.

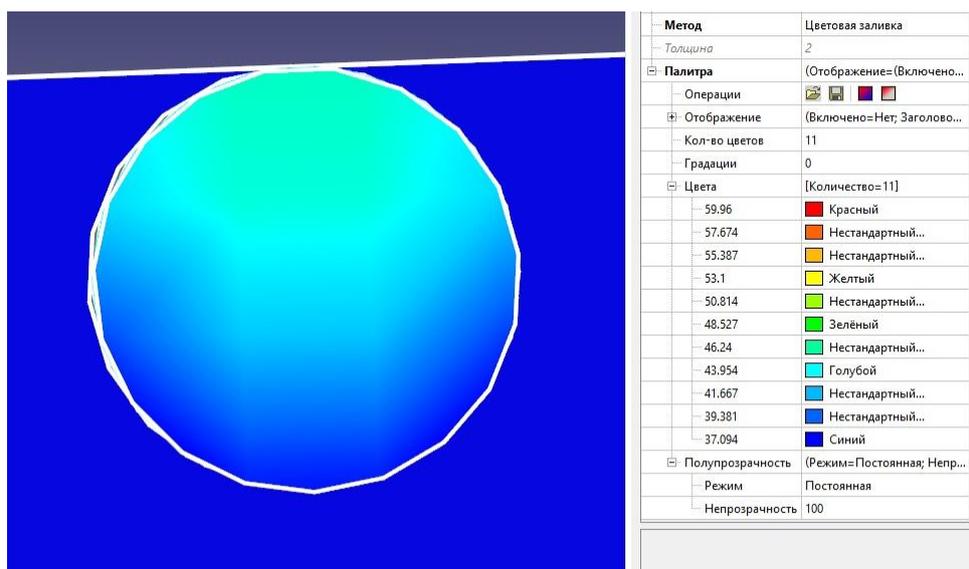


Рисунок 4.7 – Градиент температур в выходном штуцере

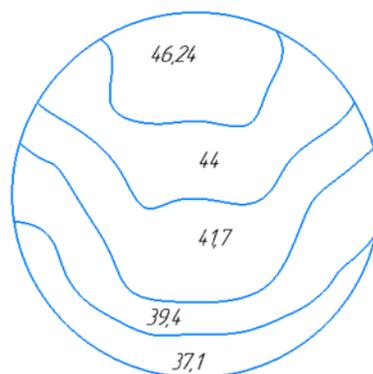


Рисунок 4.8 – Температурные контуры на штуцере

Таблица 4.1 – Данные расчета температуры выходящего потока при массовой скорости 42,5 кг/(м² · с)

Температурный контур	1	2	3	4	5
температура t , °С	46,24	44	41,7	39,4	37,1
площадь F , (мм ²)	1508	2173	2494	2034	1295
суммарная площадь $F_{\text{сумм}}$	9504				
температура потока	41,82721				

Тепловая нагрузка определяется по зависимости

$$Q = C \cdot G (t_{\text{ВЫХ}} - t_{\text{ВХ}}), \quad (4.3)$$

где C – теплоемкость воды при средней температуре, составляет $C = 4178$ Дж/(кг К);

G – расход теплоносителя;

$t_{\text{ВХ}}$, $t_{\text{ВЫХ}}$ – температура на входе и на выходе из пластины.

Результаты обработки экспериментальных данных и результаты расчетов приведены в таблице 4.2.

Приведенные данные на следующем графике 4.9 отражают различные данные исследователей, которые были приведены ранее в литературном обзоре. Общий вид уравнений – это степенные функции зависимости критерия Нуссельта от критерия Рейнольдса.

Таблица 4.2 – Результаты обработки эксперимента

№	G, кг/с	t _{ВХ} , °С	t _{ВЫХ} , °С	Q, Вт	t _{СТ} , °С	dt _Б , °С	dt _М , °С	dt, °С	α, Вт/(м ² К)	Re
1	0,015	60	41,8	1142	20	40	21,8	30,9	469	342
2	0,024	60	44,1	1596	20	40	24,1	32,05	632	548
3	0,03	60	44,85	1901	20	40	24,85	32,425	744	685
4	0,036	60	45,8	2137	20	40	25,8	32,9	824	822
5	0,048	60	47,9	2428	20	40	27,9	33,95	908	1097
6	0,06	60	48,44	2900	20	40	28,44	34,22	1076	1371
7	0,072	60	49,4	3192	20	40	29,4	34,7	1168	1645
8	0,084	60	49,87	3559	20	40	29,87	34,935	1294	1920
9	0,096	60	49,91	4053	20	40	29,91	34,955	1472	2194
10	0,2	60	52,56	6227	20	40	32,56	36,28	2180	4571
11	0,396	60	54,14	9714	20	40	34,14	37,07	3328	9051
12	0,592	60	54,73	13064	20	40	34,73	37,365	4439	13531
13	0,788	60	55	16501	20	40	35	37,5	5588	18011
14	0,984	60	55,2	19786	20	40	35,2	37,6	6682	22491

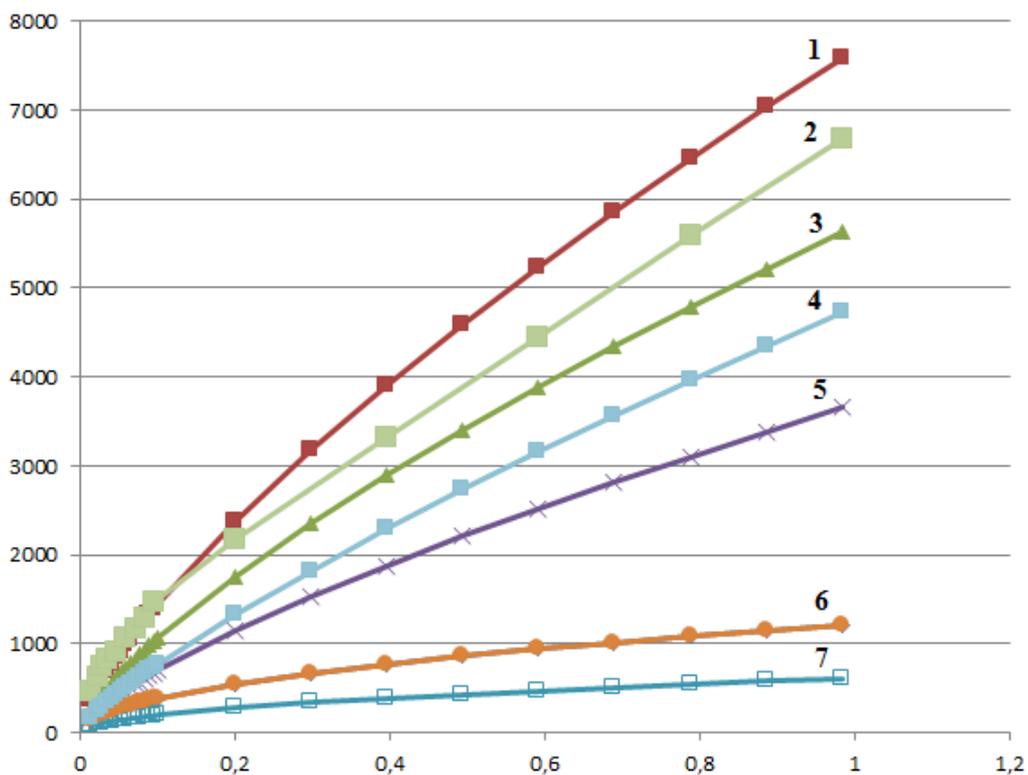


Рисунок 4.9 – Сравнение разных

1 – данные по [23] пластин модификации 0,6; 2 – экспериментальные данные; 3 – данные по [23] пластин модификации 0,3; 4 – данные [24]; 5 – данные по [24] пластин модификации 0,2; 6 – данные по [18]; 7 – данные по [25].

Анализируя данные, полученные в результате моделирования, можно сделать вывод, что они находятся в промежутке между данными по пластинчатому теплообменнику модификаций 0,6 и 0,3.

4.2 Проведение физических экспериментов

4.2.1 Описание методики проведения эксперимента

Эксперимент проводится на установке, приведенной на рисунке 4.10.



Рисунок 4.10 – Экспериментальная установка для изучения теплообмена

Целью проводимых экспериментов было определение коэффициента теплоотдачи в зависимости от расхода теплоносителя внутри теплообменного элемента.

Перед началом проведения эксперимента необходимо заполнить емкость термостата и прозрачную емкость водой. После этого производится включение насоса и тепло – электронагревателя. Для проведения опыта требуется чтобы температура горячего теплоносителя достигла заданного значения. Для снятия показаний температурных датчиков и расходомера необходимо запустить соответствующую программу на ЭВМ, выполнить подключение к вторичным приборам и задать интервал записи данных.

После установления в прозрачной емкости стационарного температурного режима требуется подать в теплообменный модуль холодный теплоноситель с заданным расходом. Одновременно с этим необходимо выполнить запуск алгоритма записи данных в рабочем окне программы. После окончания проведения первого опыта необходимо остановить запись данных, и выставить новое значение расхода после чего снова начать запись данных.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

По окончании эксперимента необходимо отключить насос и ТЭН после чего опорожнить прозрачную емкость и емкость термостата.

4.2.2 Методика обработки экспериментальных данных

Особенностью обработки экспериментальных данных является общая нестационарность процесса, так как температура на входе/выходе из емкости и пластины постоянно меняется в некотором диапазоне, расход жидкостей также несколько меняется и пульсирует. Кроме этого, для определения средней температуры поверхности пластины потребуются показания всех датчиков с его поверхности.

Обработка проводится по аналогичным зависимостям, приведенным ранее. Пример полученных данных для одного цикла экспериментов приведен в таблице 4.3.

Таблица 4.3. – Пример необработанных экспериментальных данных.

Время, с	Температура на выходе, °С	Температура на пластине 1, °С	Темп. на пластине 2, °С	Темп. на пластине 3, °С	Температура на входе, °С
116	23	28,37	27,81	27,37	16,19
118	23,06	28,37	27,87	27,37	16,19
120	23,06	28,44	27,94	27,5	16,19
122	23,12	28,5	28	27,56	16,19
124	23,12	28,56	28,06	27,62	16,19
126	23,12	28,62	28,06	27,69	16,19
128	23,19	28,69	28,19	27,81	16,19
130	23,19	28,75	28,31	27,87	16,25
132	23,25	28,75	28,31	28	16,25
134	23,25	28,75	28,31	28,06	16,25
136	23,31	28,75	28,31	28,12	16,25
138	23,87	28,81	28,31	27,94	16,25
140	23,94	28,81	28,31	26,94	16,25
142	23,87	28,75	28,12	25,81	16,25
144	23,56	28,69	28,12	25,62	16,25
146	22,81	28,56	27,87	25	16,25
148	21,81	28,37	27,56	24,25	16,25
150	20,62	28	26,81	23,56	16,25
152	20,19	27,81	26,44	23,31	16,25
154	19,94	27,69	26,19	23,25	16,31

Приведем расчет для 140 с, с учетом среднего расхода для диапазона значений расхода $G = 0,05$ кг/с. Тепловая нагрузка:

$$Q = 4170 \cdot 0,05 (23,94 - 16,25) = 3207 \text{ Вт.}$$

Тогда коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \cdot Q / (F \cdot (t - t_{CT})) = 3207 / (0,07875 \cdot ((23,94 + 16,25) / 2) - (28,81 + 28,31 + 26,94) / 3) = 5140 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$$

Сравнительный график приведен на рисунке 4.11.

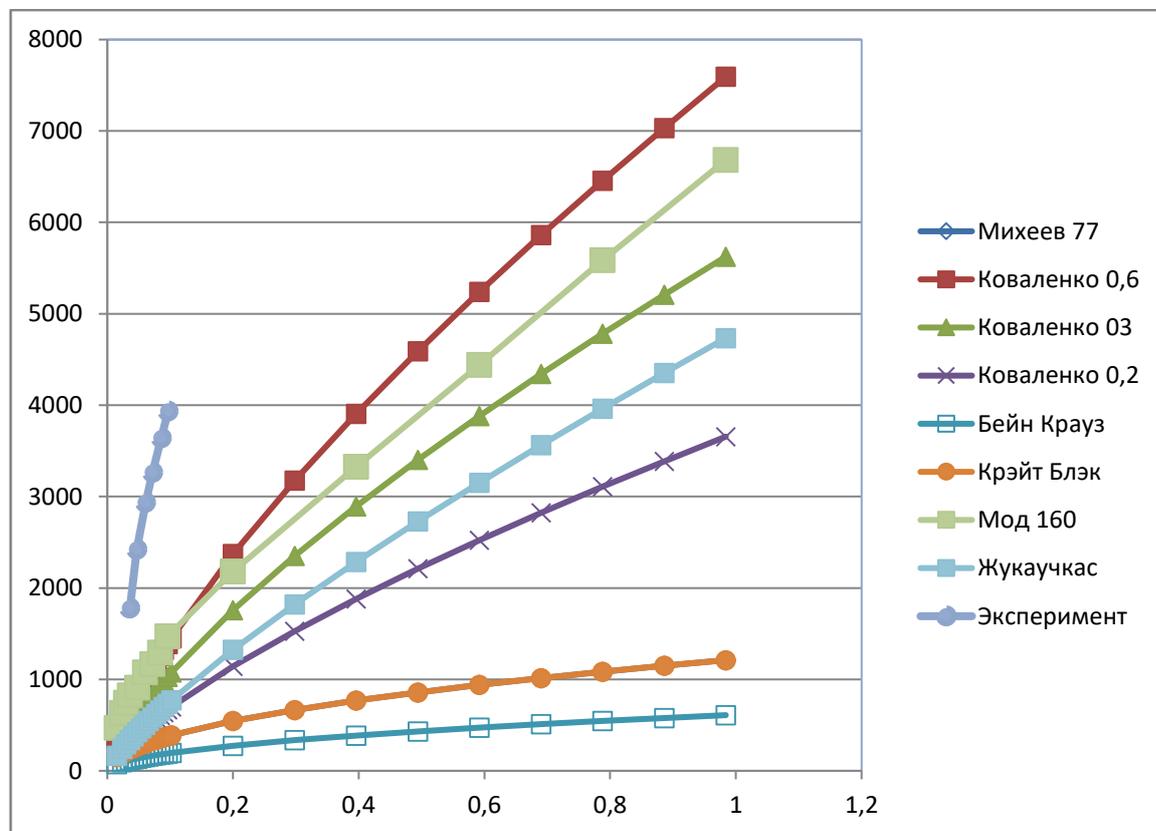
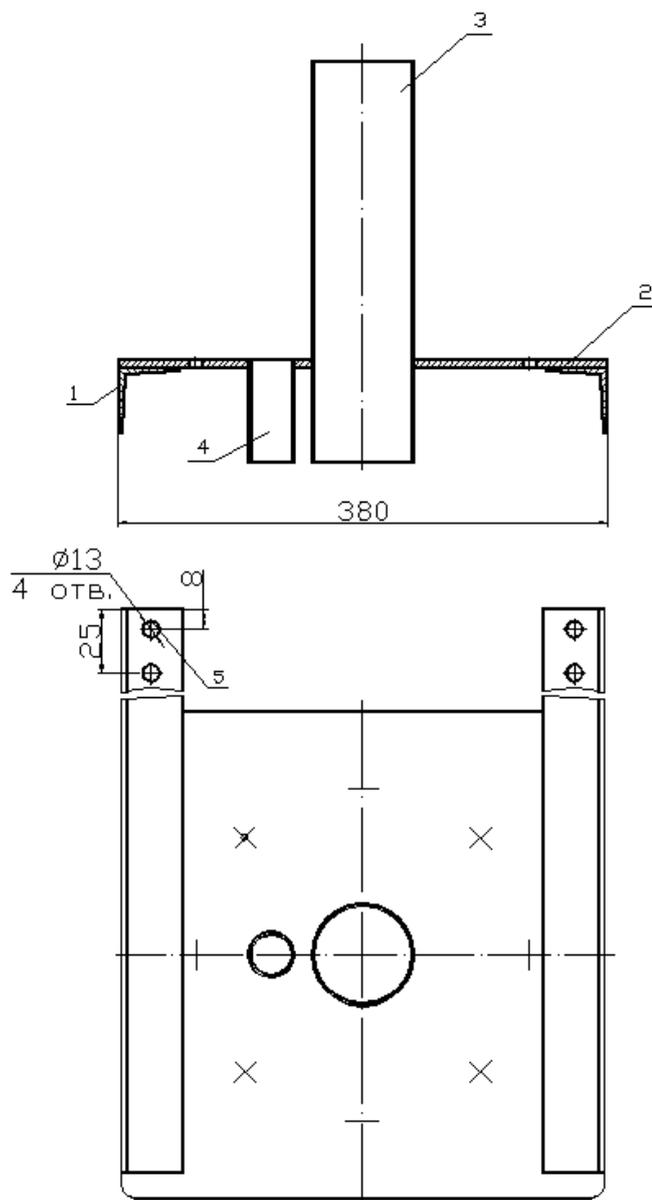


Рисунок 4.11 – Сравнительный график

Анализ полученных данных показывает, что требуется дальнейший анализ разработанных пластин на их теплоотдающую способность. Полученные экспериментальные данные не подтверждают характер зависимостей, полученных CFD методом. Окончательной сходимости данных не достигнуто, однако стоит отметить, что разработанные модули стоит рассматривать как элементы пластинчатого теплообменника.

5 МОНТАЖ АППАРАТА

Монтаж колонны производят снизу-вверх от основания до каплеотбойника. Эскиз основания приведен на рисунке 5.1.



1 – Опоры, 2 – лист основания, 3 – труба для входа газа, 4 – штуцер, 5 – отверстие.

Рисунок 5.1 – Основание лабораторной колонны

Монтаж колонны производится согласно общим рекомендациям [26]. Основание крепится болтами М12 к опорной конструкции (отверстия поз. 5). Выверяется положение в пространстве по уровню. В случае необходимости используют подкладки под болты или пользуются набором шайб для выравнивания аппарата в пространстве. Возможна приварка опор.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

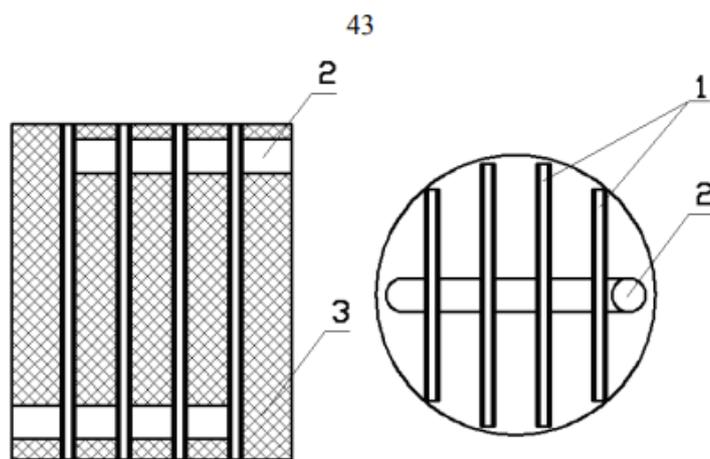
Лист

48

После затяжки болтов присоединяют шланг слива к штуцеру 4. При этом шланг надевают на штуцер и затягивают хомутом. Соединение желательно сразу проверить на герметичность путем заполнения водой. Аналогично присоединяют шланг к трубе 3 снизу. Штуцера на всех царгах заглушаются.

После этого монтируют первую царгу. Монтаж начинают с того, что на месте расположения уплотнительной поверхности устанавливают прокладку. Затем сверху ставят царгу и затягивают предварительно установленные болты “крест-накрест”. Сила затяжки не должна превышать допустимую. Царгу выверяют уровнем, подтягивают одни болты и несколько ослабляют другие.

Далее на царгу устанавливают прокладку и распределительное устройство, на него также устанавливается прокладка. После монтируется следующая царга. В отверстия закладываются болты, и производится их затяжка, с последующей выверкой царги по уровню. На следующую царгу также устанавливается прокладка, на которую устанавливается специальное кольцо для опорной решетки. На кольцо также устанавливается прокладка. Сразу же устанавливается решетка, сверху крепится царга болтами, производится выверка по уровню. Затем насадка собирается в блок путем чередования пластинчатых модулей и сетчатой насадки. Штуцера соединяются на гибких шлангах небольшими элементами с хомутами. Затем устройство устанавливают на решетку. Также в царге есть отверстия, в эти отверстия снаружи ставятся резьбовые патрубки. Патрубки снаружи герметизируются универсальным герметиком. Схема блока КУ для лабораторной колонны приведен на рисунке 5.2.



1 – Пластины, 2 – коллектор, 3 – сетчатая насадка

Рисунок 5.2 – Схема блока КУ для лабораторной колонны

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

49

Далее между двумя прокладками устанавливается распределитель жидкости. Распределитель устанавливается сверху колонны. На него ставится царга и закрепляется болтами. Болты затягиваются. Распределительное устройство заполняется, производится его выверка при неполном орошении колонны. Небольшая подгонка осуществляется путем затяжки одних болтов и ослабления других в допустимых пределах. Сверху царги устанавливается прокладка. Последнюю царгу–каплеотбойник монтируют, предварительно закрепив в ней трубопровод. Болты вкладываются между царгами и затягиваются.

Производят испытание колонны под налив. Проверяется работа распределительного устройства. Оно должно обеспечивать равномерное распределение жидкости по всем патрубкам. Далее отглушаются штуцера, требуемые для работы дифманометра. Закрепляется измерительное оборудование.

6 РЕМОНТ АППАРАТА

При ремонте колонны основное внимание уделяется очистке внутренних устройств аппарата, ремонту корпуса и внутренних устройств и замене насадочных колец.

Колонна при капитальном ремонте (КР) разбирается полностью. Все царги поочередно, начиная с верхней, снимаются вручную (их вес невелик). После съема двух верхних царг вручную выгружается плоскопараллельная регулярная насадка. Насадка снимается с колонны вместе с царгой. Дальнейшее ее обслуживание производится в мастерской. Для извлечения насадки из колонны требуется открутить боковые штуцера, после чего насадка может быть извлечена из аппарата. Далее производится ремонт и обслуживание насадки. Текущее обслуживание заключается в промывке, проверки герметичности элементов, визуальном осмотре. Капитальный ремонт устройства необходим в случае достижения срока службы около 2 лет или конструктивных нарушений (значительная коррозия, сколы, нарушение плотности внутренних соединений). Для проведения капитального ремонта потребуется снять все хомуты с соединений и убрать все соединяющие патрубки. В итоге насадка будет разобрана на металлические блоки и соединительные элементы. В случае значительной коррозии блоков они заменяются на новые, либо на них устанавливается заплатка при наличии малых дефектов сварных соединений. Сетчатые элементы также заменяются в случае серьезной коррозии. Трубки при наличии дефектов тоже заменяются, хомуты устанавливаются новые. После ремонта насадка собирается в обратном порядке и устанавливается на аппарат. Общий вид контактного устройства показан на рисунке 6.1.



Рисунок 6.1 – Контактное устройство для колонны.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

51

При необходимости проводится ремонт корпуса опорной решетки и распределительных устройств. Насадка меняется или очищается. Далее следует процесс монтажа, за исключением крепления опоры. Ремонт заканчивается гидравлическим испытанием. В случае обнаружения течей в соединениях подтягиваются болтовые соединения. Если при этом течь не устраняется, то производится осмотр места течи, переустанавливается или меняется прокладка в соединении.

Текущее обслуживание (ТО) включает наружный осмотр, подтяжку соединений при необходимости, проверку их герметичности и пр.

Годовой график ППР приведен в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Годовой график ППР лабораторной колонны

Оборудование	Нормативы ресурса между ремонтами и ТО			Нормативы простоя в ремонте и ТО			График ремонтов и ТО												Годовой простой в ремонте и ТО	Годовой фонд рабочего времени
	КР	ТР	ТО	КР	ТР	ТО	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь		
	Колонна	2700	1450	260	250	10	2	ТО	ТР	ТО	ТО	ТО	ТО	КР	ТО	ТО	ТО	ТО		

Таблица составлена на основе опытных данных по ремонту лабораторной колонны. Данные могут варьироваться.

Таблица 6.2 – Распределение часов при максимально возможных нормах рабочего времени

	Январь	Февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
часы при 12 часовом РД	15	19	22	22	19	21	22	22	22	21	20	22
	180	228	264	264	228	252	264	264	264	252	240	264
		ТР					КР					
Простой	2	10	2	2	2	2	250	2	2	2	2	2
наработка до ТО или обслуживания	178	1452	262	262	226	250	2670	262	262	250	238	262

Таблица 7.1 – Относительные значения параметров микроклимата на рабочих местах

Период года	Температура воздуха, °С		Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
	диапазон ниже оптимальных величин	диапазон выше оптимальных величин		для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин	для диапазона температур воздуха выше оптимальных величин
Холодный	19,0-20,9	23,1-24,0	15-75	0,1	0,2
Теплый	20,0-21,9	24,1-28,0	15-75	0,1	0,3

Таблица 7.2 – Оптимальные нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне лаборатории

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость воздуха, не более, м/с
Холодный	21-23	60-40	0,2
Теплый	22-24	60-40	0,2

В холодный период года в лаборатории используется центральное водяное отопление (радиатор, температура теплоносителей составляет 80-90⁰С). Так как в помещении лаборатории тепловыделение не превышает 84 кДж/(ч·м³), то лаборатория относится к помещениям с незначительным выделением тепла и не требуется мер для его отвода.

7.2.3 Шум и вибрация

Источником шума при проведении лабораторных испытаний являются насос, вентилятор и калорифер. По характеру спектра шум широкополосный, по временным характеристикам – постоянный.

Источником вибрации при проведении экспериментов являются движущиеся части насоса и вентилятора. По способу передачи на человека вибрация – передающаяся через опорные поверхности.

Для снижения шума и вибрации вибрирующее оборудование расположено на резиновых амортизаторах.

Величины параметров шума

Среднегеометрическая частота, Гц	63
Уровень звукового давления, Дб	86
Уровень звука и эквивалентный уровень звука, ДбА	78

Нормируемые величины параметров [36]

Уровень звукового давления, Дб	94
Уровень звука и эквивалентный уровень звука, ДбА	80

Для снижения воздействия шума на обслуживающий персонал насос и вентилятор соединяются с трубопроводом эластичной вставкой и используются звукоизолирующие устройства. Также для защиты органов слуха используются средства индивидуальной защиты: наушники противозумные и беруши из вспененного полиуретана.

Величины параметров вибрации

Среднегеометрическая частота, Гц	8
Среднеквадратичная виброскорость, м/с · 10 ⁻²	0,12
Логарифмический уровень виброскорости, Дб	82

Нормируемые величины параметров вибрации [36]

Среднеквадратичная виброскорость, м/с · 10 ⁻²	0,2
Логарифмический уровень виброскорости, Дб	92

Для уменьшения влияния вибрации на обслуживающий персонал используется виброизолирующие прокладки, гибкие вставки.

$e_n = 1\%$ – нормированное значение КЕО;

K_3 – коэффициент запаса.

Для помещения с воздушной средой, содержащей в рабочей зоне $1 \div 5$ мг/м³ пыли, при вертикальном расположении светопропускающего материала $K_3 = 1,4$.

$\eta_o = f\left(\frac{L}{B}, \frac{B}{H}\right)$ – световая характеристика окон.

Соотношение длины помещения к его ширине равно

$$\frac{L}{B} = \frac{14}{6} = 2,3 \approx 2.$$

Соотношение ширины помещения к его высоте равно

$$\frac{B}{H} = \frac{6}{2,6} = 2,3 \approx 2.$$

Согласно определенным соотношениям $\eta_o = 9,5$.

τ_o – общий коэффициент светопропускания

$$\tau_o = \tau_1 \tau_2 \tau_3 \tau_4, \quad (7.6)$$

где τ_1 – коэффициент светопропускания материала, для двойного оконного стекла $\tau_1 = 0,8$.

τ_2 – коэффициент, учитывающий потери света в переплетах светового проема;

Для отдельных деревянных переплетов $\tau_2 = 0,6$;

τ_3 – коэффициент, учитывающий потери света в несущих конструкциях, при боковом освещении $\tau_3 = 1$;

τ_4 – коэффициент, учитывающий потери света в солнцезащитных устройствах, при использовании убирающихся штор $\tau_4 = 1$.

$$\tau_o = 0,8 \cdot 0,6 \cdot 1 \cdot 1 = 0,48,$$

$r_1 = f\left(\frac{L}{B}, \frac{B}{H}, \rho_{cp}\right)$ – коэффициент, учитывающий повышение КЕО при боковом освещении

благодаря свету, отраженному от поверхности помещения, где ρ_{cp} – среднеприведенное значение коэффициентов отражения потолка, стен и пола.

Принимается коэффициент отражения

- потолка $\rho_{ПТ} = 70\%$;

- стен $\rho_C = 50\%$;

- пола $\rho_{П} = 30\%$.

$$\rho_{cp} = \frac{\rho_{ПТ} + \rho_C + \rho_{П}}{3} = \frac{70 + 50 + 30}{3} = 50\%.$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

58

Ввиду отсутствия при проведении экспериментов горючих и взрывчатых веществ в количествах, достаточных для образования взрывоопасной смеси в объеме, превышающем 5% свободного объема помещения, данное помещение по взрывоопасности не классифицируется.

Мероприятия по предупреждению поражения электрическим током работающих в лаборатории [38]:

- все электрооборудование должно быть занулено;
- работа должна производиться с исправным электрооборудованием, неисправности может устранить только специалист электрик;
- нельзя переносить с места на место включенные в электросеть приборы, а так же ремонтировать приборы и оборудование, находящиеся под напряжением;
- в случае перерыва в подаче электроэнергии все электроприборы следует немедленно выключить.

7.3.2 Безопасность технологического процесса

При работе на лабораторном стенде необходимо соблюдать следующие правила техники безопасности:

- 1) запрещается приступать к работе без разрешения руководителя, включать без необходимости пусковые устройства, рубильники, кнопки, вращать маховики вентиляей;
- 2) при проведении лабораторной работы должны соблюдаться требования, изложенные в инструкции по технике безопасности в лаборатории «Машины и аппараты химических производств» №
- 3) запрещается прикасаться к токоведущим проводам и частям электрооборудования, к вращающимся элементам насосно-компрессорного оборудования;
- 4) При поражении электрическим током, а также при получении травмы пострадавшему необходимо оказать первую помощь, сообщить руководителю и вызвать врача;
- 5) При обнаружении любой неисправности необходимо немедленно сообщить руководителю работ;
- 6) По окончании работ необходимо привести рабочее место в порядок и отключить стенд от сети.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

60

7.3.3. Безопасность технологического оборудования

Вместимость (объем), м ³	0,05
Рабочее давление, МПа (абс)	0,1
Среда в аппарате	вода, воздух
Температура среды в аппарате, °С	20÷40
Материал, контактирующий с рабочей средой: сталь ВСт3сп5 ГОСТ 380-71; Сталь 3 ГОСТ 1050-84; сталь 08Х18Н10Т ГОСТ 5632-82; оргстекло СО-95.	
Материал уплотнительных прокладок: резина ГОСТ 7338-77.	
Габаритные размеры аппарата, мм:	
- длина	380
- ширина	880
- высота	1875
Масса аппарата, кг	87.8
Способ изготовления – сборный.	

7.4 Пожарная безопасность

При проведении лабораторных исследований вещества, классифицируемые с точки зрения пожарной и взрывной опасности, не выделяются.

Категория помещения по [9] – Д, так как в этом помещении обращаются негорючие вещества и материалы в холодном состоянии.

Зона помещения лаборатории к взрывоопасной не относится, так как в ней не имеются и не могут образовываться взрывоопасные смеси.

Характеристика здания:

Количество зданий	1
Этажность	2 этажа
Категория взрыво и пожароопасности	Д
Степень огнестойкости строительных конструкций – I;	
Предел огнестойкости строительных конструкций (min/max), час	
- стены	2,5
- колонны	2,5
- балки	1
- плиты	1
Число эвакуационных выходов	2

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

61

8 ОРГАНИЗАЦИОННАЯ ЧАСТЬ

8.1 График выполнения работ

Для организации проектирования установки, монтажа новых технических устройств и проведения экспериментов составляется график выполнения всего цикла работ. Продолжительность работ рассчитывается по теории вероятности на основе математической статистики.

Ожидаемое время выполнения работ определяется [39]:

$$t_{ож} = \frac{3a + 2b}{5}, \quad (8.1)$$

где a – минимальная длительность работ, в рабочих днях;

b – максимальная длительность работ, в рабочих днях.

Данные по видам работ и их длительность заносим в таблицу 8.1:

Таблица 8.1 – виды работ и затраты времени

№ п/п	Наименование работы	Исполнитель	Оценка длительности работы		
			a	b	$t_{ож}$
1	2	3	4	5	6
1	Получение задания	студент	0	0	0
2	Изучение задания	студент	1	2	1,4
3	Литературный обзор	студент	4	5	4,4
4	Обоснование выбора конструкции	студент	1	1,5	1,2
5	Проектировочный расчет	студент	7	8	7,4
6	Разработка чертежей	студент	14	18	15,6
7	Изучение внутренних устройств колонны на ЭВМ	студент	5	6	5,4
8	Разработка методики обработки эксперимента	студент, инженер	3	4	3,4

Продолжение таблицы 8.1- виды работ и затраты времени

9	Интерпретация полученных данных	студент, инженер	2	2,5	2,2
10	Сопоставление с известными методиками	студент	1	1,5	1,2
11	Подготовка стенда к изучению характеристик	слесарь	2	3	2,4
12	Проведение экспериментов	студент, инженер	20	25	22
13	Ввод результатов экспериментов в ЭВМ	студент	2	3	2,4
14	Обработка результатов экспериментов	студент, инженер	3	4	3,4
15	Оформление графиков	студент	3	5	3,8
16	Оформление записки	студент	9	11	9,8
17	Утверждение проекта	студент	1	2	1,2
18	Подготовка к защите	студент	1	2	1,2
19	Защита	студент	0,5	1	0,7

Определяем резервы времени и критический путь.

Критический путь представляет собой длительность всего комплекса работ.

Для определения длительности работ и резервов времени определяем следующие величины:

1) раннее время свершения события

$$t_{pj} = t_{pi} + t_{ij}, \quad (8.2)$$

где t_{pj} – раннее время свершения j-го события;

t_{pi} – раннее время свершения предшествующего i-го события;

t_{ij} – длительность работы, результатом которой стало j-тое событие.

2) позднее время свершения событий определяется по формуле

$$t_{ni} = t_{nj} - t_{ij}, \quad (8.3)$$

где t_{ni} – позднее время свершения i-го события;

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата
------	------	---------	---------	------

t_{nj} – позднее время свершения последующего j -го события.

3) резерв времени события определяется по формуле

$$R_i = t_{ni} - t_{pi}, \quad (8.4)$$

Расчеты основных параметров сетевого графика заносим в таблицу 6, а обозначение событий и график приведена на рисунке 8.1 и 8.2 соответственно.

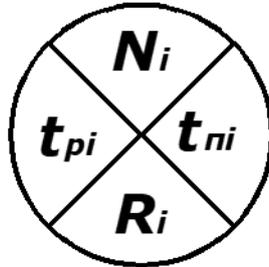


Рисунок 8.1 – Обозначение событий

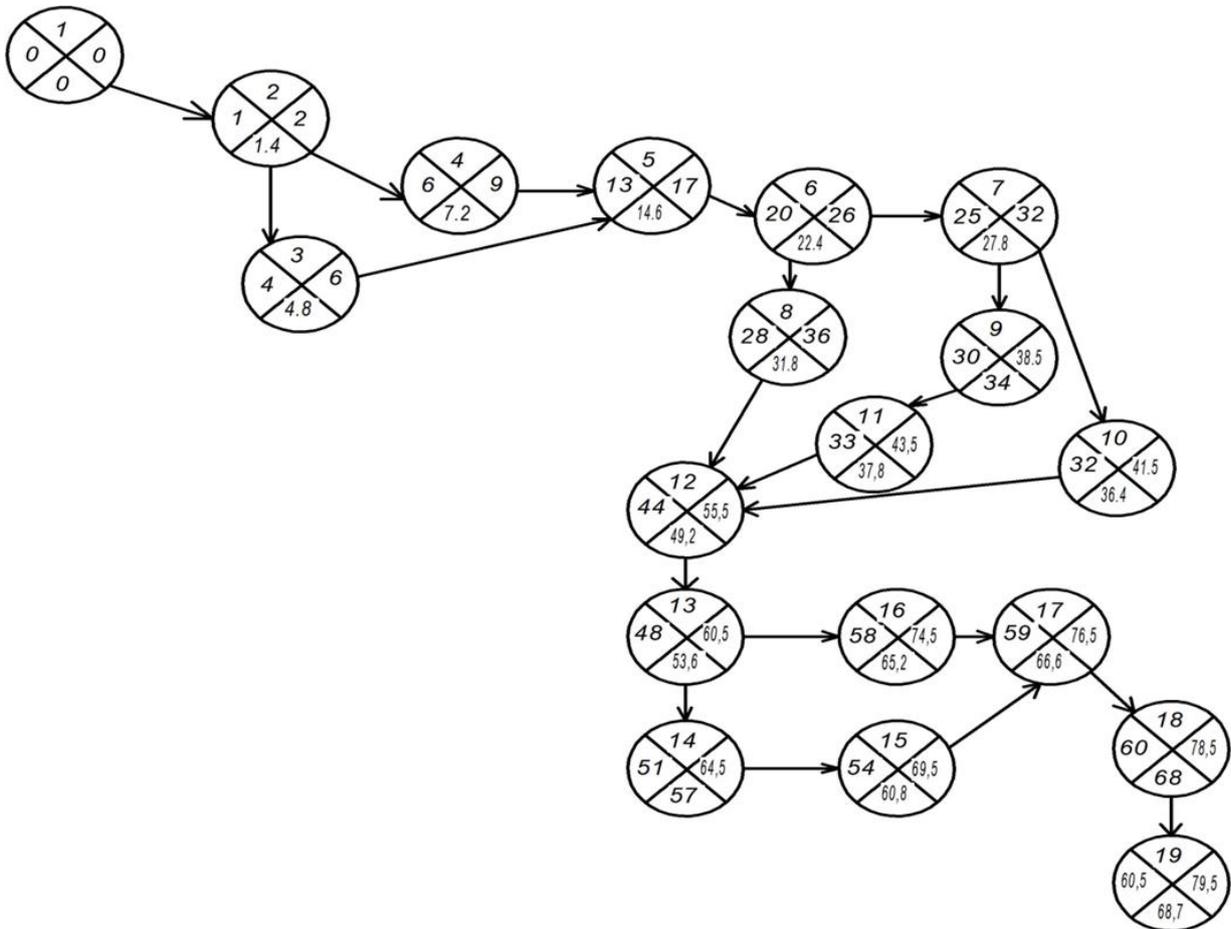


Рисунок 8.2.2 – Сетевой график

Таблица 8.2 – время свершения событий

№ п/п	Наименование работы	t _р , дней	t _п , дней	R, дней
1	2	3	4	5
1	Задание получено	0	0	0
2	Требования задания учтены	1,4	1,4	0
3	Литературный обзор выполнен	5,8	7	1,2
4	Выбор конструкции обоснован	2,6	2,6	0
5	Проектировочный расчет выполнен	10	10	0
6	Чертежи разработаны	25,6	25,6	0
7	Внутренние устройства изготовлены	31	31	0
8	Методика проведения экспериментов разработана	29	35,6	6,6
9	Внутренние устройства смонтированы	33,2	33,2	0
10	Калорифер подключен к схеме	32,2	35,6	3,4
11	Трубопровод для подачи воды смонтирован	35,6	35,6	0
12	Эксперименты проведены	57,6	57,6	0
13	Результаты экспериментов введены в ЭВМ	60	60	0
14	Результаты экспериментов обработаны	63,4	66	2,6
15	Графики оформлены	67,2	69,8	2,6
16	Записка оформлена	69,8	69,8	0

Продолжение таблицы 8.2 - время совершения событий

17	Проект утвержден	71	71	0
18	подготовка к защите закончена	72,2	72,2	0
19	Защита проведена	72,9	72,9	0

На сетевом графике представлены все данные из таблицы 8.2.2

Анализируя сетевой график выполнения работ можно сделать вывод, что большинство событий лежит на критическом пути.

Критический путь

1-2-4-5-6-7-9-11-12-13-16-17-18-19

Для выполнения всего комплекса работ по сетевому графику необходимо 72,9 рабочих дня

или $\frac{72,9 \cdot 7}{6} = 85,05 \approx 85$ календарных дня.

При анализе сетевого графика рассчитываем вероятность свершения конечного события в срок. Считается, что вероятность должна находиться в пределах

$$0,35 < P_K < 0,65 .$$

При $P_K < 0,35$ есть вероятность нарушения срока свершения заданного конечного события.

При $P_K > 0,65$ работы критического пути имеют большие резервы.

Вероятность свершения завершающего события в заданный срок определяется по формуле [25]

$$z = \frac{T_3 - T_K}{\sqrt{\sum_{ij} \sigma_{ij}^2}} , \quad (8.5)$$

где z – аргумент нормальной функции распределения вероятностей;

T_3 – заданный срок свершения конечного события, $T_3 = 73$ дн.;

T_K – срок свершения завершающего события, $T_K = 72,9$ дн.;

σ_{ij}^2 - дисперсия работы, лежащей на критическом пути. Определяется

по формуле (8.6)

$$\sigma_{ij}^2 = \sum 0,04(b - a)^2 , \quad (8.6)$$

Рассчитав дисперсию на критическом пути, получим сумму

$$\sum \sigma_{ij}^2 = 2,11 ,$$

$$z = \frac{73 - 72,9}{\sqrt{2,11}} = 0,069.$$

По таблице [25] определяем $P_K = 0,53$.

$$0,35 < P_K = 0,53 < 0,65.$$

Следовательно, график является напряженным.

8.2 Экономическая часть

Экономическая часть включает в себя все необходимые расчеты непосредственных финансовых затрат на проектирование, монтаж и эксплуатацию лабораторной установки и как результат составление сметы затрат.

Затраты складываются из следующих пунктов:

1) проектирование лабораторной установки:

- затраты на канцелярские принадлежности (в т.ч. цифровые носители информации);
- стоимость работ исследователей по проектированию установки и отчисления на социальное страхование;

2) монтаж лабораторной установки:

- стоимость оборудования, устанавливаемого на ней;
- стоимость материалов, узлов и приборов;
- стоимость транспортных средств (принимается 9% от стоимости вышеперечисленных элементов);
- стоимость услуг сторонних организаций;
- затраты, связанные с использованием установки во время пуска и испытаний;
- стоимость работ исследователей по испытаниям смонтированной установки и отчисления на социальное страхование;

3) проведение исследовательской работы:

- затраты, связанные с использованием установки во время проведения исследовательской работы;
- стоимость работ исследователей и отчисления на социальное страхование;
- прочие расходы.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

68

8.2.1 Расчет затрат на проектирование лабораторной установки

На стадии проектирования реализуются выбор и обоснование конструкции основного аппарата (насадочной колонны), выбор вспомогательного оборудования и КИП, составление принципиальной технологической схемы лабораторной установки, все необходимые расчеты, подтверждающие надежность оборудования. Все это сопровождается созданием соответствующей конструкторской документации, что требует затрат на канцтовары, а также оплату труда по проектированию.

8.2.2 Расчет затрат на канцелярские принадлежности

Статьи по этому разделу приведены в таблице 8.3

Таблица 8.3 – Затраты на канцтовары

Наименование продукции	Сумма, руб.
Бумага	250
Рукописные принадлежности (шариковые ручки, набор карандашей, средства коррекции текста)	100
Носители информации (диски DVD)	100
Итого	450

8.2.3 Расчет основной заработной платы исследователей в период проектирования

Стоимость работ исследователей складывается из:

- заработной платы лаборанта;
- заработной платы преподавателя.

Оклад лаборанта составляет 15000 руб.

Оклад преподавателя 25000 руб.

Длительность работ по проектированию лабораторной колонны составляет:

- у лаборанта 30 календарных дней;
- у преподавателя 9 рабочих дней или $\frac{9 \cdot 7}{6} = 10,5$ календарных дня.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

69

Таблица 8.4 – данные о заработной плате исследователей

Должность	Месячный оклад, руб.	Зарплата за один рабочий день, руб.
лаборант	15000	600
преподаватель	25000	1000

Зарплата лаборанта за один рабочий день $\frac{15000}{25} = 600$ руб.

Зарплата преподавателя за один рабочий день $\frac{25000}{25} = 1000$ руб.

Таблица 8.5 – затраты на заработную плату в период проектирования

Должность	Затрачено дней	Зарплата, руб/день	Сумма основной зарплаты, руб.
лаборант	30	600	18000
преподаватель	10,5	1000	10500
Итого:			28500

Сумма основной зарплаты лаборанта $30 \cdot 600 = 18000$ руб.

Сумма основной зарплаты преподавателя $10,5 \cdot 1000 = 10500$ руб.

Таким образом, сумма основной заработной платы по проектированию лабораторной установки составляет 28500 руб.

8.2.4 Расчет дополнительной заработной платы исследователей в период проектирования

Дополнительная заработная плата составляет 25% от основной заработной платы.

Сумма дополнительной зарплаты лаборанта $18000 \cdot 0,25 = 4500$ руб.

Сумма дополнительной зарплаты преподавателя $10500 \cdot 0,25 = 2625$ руб.

Таким образом, сумма дополнительной заработной платы по проектированию лабораторной установки составляет 7125 руб.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

70

Таблица 8.7 – стоимость оборудования

№ п/п	Наименование	Количество	Ед. изм.	Цена единицы, руб.	Сумма, руб.
1	2	3	4	5	6
1	Насос шестеренный БГ11-22	1	шт.	32000	32000
2	Термостат	1	шт.	40000	40000
3	ТЭН	1	шт.	5000	5000
4	Трансформатор	1	шт.	2000	2000
5	Емкость	1	шт.	120000	120000
6	Расходомер с программной базой	1	шт.	80000	80000
7	Ротаметр	1	шт.	30000	30000
8	Вентиль (нерж) Ду 20	5	шт.	6200	31000
	Вентиль(нерж) Ду 25	7	шт.	1050	7350
9	Кран Ду 32	3	шт.	200	600
	Кран Ду 20	1	шт.	150	150
10	Трубопровод Ду 20	5	м	300	1500
	Трубопровод Ду 15	1,2	м	250	300
	Трубопровод Ду 30	1,5	м	200	300
	Трубопровод Ду 20	2	м	150	300
11	Шланг Ду 20	1,5	м	100	150
12	Фильтр	1	шт.	2750	2750
13	Автомат А202У4	2	шт.	5000	10000
14	Пускатель	3	шт.	1000	3000
15	Кнопка включения	3	шт.	150	450
16	Щит управления	2	шт.	5000	10000
17	Кабель ПРГД 07	1,5	шт.	250	375
18	Прибор УКТ-Щ	1	шт.	23980	23980
19	Вспомогательные материалы			2000	2000
Итого:				403205	
20	Транспортные расходы		9%		36297
Итого:				439502	

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

72

Таблица наглядно демонстрирует, что основная часть от общей предполагаемой суммы затрат на лабораторную установку приходится на оборудование и приборы. Высокой стоимостью по отношению к насосно-компрессорному и другому вспомогательному оборудованию обладают контрольно-измерительные приборы в виду сложности их изготовления.

8.2.6 Расчет услуг сторонних организаций

Монтаж лабораторной установки осуществляется с использованием услуг сторонних организаций. В работе участвовали: слесарь 4-го разряда (изготовление внутренних устройств колонны, монтаж трубопроводов и трубопроводной арматуры) с тарифной ставкой повременщика при нормальных условиях труда 200 руб/ч и электромонтер 6-го разряда (подключение калорифера, установка щита КИП) с тарифной ставкой 300 руб/ч..

Таблица 8.8 – стоимость услуг сторонних организаций

Должность	Затрачено дней	Тарифная ставка	Зарплата, руб.
слесарь	5,4	200	8640
электромонтер	1,2	300	2880
Итого:			11520

Оплата работы слесаря составит $5,4 \cdot 8 \cdot 200 = 8640$ руб.

Оплата работы электромонтера составит $1,2 \cdot 8 \cdot 300 = 2880$ руб.

Стоимость услуг сторонних организаций составляет 11520 руб.

8.2.7 Расчет основной заработной платы исследователей в период испытаний установки

Длительность работ по испытанию лабораторной колонны составляет:

- у лаборанта 20 календарных дней;

- у преподавателя 10 рабочих день или $\frac{10 \cdot 7}{6} = 11,67$ календарных дня.

Таблица 8.9 – затраты на заработную плату в период испытаний

Должность	Затрачено дней	Зарплата, руб/день	Сумма основной заработной платы, руб.

лаборант	20	600	12000
преподаватель	11,67	1000	11670
Итого:			23670

Сумма основной зарплаты лаборанта $20 \cdot 600 = 12000$ руб.

Сумма основной зарплаты преподавателя $11,67 \cdot 1000 = 11670$ руб.

Сумма основной заработной платы на испытания лабораторной установки составляет 23670 руб.

8.2.8 Расчет дополнительной заработной платы исследователей в период испытаний установки

Дополнительная заработная плата составляет 25% от основной заработной платы.

Сумма дополнительной зарплаты лаборанта $12000 \cdot 0,25 = 3000$ руб.

Сумма дополнительной зарплаты преподавателя $11670 \cdot 0,25 = 2917,5$ руб.

Таким образом, сумма дополнительной заработной платы на испытания лабораторной установки составляет 5917,5 руб.

8.2.9 Расчет отчислений на социальные нужды

Отчисления на социальные нужды составляют 30,2 %.

Отчисления на социальное страхование составляют 30,2% от основной и дополнительной заработной платы, т.е. $0,302 \cdot (23670 + 5917,5) = 8935,4$ руб.

8.2.10 Расчет затрат, связанных с использованием установки во время испытаний

Учитывая характер исследовательской работы и тот факт, что лабораторная установка представляет собой модель колонного аппарата, стоит отметить, что расчет затрат, связанных с использованием установки, сводится к расчету затрат на электроэнергию и на расход воды (теплоноситель).

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата
------	------	---------	---------	------

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

74

Таблица 8.10 – затраты на электроэнергию и воду в период испытаний

Устройство	Мощность, кВт.	Цена, руб/кВт·ч	Потребление теплоносителя (вода), м ³	Цена, за ед теплоносителя, руб/м ³	Время работы, ч.	Сумма, руб.
Насос	1.20	7	3	14	8	109,2
Термостат	3.00	7	-	-	8	168
КИП и доп. нагреватель	2.50	7	-	-	3	52,5

Итого: 329,7 руб

Затраты на электроэнергию и потребление воды составят (за 2 дня):

- для насоса $1,2 \cdot 7 \cdot 8 + 3 \cdot 14 = 109,2$ руб.;
- для термостата $3 \cdot 7 \cdot 8 = 168$ руб.;
- для КИП и доп. нагревателя $2,5 \cdot 7 \cdot 3 = 52,5$ руб.;

Таким образом, затраты на электроэнергию во время испытаний установки составили 329,7 руб.

Таблица 8.11 – расчет затрат на установку в период монтажа

№ п/п	Наименование статьи расхода	Сумма
1	Затраты на оборудование	439502
2	Затраты на услуги сторонних организаций	11520
3	Основная з/п сотрудников	23670
4	Дополнительная з/п сотрудников	5917,5
5	Отчисления на социальные нужды	8935,4
6	Затраты на электроэнергию установки	329,7
Итого:		489874,3

В итоге сумма всех затрат на монтаж составит 489874,3 руб.

Наибольшие затраты приходятся на покупку оборудования.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата
------	------	---------	---------	------

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

75

8.2.11 Расчет затрат на проведение исследовательской работы

Расчет основной заработной платы исследователей в период исследования

Длительность работ на лабораторной установке составляет:

- у лаборанта 35 календарных дней;

- у преподавателя 21 рабочий день или $\frac{21 \cdot 7}{6} = 24,5$ календарных дня.

Таблица 8.12 – затраты на заработную плату в период проведения исследований

Должность	Затрачено дней	Зарплата, руб/день	Сумма основной заработной платы, руб.
лаборант	65	600	39000
преподаватель	24,5	1000	24500
Итого:			63500

Сумма основной заработной платы лаборанта $65 \cdot 600 = 39000$ руб.

Сумма основной заработной платы преподавателя $24,5 \cdot 1000 = 24500$ руб.

Таким образом, сумма основной заработной платы составляет 63500 руб.

8.2.12 Расчет дополнительной заработной платы исследователей

Сумма дополнительной заработной платы лаборанта $39000 \cdot 0,25 = 9750$ руб.

Сумма дополнительной заработной платы преподавателя $24500 \cdot 0,25 = 6125$ руб.

Таким образом, сумма дополнительной заработной платы составляет 15875 руб.

8.2.13 Расчет отчислений на социальные нужды

Отчисления на социальные нужды составляют 30,2 %.

$0,302 \cdot (63500 + 15875) = 23971,3$ руб.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

76

8.2.13 Расчет затрат, связанных с использованием установки

Таблица 8.13 – затраты на электроэнергию и теплоноситель (вода)

Устройство	Мощность, кВт.	Цена, руб/кВт·ч	Потребление (вода), м ³	Цена, за ед. теплоносителя, руб/м ³	Время работы, ч.	Сумма, руб.
Насос	1.20	7	10	30	100	1140
Термостат	3.00	7	-	-	100	2100
КИП и доп. нагреватель	2.50	7	-	-	100	1750
Итого:						4990 руб

Затраты на электроэнергию и воду составят (20 дней):

- для насоса $1,2 \cdot 7 \cdot 100 + 10 \cdot 30 = 1140$ руб.;
- для термостата $3 \cdot 7 \cdot 100 = 2100$ руб.;
- для КИП и доп. нагревателя $2,5 \cdot 7 \cdot 100 = 1750$ руб.

Таким образом, затраты составили 4990 руб.

Во время проведения исследований возникает необходимость использования дополнительных средств и материалов (крепежные детали, материалы уплотнения и герметизации). Эти расходы составляют 2% от общей заработной платы исследователей, т.е. $0,02 \cdot (63500 + 28500 + 5917,5) = 1958,4$ руб.

Таблица 8.14 – расчет затрат на установку в период монтажа

п/п	Наименование статьи расхода	Сумма
1	2	3
1	Основная з/п сотрудников	63500
2	Дополнительная з/п сотрудников	15875
3	Отчисления на социальные нужды	23971,3
4	Затраты при использовании установки	4990
5	Прочие затраты	1958,4
Итого:		110294,7

Сумма затрат на проведение исследований составит 110294,7 руб.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

77

8.2.15 Составление сметы затрат на лабораторную установку

Таблица 8.15 – смета затрат на лабораторную установку

п/п	Наименование статьи расхода	Сумма
1	Затраты на проектирование экспериментальной установки	46833,8
2	Затраты на монтаж экспериментальной установки	489874,3
3	Затраты на проведение исследований	110294,7
Итого:		647002,75

Таким образом затраты на создание экспериментального стенда и проведение научно-исследовательских работ составили 647002,75 руб.

8.4 Выводы по разделу

В процессе выполнения работы составлен сетевой график, смета затрат, рассчитаны нормативы на выполнение работ. Наибольшую долю расходов (около 77%) составляют расходы на закупку оборудования. Следовательно, для уменьшения себестоимости проекта целесообразно уменьшить именно эти расходы. Расходы на оборудование можно сократить следующими путями:

1. Создание единой системы насосно-компрессорного оборудования, используемой для обеспечения нескольких лабораторных стендов.
2. Использование (где это возможно) единой системы измерения параметров потоков, для сокращения количества приборов на каждый конкретный стенд.
3. Использование КИП, имеющих меньшую стоимость или б/у.
4. Использование более дешевых материалов, где это целесообразно.

Данные мероприятия позволяют сократить стоимость установки на 10 – 30%.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ

Лист

78

14. Кутателадзе, С.С. Гидродинамика газожидкостных систем/ С.С. Кутателадзе, М.А. Стырикович. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.
15. Левич, В. Г. Физико-химическая гидродинамика/В.Г. Левич–М.: “Государственное издательство физ.-математической литературы”, 1959. – 700 с.
16. Степыкин, А.В. Гидродинамика и массообмен в регулярной насадке со встроенными теплообменными модулями: Диссертация канд. техн. наук. – Тамбов: ФГБУ, 2016. – 181 с.
17. Михеев М.А., Основы теплопередачи/ М.А. Михеев, Михеева И.М. – Изд. 2-е, Стереотип. М., «Энергия», 1977. 344 с.
18. Крейт Ф. Основы теплопередачи/ Ф. Крейт, Блэк У. – Пер. с англ.—М.: Мир, 1983. — 512 с. ил.
19. S. Kakas, R.K. Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer/ S. Kakas, Shah, W. Aung. – Wiley, New York, 1987.
20. Olga Arsenyeva. The investigation of heat transfer and hydraulic resistance in small-scale pillow-plate heat exchangers/ Olga Arsenyeva, Mark Piper, Alexander Zibart, Alexander Olenberg, Eugeny Kenig. – Energy, 2019.
21. ГОСТ 7338-90 Пластины резиновые и резинотканевые. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 18 с.
22. ТУ 38.303-04-04-90 Герметики кремнийорганические. Технические условия. – 1990. – 38 с.
23. Коваленко, Л.М., Пластинчатые теплообменные аппараты/ Л.М. Коваленко, Рудь С.Л. – Цинтихимнефтемаш, 1983- 56 с.
24. Жукаускас, А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 472 с.
25. Adrian Bejan. Heat transfer handbook, Published by John Wiley & Sons/ Bejan Adrian, Allan D. Kraus. – Inc., Hoboken, New Jersey, 2003.
26. Ермаков В.И. Ремонт и монтаж химического оборудования/ В.И. Ермаков., Шейн В.С. – Л.: химия, 1981.
27. Ульянов, В. М. Примеры и задачи по курсу машины и аппараты химических производств. /Под ред. В.М. Ульянова. – Н. Новгород: “НГТУ”, 2003 – 356 с.
28. Тимонин, А.С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования. /Справ. В 3 т. изд: “Мир”, 2002 г, - 1028 с.
29. Тимонин, А.С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования. /Справ. В 3 т. изд: “Мир”, 2002 г, - 1028 с.

30. ГОСТ 10667–90. Стекло органическое листовое. Технические условия.
31. ГОСТ ДЛЯ СТАЛИ
32. ГОСТ 10587-84 Смолы эпоксидно-диановые неотвержденные. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 20 с.
33. ГОСТ Р 52857.1-2007 – ГОСТ Р 52857.12-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.
34. Р 2.2.2006-05. Руководство по гигиенической оценке, факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда.
35. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
36. ГОСТ 12.1.012-2004. Вибрационная безопасность. Общие требования.
37. СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение
38. ПУЭ. Правила устройства электроустановок
39. Шадрина Г.В. Экономический анализ: учебник для бакалавров/ Г.В. Шадрина. – Люберцы: Юрайт, 2016. – 515 с.

					<i>ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		82

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Описание чертежей

					<i>ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>83</i>

					<i>BP-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>84</i>

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Спецификации

					<i>ВР-НГТУ-17ТМО-000-21 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>85</i>