СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Введение 2

1 Характеристика вопроса по литературным и производственным данным. Обоснование актуальности исследования. Описание объекта исследования 3

1.1 Описание абсорбционного оборудования и области его применения 3

1.2 Описание разрабатываемой технологии и ее развитие. Методы модернизации 8

1.3 Литературный обзор конструктивных исполнений насадочных тех и обоснование актуальности исследования 16

1.4 Технико – экономическое обоснование 18

2 Исследовательская часть. Общие требования к безопасности проведения исследований 19

2.1 Описание технологической схемы МЭА – очистки отходящих газов от CO_2 19

2.2 Принципиальная схема лабораторной установки для исследования процесса абсорбции 22

2.3 Оборудование и приборы лабораторного стенда 25

2.4 Конструкционные материалы 27

2.5 Методика проведения исследований 27

2.6 Методика обработки опытных данных 28

2.7 Выводы по разделу 39

2.8 Безопасность и экологичность проектных решений в научно-исследовательской работе 39

3 Проектно – конструкторская часть. Рекомендации к практическому использованию результатов исследования 48

3.1 Расчеты аппарата 48

3.2 Прочностной анализ царги колонны абсорбции 66

4 Организационно – экономическая часть исследовательской работы 69

Заключение 83

Список литературных источников 84

Приложение А «Опись чертежей» 87

Приложение Б «Спецификации» 89

ВВЕДЕНИЕ

Во многих сферах химической и нефтехимечской промышленности существует потребность в массообменном оборудовании, в частности, абсорбционном. Абсорбцией называется процесс поглощения газа жидкостью, в котором газ растворим. Области применения абсорбционного оборудования весьма широки, приведем некоторые из них:

- получение готового продукта путем поглощения газа жидкостью. К данному примеру можно отнести абсорбцию SO_3 в производстве серной кислоты, абсорбцию окислов газа водой и т.д.;
- разделение готовых смесей для выделения одного иди нескольких компонентов смеси;
- очистка газа от вредных компонентов;
- улавливание ценных компонентов из газовой смеси.

Из большого многообразия конструктивных исполнений абсорбционного оборудования большое распространение получили насадочные абсорберы, относящиеся к группе поверхностных абсорберов. В качестве контактного устройства для данного типа аппаратов выступают насадочные тела различной формы, существенно влияющие на производительность аппарата.

На данный момент существует большое количество исследований и научных работ по определению оптимальной конструкции насадочных тел, обеспечивающих высокую эффективность процесса разделения и при этом имеющих конечную невысокую стоимость насадки. И, хотя, предложены конструктивные исполнения насадочных тел, многие из них показали низкую эффективность, либо высокую эффективность вкупе с их высокой отпускной стоимостью. Также постоянный рост объемов производства являются причинами для дальнейших исследований абсорбционного оборудования с целью повышения их производительности. В связи с вышеописанным, в данной выпускной квалификационной работе стоит задача разработки лабораторного стенда для исследования процесса абсорбции в насадочной колонне и выполнение первичных испытаний для выявления общих закономерностей в различных режимах работы установки.

1 ХАРАКТЕРИСТИКА ВОПРОСА ПО ЛИТЕРАТУРНЫМ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ДАННЫМ. ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Описание абсорбционного оборудования и области его применения

Как уже было отражено во введении, абсорбцией называется процесс поглощения газа жидкостью, соответственно, участвуют две фазы – жидкая и газовая. Таким образом, абсорбция является одним из видов процессов массопередачи. Абсорбция протекает на поверхности раздела фаз, поэтому абсорберы должны иметь развитую поверхность соприкосновения между жидкостью и газом. Способов создания поверхности контакта фаз существует большое множество. По данному признаку большинство из них можно разделить на три основные группы [1]:

- поверхностные абсорберы, в которых поверхностью контакта между фазами является зеркало жидкости (собственно поверхностные абсорберы) или поверхность текущей пленки жидкости (пленочные абсорберы). К этой же группе относятся насадочные абсорберы, в которых жидкость стекает по поверхности загруженной в абсорбер насадки из тел различной формы (кольца, кусковой материал и т.д.), и механические пленочные абсорберы (с. 321). Для поверхностных абсорберов поверхность контакта определяется геометрической поверхностью элементов абсорбера (например, насадки), хотя во многих случаях и не равна ей;
- барботажные абсорберы, в которых поверхность контакта развивается потоками газа, распределяющегося в жидкости в виде пузырьков и струек. Такое движение газа (барботаж) осуществляется путем пропускания его через заполненный жидкостью аппарат (сплошной барботаж) либо в аппаратах колонного типа с различного типа тарелками. Подобный характер взаимодействия газа и жидкости наблюдается также в насадочных абсорберах с затопленной насадкой. В эту же группу входят барботажные абсорберы с перемешиванием жидкости механическими мешалками. В барботажных абсорберах поверхность контакта определяется гидродинамическим режимом (расходами газа и жидкости).
- распыливающие абсорберы, в которых поверхность контакта образуется путем распыления жидкости в массе газа на мелкие капли. Поверхность контакта определяется гидродинамическим режимом (расходом жидкости). К этой группе относятся абсорберы, в которых распыление жидкости производится форсунками (форсуночные, или полые, абсорберы), в токе движущегося с большой скоростью газа (скоростные прямоточные распыливающие абсорберы) или вращающимися механическими устройствами (механические распыливающие абсорберы).

В настоящее время самыми распространенными типами абсорберов являются тарельчатые и насадочные. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. Насадочные контактные устройства обладают более низким гидравлическим сопротивлением и большей пропускной способностью. В тарельчатых аппаратах движение потоков более организовано и путем совершенствования конструкции тарелок можно достигнуть их достаточно высокой эффективности. Высокая эффективность может быть достигнута и в насадочных аппаратах путем уменьшения размера насадки. Однако при этом в равной степени снижается пропускная способность, и увеличивается гидравлическое сопротивление [1]. Стремление к созданию аппаратов большой единичной мощности с повышенными нагрузками по газу и жидкости, обусловило в последние годы тенденцию к возрастанию использования насадочных контактных устройств. Насадочные колонны с высокоэффективной и сравнительно недорогой насыпной насадкой при правильной организации в них гидродинамического режима во многих случаях могут оказаться значительно более экономичными, чем тарельчатые колонны [1, 4].

Одной из основных причин роста актуальности разработок в области насадочного абсорбционного оборудования является постоянное увеличение парниковых газов, особенно CO_2. Диоксид углерода, сероводород создают условия для коррозии металлов, отравляют катализаторы, снижая эффективность процессов. В настоящее время в промышленной практике применяются в основном три метода очистки газа от CO_2: водная, щелочная ($NaOH$ или Na_2CO_3) и моноэтаноламиновая. [2]

Самым перспективным методом очистки от CO_2 является процесс моноэтаноламиновой очистки.

1.2 Описание разрабатываемой технологии и ее развитие. Методы модернизации

Разрабатываемая технология данного стенда будет основана на процессе моноэтаноламиновой очистки. Процесс аминовой очистки широко применяют в нефтегазовой промышленности. Водные растворы этаноламинов позволяют очистить газ от сероводорода, углекислого газа и частично от меркаптанов и других соединений серы. В зависимости от технологической необходимости возможно использование этаноламинов с различными свойствами [3].

Для достижения высокой степени очистки применяют раствор МЭА, так как он обладает значительной поглотительной способностью (даже при низком давлении), и в этом основные преимущества данного процесса. Предпочтительность МЭА вызвана также его низкой стоимостью, высокой реакционной способностью, стабильностью, легкостью регенерации. Очистка водным раствором МЭА имеет и существенные недостатки, одним из которых является большой расход тепла и охлаждающей воды на регенерацию раствора, что обусловлено значительной теплотой реакции взаимодействия

CO_2 и H_2S с раствором и существенным температурным перепадом между процессом абсорбции и регенерации [2].

Использование МЭА очистки позволяет одновременно освобождать синтез – газ от сероводорода и углекислоты. Сероводород, выделяемый при десорбции насыщенного раствора моноэтаноламина, может служить сырьем для производства серной кислоты [5].

На рисунке 1.1 [6, рис.2.44] показана основная однопоточная схема абсорбционной очистки CO_2 растворами этаноламинов.

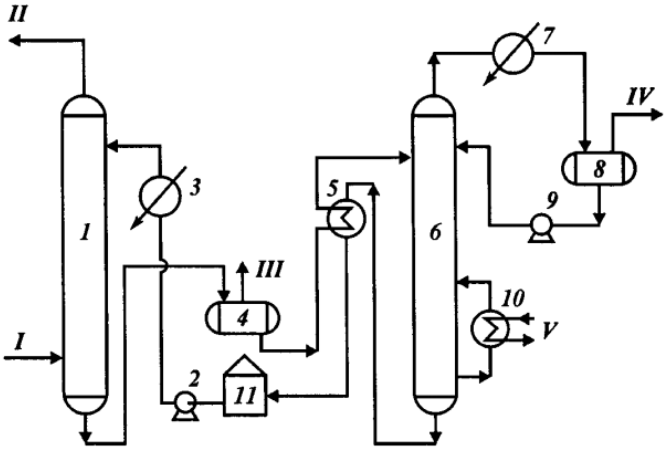


Рисунок 1.1 – Схема абсорбционной однопоточной очистки газа растворами этаноламинов

I – газ на очистку; II – очищенный газ; III – экспанзерный газ; IV – кислый газ; V – водяной пар; 1 – абсорбер; 2,9 – насосы; 3, 7 – холодильники; 4 – экспанзер; 5 – теплообменник; 6 – десорбер; 8 – сепаратор; 10 – кипятильник; 11 – емкость регенерированного амина

Одно из основных ограничений технологии поглощения CO_2 аминами – это высокие затраты проведения процесса. Минимизация затрат может быть достигнута путем использования новых растворителей и/или оптимизации технологической схемы процесса и/или его интеграции с силовой установкой.

Одним из таких вариантов оптимизации является тепловая рекуперация. Рекуперация тепла – это процесс отбора и нагрева вещества с помощью теплопередачи (рисунок 1.4). Основная идея тепловой рекуперации состоит в том, чтобы выполнить интеграцию тепла между различными технологическими потоками, уменьшить потери тепла. Основной идеей является отвод части поглотителя после насадочных секций, охлаждение и подача на орошение.

На данный момент было выделено 6 основных способов интенсификации процесса абсорбции, которые опишем ниже [7].

1. Абсорбер с промежуточным охлаждением. Общий принцип данного способа заключается в отводе части растворителя из абсорбера, охлаждении растворителя и его дальнейшей отправке обратно в аппарат (рисунок 1.2). Это хорошо известный метод, широко применяемый в промышленности и различными исследователями. Эта система позволяет сместить термодинамическое равновесие газ – жидкость и, следовательно, увеличить

нагрузку на нижнюю часть абсорбера. Это снижает расход растворителя, необходимый для поглощения заданного количества CO_2, и тем самым приводит к снижению потребности ребойлера в паре. Однако более низкие температуры приводят к незначительному снижению химической кинетики и диффузии; это в основном компенсируется дополнительной растворимостью CO_2 в пленке, приводящей к очень небольшому изменению общего коэффициента массопереноса. Как правило, термодинамическая движущая сила увеличивается с понижением температуры, что позволяет уменьшить общую высоту насадки. Следовательно, низкая загрузка, положения охлаждения, фракции разделения и уровни температуры таких систем должны быть оптимизированы по отношению к выбранному растворителю, и кажется, что эти модификации будут особенно эффективны для низкокинетических растворителей, таких как третичные амины и/или амины.

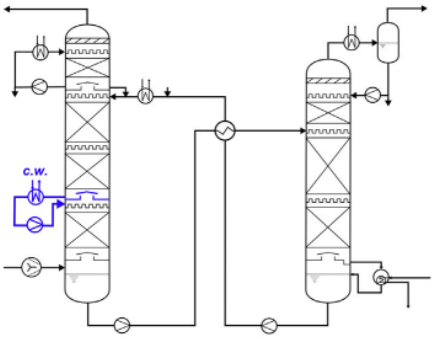


Рисунок 1.2

2. Рециркуляция обогащенного растворителя. Данный способ заключается в отборе части растворителя с уровня абсорбера (включая нижнюю часть абсорбера) и его рециркуляции обратно на верхнем уровне (включая верхнюю часть абсорбера) (рисунок 1.3). Эта модификация обеспечивает увеличенное время контакта между CO_2 и растворителем, увеличивая коэффициент загрузки CO_2 и уменьшая количество растворителя. Чтобы увеличить абсорбционную способность растворителя, насыщенный раствор в нижней части абсорбера можно повторно использовать на различных уровнях абсорбера, увеличивая габаритные размеры абсорбера (диаметр и высоту). Раствор также можно охладить и повторно направить непосредственно в верхнюю часть абсорбера, чтобы выполнить более глубокое удаление кислых газов и снизить выбросы растворителей из-за более низкой температуры растворителя. Эта модификация часто сочетается с промежуточным охлаждением абсорбера для дальнейшей оптимизации загрузки с высоким содержанием растворителя.

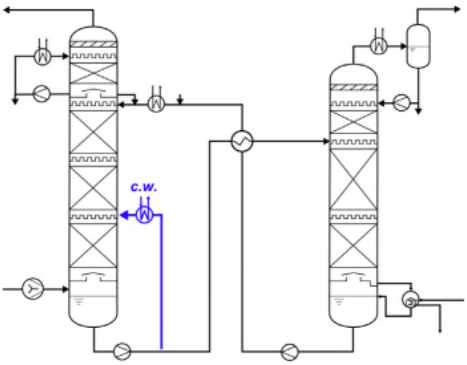


Рисунок 1.3

3. Абсорбер с распределением тепловой нагрузки. В абсорберах с промежуточным подогревом используется та же идея, что и в абсорберах с промежуточным охлаждением. Вместо того, чтобы отдавать предпочтение термодинамике за счет охлаждения растворителя, кинетика увеличивается за счет его нагревания. Кроме того, обедненный растворитель, выходящий из экономайзера, используется для нагрева растворителя вблизи верхней части абсорбера (рисунок 1.4). Идея этого изобретения состоит в том, чтобы улучшить термодинамически управляемый массоперенос в нижней части абсорбера и кинетический массообмен в верхней части абсорбера. Таким образом, эта модификация будет эффективной для такого разделения между секциями абсорбера, управляемыми кинетикой и термодинамикой, такими как первичные амины или активированные растворители. Очень высокая насыщенная нагрузка не кажется реалистичной и, скорее всего, является результатом расчета поглотителя на основе равновесия.

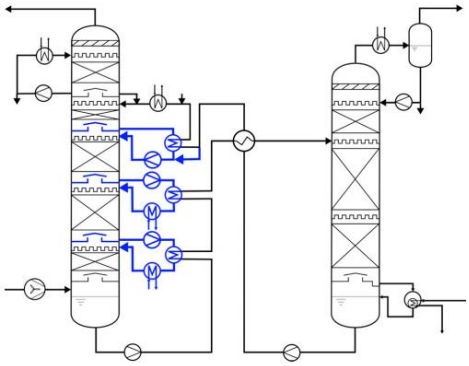


Рисунок 1.4

4. Устройство с разделенным потоком. Изначально было разработано для удаления H_2S, но этот способ применим для улавливания CO_2. Общий принцип состоит в том, чтобы регенерировать растворитель при двух или более коэффициентах загрузки: один поток обедненного растворителя, который подается в верхнюю часть абсорбера, и один или несколько потоков полубедного растворителя, которые подают в среднюю часть абсорбера. (рисунок 1.5). Этот способ был разработан для глубокого удаления кислого газа с целью увеличения движущей силы абсорбции в верхней части

абсорбера. Только часть растворителя полностью регенерируется и обеспечивает необходимую движущую силу для достижения требуемой чистоты. Что касается объемного удаления, эта модификация более полезна для «термодинамически неблагоприятного» растворителя, такого как третичный амин, чем для моноэтаноламина. Также обычно комбинируют устройство с разделенным потоком с разделением насыщенного растворителя. Эту комбинацию модификаций обычно называют расширенным разделенным потоком (на рисунке 1.5 красная пунктирная линия). В этой конфигурации богатый амин, покидающий абсорбер, разделяется на два потока, что позволяет снизить общее потребление технологического пара при сохранении требований к удалению CO_2. Таким образом, у съемника есть две точки подачи. Один поток входит в верхнюю часть отпарной колонны, выходит из средней точки и возвращается в середину абсорбера. Другой разделитель входит в среднюю точку аппарата и выходит из него по направлению к нижней части.

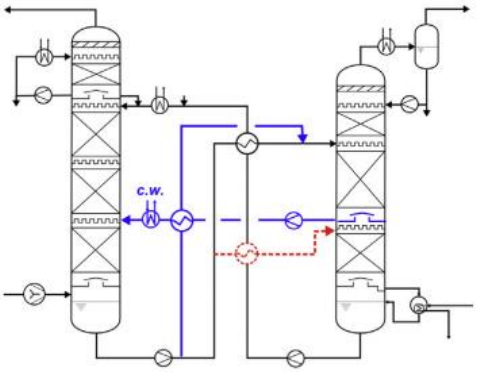


Рисунок 1.5

5. Двойной поглотитель / стриппер. Опять же, эта концепция изначально была разработана для удаления H_2S, но ее можно адаптировать для применения в улавливании CO_2. На рисунке 1.6 показан процесс, основанный на двухконтурном процессе абсорбер-десорбер. Он состоит из абсорбционной колонны, разделенной на 2 секции, как и в процессе с разделенным потоком. Основная часть абсорбции происходит в нижней части, в которую подается частично удаленный растворитель. Растворитель, покидающий абсорбер, затем через теплообменник направляется в первичный отпарной аппарат. Верхняя часть абсорбера используется для доочистки очищенного газа. Растворитель, покидающий эту секцию, регенерируется во вторичной отпарной колонне. Эта модификация процесса аналогична некоторым конфигурациям ОТВС, но ее основная цель - использовать два разных растворителя в двух разных контурах поглотителя. В качестве альтернативы в этом процессе можно использовать только один растворитель и можно обеспечить фракционную регенерацию с помощью двух отпарных колонн. Первичная отпарная корлонна частично регенерирует растворитель, получая обедненный растворитель, типичный для обычных одноконтурных процессов. Основная часть растворителя, выходящего из отпарной колонны,

возвращается в нижнюю часть абсорбера. Лишь небольшая часть растворителя из основной отпарной колонны направляется во вторичную отпарную колонну для дальнейшей отпарки при более высокой температуре, в результате чего получается ультра-обедненный растворитель, который направляется наверх абсорбера.

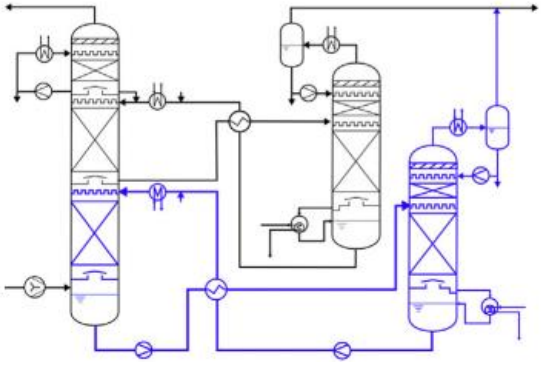


Рисунок 1.6

6. Сжатие и расширение дымовых газов. Цель этой модификации - увеличить движущую силу поглощения и использовать теплоту поглощения для производства энергии (рисунок 1.7). Дымовые газы сжимаются, как правило, до среднего давления (до 3 бар). Это повышает парциальное давление CO_2 и способствует его абсорбции в растворителе. Благодаря этой дополнительной движущей силе можно ожидать более высокой нагрузки или можно использовать менее активный растворитель, оба эти эффекта приводят к уменьшению режима регенерации. Чтобы снизить стоимость сжатия дымовых газов, декарбонизированные дымовые газы расширяются в турбине перед секцией промывки водой. Эти дымовые газы нагреваются в абсорбере за счет экзотермической абсорбции CO_2.

Можно использовать дополнительный источник тепла (например, питательную воду для котла) для повышения температуры дымовых газов перед расширением.

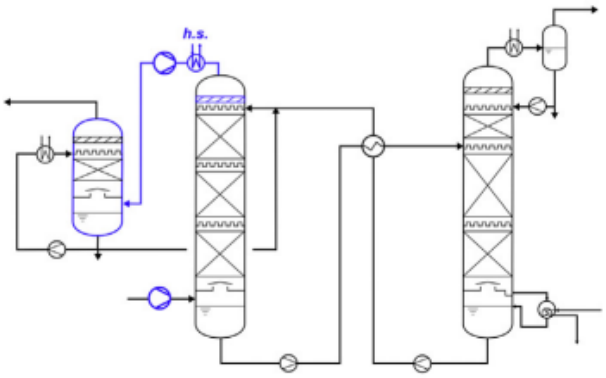


Рисунок 1.7

Массообменные процессы сопровождаются тепловыми эффектами, при этом теплообмен может существенно влиять на ход основного процесса или являться лимитирующей стадией. Наиболее эффективными методом влияния

на температурные условия в оборудовании является использование специальных контактных устройств с внедрением теплообменных элементов. Устройство с теплообменными модулями позволяет поддерживать требуемую температуру в аппарате [8].

Разрабатываемая установка в перспективе будет иметь встроенные теплообменные элементы, такая колонна представлена на рисунке 1.8.

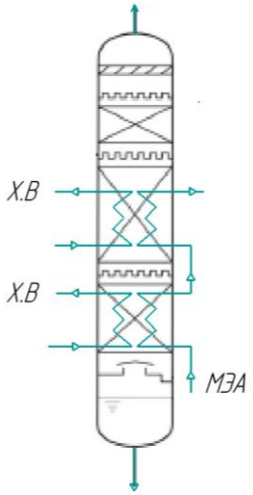


Рисунок 1.8 – Колонна абсорбции со встроенными теплообменными элементами

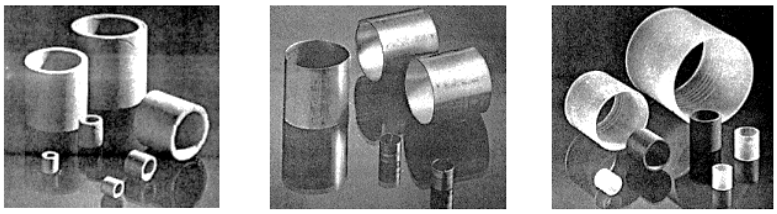
1.3 Литературный обзор конструктивных исполнений насадочных тел и обоснование актуальности исследования

Все насадочные контактные устройства для осуществления тепломассообменных процессов в колонных аппаратах могут быть, согласно [1], разделены на две большие группы.

К первой группе относятся нерегулярные насадки, т. е. контактные устройства, в которых элементы насадки, имеют относительно небольшой размер, загружаются в аппарат внавал, неорганизованно, образуя хаотическую структуру. В результате межнасадочное пространство представляет собой систему каналов (в поперечном сечении аппарата) различной формы и размера. При этом и форма, и размер каждого канала изменяется и по высоте слоя.

Одной из самых первых удачных разработок в данной области стали кольца Рашига – кольца, имеющие высоту, равную их диметру. [1] Кольца изготавливались из керамики, металла, позднее из пластмассы (рисунок 1.9). Наличие внутренней полости существенно увеличило, по сравнению с шарами, геометрическую поверхность и пропускную способность насадки, снизило ее гидравлическое сопротивление и увеличило эффективность. Однако с позиций сегодняшнего дня кольца Рашига обладают существенными недостатками: их внутренняя поверхность недостаточно хорошо омывается жидкостью. Особенно это касается той части колец, которые в насадочном

слое занимают горизонтальное или близкое к нему положение, а доля таких значительна. Эти обстоятельства приводят к потере эффективности. Несмотря на это кольца Рашига продолжают использоваться в промышленной практике и в настоящее время благодаря простоте изготовления, а значит и невысокой их стоимости. Возможно и в тех случаях, когда нет требований большой эффективности насадки.



а б в

Рисунок 1.9 – Кольца Рашига

а – керамические, б – металлические; в – пластмассовые

Ещё одним вариантом насадки являются кольца Палля [4] (рисунок 1.10). Для дальнейшего улучшения показателей кольцевых насадок очень важным явилось нанесение перфорации, что улучшает омывание внутренней поверхности колец, как жидкостью, так и газом и улучшает как гидродинамические показатели, так и эффективность. Но перфорация сама по себе неминуемо снижает удельную поверхность насадки, что нежелательно. В конструкции колец Палля этого удалось избежать [9]. Эти кольца имеют прямоугольную перфорацию, а образовавшиеся в результате перфорации язычки, отогнуты вовнутрь кольца. Таким образом, с одной стороны сохранилась удельная поверхность, с другой стороны язычки способствуют лучшему перемешиванию потоков внутри кольца и на турбулизации. В результате существенно улучшились все показатели по сравнению с кольцами Рашига: эффективность увеличилась на 25%, гидравлическое сопротивление снизилось на 37% [1].

Рисунок 1.10 – Кольца Палля

Вскоре после появления колец Палля различными фирмами стали разрабатываться их разновидности. Они различаются размером и месторасположением перфорации, формой язычков (плоские или искривленные), формой самой перфорации. На рисунке 1.11 приводятся некоторые из разновидностей металлических колец Палля. Согласно [10], наибольшую популярность из современных конструкций получили насадки

Hi-Pack - кольца с двумя рядами прямоугольных отверстий с разрезанными пополам и отогнутыми внутрь лепестками, кольца MiniRings − кольца с одним рядом прямоугольных отверстий с отогнутыми внутрь лепестками.

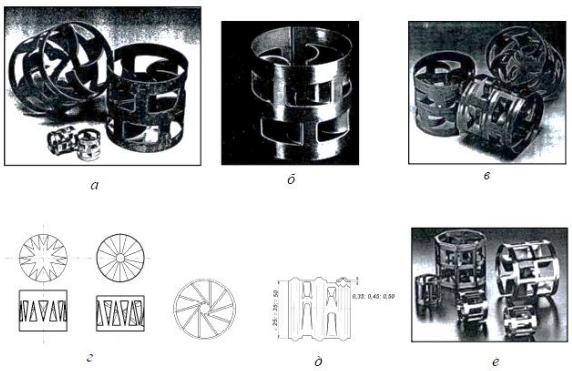


Рисунок 1.11 – Разновидности колец Палля
а – кольца «Flexiring», б – кольцо «Hi-Pack», в - кольца «K-Pack»,
г – кольца Белецкого, д – кольца Germania, е – кольца Hiflow

Большим успехом в совершенствовании нерегулярных массообменных насадок было создание насадок небольшой высоты (кольца) [1]. В настоящее время известен ряд конструкций металлических миникольцевых насадок, отличающихся одним или двумя рядами прямоугольной перфорации, дополнительной перфорацией, мелкими круглыми отверстиями на корпусе и на отогнутых лепестках, одной или двумя отбортовками по концам насадочного элемента, количеством (двумя или тремя) вдавленных полос. Ряд конструкций миникольцевых насадок изготавливается из пластмасс. Некоторые конструкции металлических миникольцевых насадок представлены на рисунке 1.12.

Главным структурным свойством миникольцевых насадок является их способность к самоориентации в пространстве колонного аппарата при загрузке внавал. В отличие от кольцевых насадок с высотой равной диаметру, 60% которых при загрузке внавал преимущественно укладываются горизонтально [1,16], горизонтальную позицию занимают значительно больший процент миниколец [1]. Высокая степень омывания поверхности элементов жидкостью способствует высокой эффективности миникольцевых насадок, превосходящей по эффективности кольцевые насадки типа колец Палля [4]. Единственным недостатком миниколец является большое количество насадочных элементов в единице объема, что, естественно, ведет к удорожанию изготовления 1 м^3 насадки.

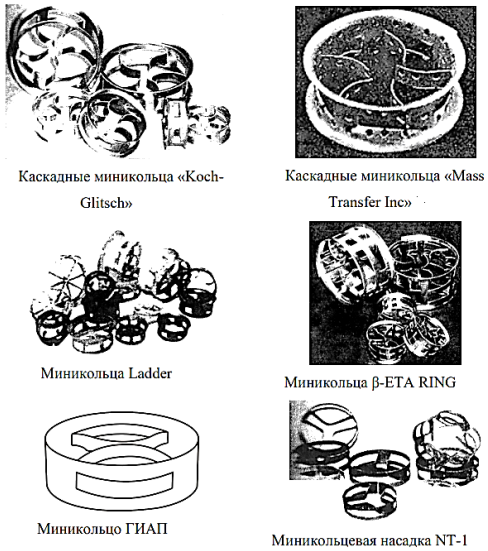
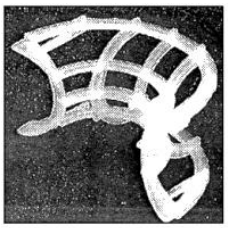


Рисунок 1.12 – Миникольцевые насадки

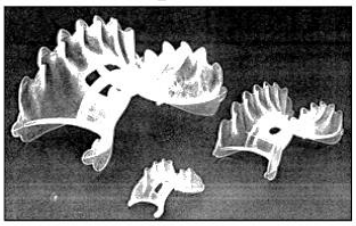
Особую группу составляют седлообразные насадки [1]. Первоначально эти насадки изготавливались из керамики. Это седла Берля и Инталокс. Хотя элементы этих насадок не имеют внутренней полости, благодаря особенности формы их поверхность лучше смачивается, чем поверхность колец Рашига, и потому их эффективность выше последних при достаточно высоком гидравлическом сопротивлении и соответственно невысоких предельных нагрузках по газу.

Седлообразные насадки из пластмасс (см. рисунок 1.13) различаются формой гребешков по краям элементов, размером, формой и месторасположением перфорации, впадин и выступов. Преимуществом их по сравнению с керамическими седлами является большая пропускная способность и меньшее гидравлическое сопротивление [1]. Также существенно более низкий удельный вес. Использование седел из пластмасс ограничено условиями коррозии и температурным режимом.

Металлические седлообразные насадки имеют форму полукольца с прямоугольной перфорацией и лепестками, отогнутыми вовнутрь (насадка Лева) или лепестками с разрезанными концами и выдавленными дугами (насадка IMTP). Некоторые конструкции имеют дуги, выдавленные в разные стороны (см. рисунок 1.14). Наиболее высокие показатели имеют насадки Лева, «Инжехим 2002» и IMTP [1,11].



2



3

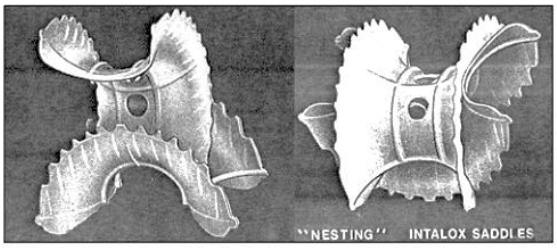
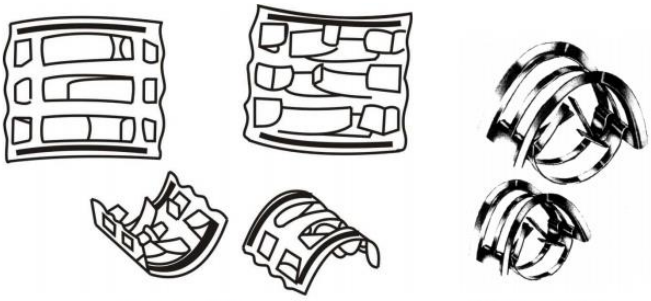
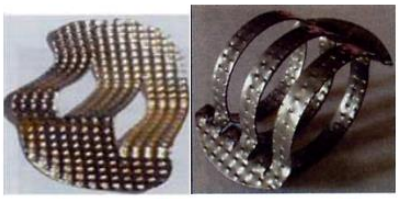


Рисунок 1.13 – Полимерные насадки в виде седел
1 – седло Хифлоу, 2 – седла Суперторус; 3 – седла Суперинталокс



Насадка Лева Насадка IMTP



а - «Инжехим 2000», б - «Инжехим 2002»

Рисунок 1.14 – Металлические насадки

Помимо рассмотренных выше видов нерегулярных насадок известны ряд конструкций насадок иной формы, изготавливаемых из металла или полимерного материала (см. рисунок 1.15). Некоторые из них отличаются сложностью изготовления, практически все они уступают по своим показателям кольцам, миникольцам и седлообразным насадкам, и потому их использование весьма ограничено [1,12].

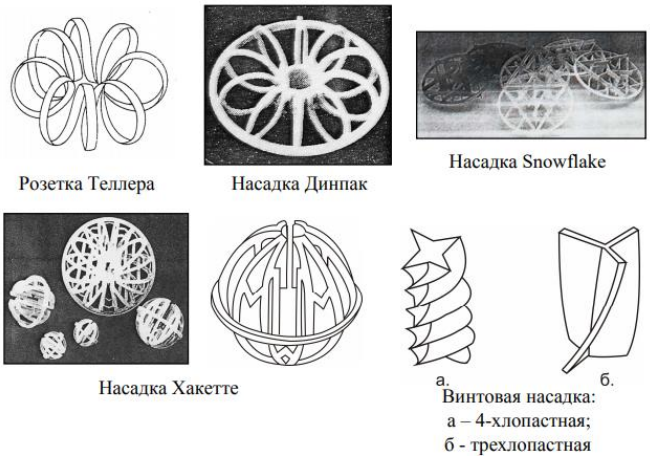


Рисунок 1.15 – Нерегулярные насадки различной формы

Вторую группу насадок составляют регулярные насадки, установленные упорядоченно по всей высоте колонны [1]. Это дает регулярным насадкам ряд преимуществ по сравнению с нерегулярными: отсутствуют застойные зоны жидкости в местах контакта элементов нерегулярной насадки, не участвующие в процессе массообмена. То есть существует теоретическая возможность 100% смачивания поверхности насадки жидкостью. Наличие каналов правильной формы способствует более низкому гидравлическому сопротивлению в расчете на единицу высоты насадочного слоя и большую пропускную способность. В настоящее время известно несколько десятков различных конструкций регулярных насадок. Они изготавливаются из различных материалов: керамики, полимерных материалов, металлов (просечно-вытяжного или гладкого листа).

По своему основному конструктивному признаку регулярные насадки могут быть разделены на несколько групп. Наиболее многочисленной группой являются так называемые плоско – параллельные насадки, представляющие собой установленные параллельно друг другу с определенным дистанционированием вертикальные листы (рисунок 1.16) [13].

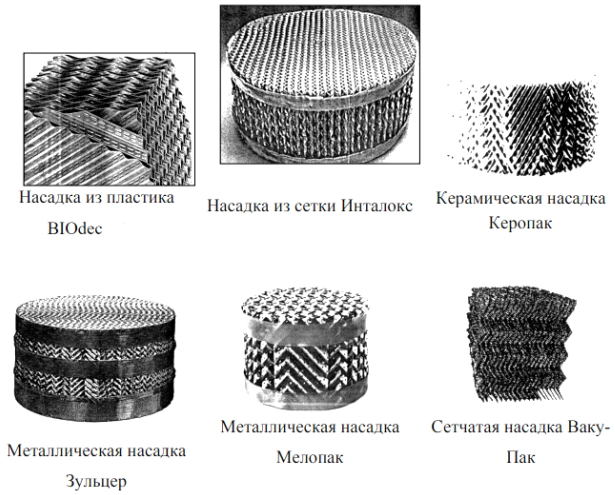


Рисунок 1.16 – Плоско – параллельные насадки

В настоящее время используется различное расположение гофр (под разными углами к оси аппарата), а также чередование углов наклона гофр в соседних рядах. Используется также такой прием, как создание на поверхности листов макрошероховатостей путем комбинации выступов и впадин, что способствует дополнительной турбулизации жидкости.

Однако упомянутые конструкции регулярных насадок имели недостаток, связанный с начальным распределением жидкости [1]. Для обеспечения эффективной работы насадки требовалось организовать подачу жидкости таким образом, чтобы в каждом канале на единицу площади его поперечного сечения приходилось равное ее количество. Чтобы преодолеть эти трудности стали изготавливать насадки из просечено-вытяжного листа, перфорировать листы, что ликвидировало замкнутость каналов, сделало возможным переток фаз между соседними каналами. Это также способствовало увеличению эффективности в результате поперечного перемешивания.

Другой значительной группой регулярных насадок являются рулонные насадки (см. рисунок 1.17) [14].

Рисунок 1.17 – Рулонные насадки

Как и плоскопараллельные насадки, они в основном изготавливаются из металла и полимерного материала. Используются упомянутые выше приемы как гофрирование и перфорация полосы. Большей частью они изготавливаются из сетки. Рулонные насадки более удобны, чем плоскопараллельные для монтажа в колоннах, особенно большого диаметра. Более плотно укладываются вблизи стен аппарата, то есть снижается негативный стенный эффект [1].

Особую группу составляют решетчатые насадки (рисунок 1.18), которые используются в основном с целью охлаждения газа в скрубберах. Они имеют объемную структуру. Легко монтируются из собранных заранее больших блоков.

Рисунок 1.18 – Регулярные решетчатые насадки

Значительно меньшее распространение получили блочные насадки (рисунок 1.19) [15]. Они преимущественно изготавливаются из коррозионно стойкой керамики для использования в агрессивных средах. Поскольку блоки не имеют достаточно высокой доли свободного объема, их гидравлическое сопротивление в значительной степени высоко. При укладке блоков в аппараты вблизи стенок образуются байпасные каналы, снижающие эффективность.

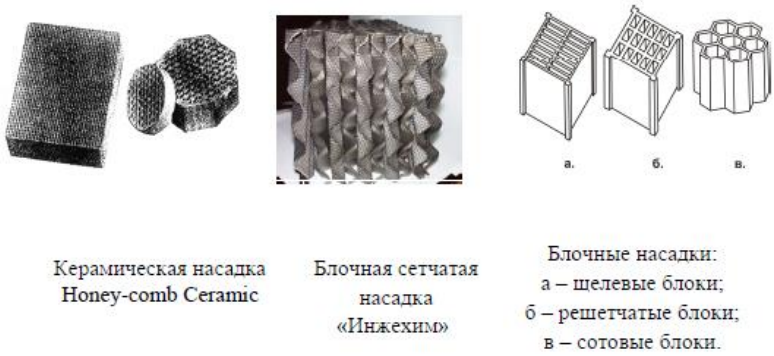


Рисунок 1.19 – Регулярные блочные насадки

Подводя итог по литературному обзору современных разработок в области конструкций насадочных тел для абсорбционного оборудования можно говорить о том, что нынешние разработки являются дальнейшим развитием уже существующих конструктивных исполнений насадочных тел. Отметим тот факт, что на данный момент, несмотря на большое многообразие модификаций насадочных тел, большая часть насадочных абсорберов до сих пор работают с кольцами Рашига, т.к. не всегда предприятия готовы выполнять замену, часто это обусловлено особенностями процесса (например, низкая скорость химической реакции). Анализируя развитие в создании новых конструкций насадочных элементов в последнее время, можно сделать вывод о замедлении прироста показателей, как гидродинамических, так и массообменных.

Данный факт говорит о том, что возросла потребность в насадках с высокими гидравлическими и массообменными характеристиками. Эти причины являются основаниями для разработок новых контактных устройств, а также их проверки и, следовательно, актуальности исследований.

Отметим тот факт, что первичные исследования гидравлических и массообменных характеристик в насадочной колонне абсорбции будут проводиться с кольцами Рашига, поскольку именно они наиболее хорошо изучены в данный момент.

1.4 Технико – экономическое обоснование

Для проведения научных исследований и лабораторных работ на кафедре ТОТС ДПИ НГТУ была спроектирована установка, содержащая колонну абсорбции и десорбции, насосное и теплообменное оборудование, а также контрольно-измерительные приборы. При возможной покупке аналогичного стенда суммарные затраты проведения исследований, включая затраты на оборудование и приборы, составляла бы 1050000 руб. Планируемые затраты на исследования, с самостоятельной разработкой стенда ориентировочно составят 800 000 руб. Тогда выгода (экономия) составит:

$$Э = Ц_1 – Ц_2,$$

$$Э = 1050000 – 804582 = 245418 \text{ руб.}$$

Сэкономленные деньги могут пойти на дальнейшие научные изыскания, совершенствование учебных лабораторий и процесса обучения в целом.

2 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К БЕЗОПАСНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Описание технологической схемы МЭА очистки отходящих газов от CO_2

Технологическая схема процесса извлечения CO_2 приведена на рисунке 2.1. Отфильтрованный атмосферный воздух очищается с помощью фильтра *Ф1*. Пройдя через компрессор *К1*, смешивается в эжекторе *Э1* с двуокисью углерода. Воздух нагревается в трубе преподогревателя *Т1* и подается в газовый скруббер *С1*. В аппарате воздух взаимодействует с водой. Вода подается в верхнюю часть аппарата с помощью насоса *Н1* из емкости *Е1* и распределяется по насадке. Газовый поток контактирует с водой на поверхности насадки, при этом он охлаждается, и влагосодержание потока снижается. Дополнительно водой в реальном технологическом процессе задерживаются частицы сажи. Скруббер включен в схему для достижения тех же параметров, что характерны для реального технологического процесса. Нагретая вода отводится из нижней части скруббера в емкость *Е1*, затем охлаждается в выносном холодильнике *Т2* и снова подается в колонну. Дымовые газы после слоя насадки проходят через каплеотбойник, предотвращающий унос воды из аппарата и уходят на стадию абсорбции.

Основная часть колонны абсорбции *К2* работает на поглощение CO_2 из отходящих газов. Газ, обогащенный CO_2, подается в аппарат снизу. Затем, распределяясь по сечению колонны, попадает в промывную часть. На орошение промывной части подается вода из емкости *Е2* насосом *Н2*. Проходя слой насадки и каплеотбойник, газ выходит из колонны. Раствор МЭА подается в аппарат через распределитель. Жидкий, насыщенный диоксидом углерода раствор МЭА выходит из нижней части абсорбера. Насос богатого моноэтаноламина *Н4* подаёт смесь в рекуператор тепла *Т4*.

Часть жидкости поступает в абсорбер *К2* со стадии промывки углекислого газа из водяного скруббера *С2*, и служит для компенсации потерь воды, захватываемой газовым потоком. Для поддержания оптимального температурного режима, жидкость после секции промывки отводится из аппарата, охлаждается в теплообменнике *Т2* и снова возвращается в аппарат. Циркуляцию по данному контуру осуществляет насос.

Раствор богатого (насыщенного CO_2) МЭА подается в десорбер *К3* через распределитель *Т4*. Из нижней части десорбера часть МЭА выходит и стекает в ребойлер *Т5*, его используют в качестве подогревателя низа колонны. Из ребойлера парожидкостная смесь поступает в нижнюю часть колонны. В колонне поток разделяется на парогазовую смесь, (содержащую CO_2, пары воды и МЭА) и на обедненный МЭА. Парогазовая смесь проходит через слой насадки, контактируя со стекающим насыщенным МЭА. При взаимодействии происходит разогрев МЭА и разложение комплексов карбонатных солей, химически связывающих углекислоту.

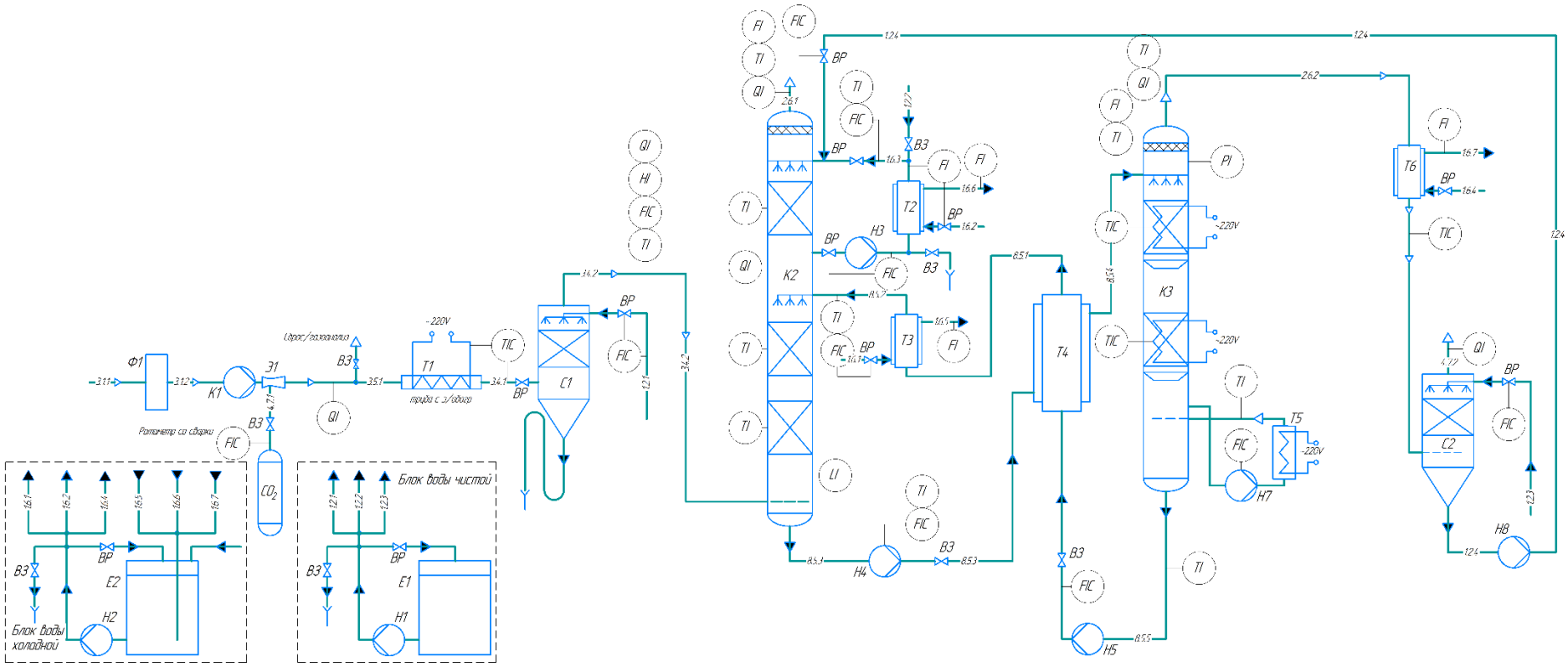


Рисунок 2.1 – Технологическая схема:

Е1 – емкость для холодной воды; *Е2* – емкость для деионизированной воды; *К1* – компрессор; *К2* – абсорбер; *К3* – десорбер; *С1* – газовый скруббер; *С2* – водяной скруббер; *Т1* – подогреватель входящего газа; *Т2* – холодильник воды; *Т3* – холодильник МЭА; *Т4* – поточный рекуператор; *Т5* – ребойлер; *Т6* – холодильник CO_2 конденсатор; *Т7* – водный холодильник; *Ф* – пылевой фильтр; *Н1*, *Н2*, *Н3*, *Н6* – циркуляционные насосы воды; *Н4* – насос богатого МЭА; *Н5* – насос бедного МЭА; *Н7* – насос МЭА в ребойлер; *Н8*, *Н9* – насосы воды; *Э1* – эжектор.

Из парогазового потока конденсируется водяной пар и МЭА. CO_2, пары воды и МЭА выходят из верхней части колонны. Обедненный МЭА удаляется из кубовой части колонны. Насосом *Н5* регенерированный МЭА подается в поточный рекуператор *Т4*, где охлаждается, нагревая жидкий насыщенный диоксидом углерода раствор МЭА из абсорбера. После теплообмена раствор МЭА подается на орошение в колонну абсорбции.

Скруббер *С2* охлаждает выходящую из колонны паро – газовую смесь и конденсирует пары воды из них. Кроме этого, скруббер позволяет уловить в циркулирующем потоке воды пары МЭА.

Паро – газовая смесь, содержащая CO_2, воду, МЭА после охлаждения на стадии сорбции *Т6* подается в нижнюю часть скруббера. Вода подается в колонну насосом *Н1* из емкости *Е1* и распределяется по насадке. Паро – газовый поток контактирует с водой на поверхности насадки, при этом он охлаждается и часть паров (воды и МЭА) конденсируется. Нагретая вода отводится из нижней части скруббера, затем возвращается *Н8* в узел сорбции (подается на орошение в абсорбер). Газ (CO_2), содержащий пары поглотителя, после слоя насадки в колонне дополнительно проходит через каплеотбойник, предотвращающий унос капель воды из аппарата и подается на стадию сжатия и сжижения углекислоты.

2.2 Принципиальная схема лабораторной установки для исследования процесса абсорбции

Основной задачей эксперимента является исследование гидравлических и массообменных характеристик насадочной колонны. Для исследования используется экспериментальный стенд. Первым этапом разработки лабораторного стенда для извлечения CO_2 стала колонна абсорбции, царги которой изготовлены из органического стекла. Далее установка будет модернизирована, поскольку для начала необходимо определить характеристики работы аппарата. Будут использованы безопасные и доступные среды – вода, воздух. Для дальнейшей работы с опасными средами царги можно будет заменить на металлические трубы, и колонна легко продолжит свою работу.

Принципиальная схема лабораторного стенда для проведения эксперимента приведена на рисунке 2.2. Оборудование установки включает: вентилятор, насос, насадочную колонну.

Для проведения исследований по определению гидравлических и массообменных характеристик используется лабораторная насадочная колонна *5* диаметром 200 мм. В колонну засыпаны керамические кольца Рашига.

Исследования будут проводиться на средах – воздух и вода. Воздух из помещения лаборатории засасывается вентилятором *3* и подается в кубовую часть лабораторной колонны *5*. Расход воздуха регулируется симисторным регулятором, расположенным на щите. Перед входом в колонну *5* установлен

прибор, с помощью которого измеряется значение расхода воздуха. Верхняя часть колонны имеет крышку, через штуцер которой выходит воздух.

Подача жидкости в колонну организована по замкнутому контуру. Из бака *1*, с помощью центробежного насоса *2* вода подается в трубопровод. Значение расхода воды контролируется ротаметром *6* и вручную регулируется вентилем. Вода поступает в верхнюю часть колонны *5*, распределяется по насадке и контактируя с воздухом движется сверху вниз.

Отработанная вода удаляется из кубовой части колонны через штуцер и по трубопроводу возвращается в бак *1*.

Для контроля уровня жидкости в кубовой части колонны установлена уровнемерная колонка из гибкого шланга. В состав установки также включены средства измерения относительной влажности воздуха, перепада давления на слое насадки и температуры сред. Управление электрооборудованием осуществляется со щита КИПиА.

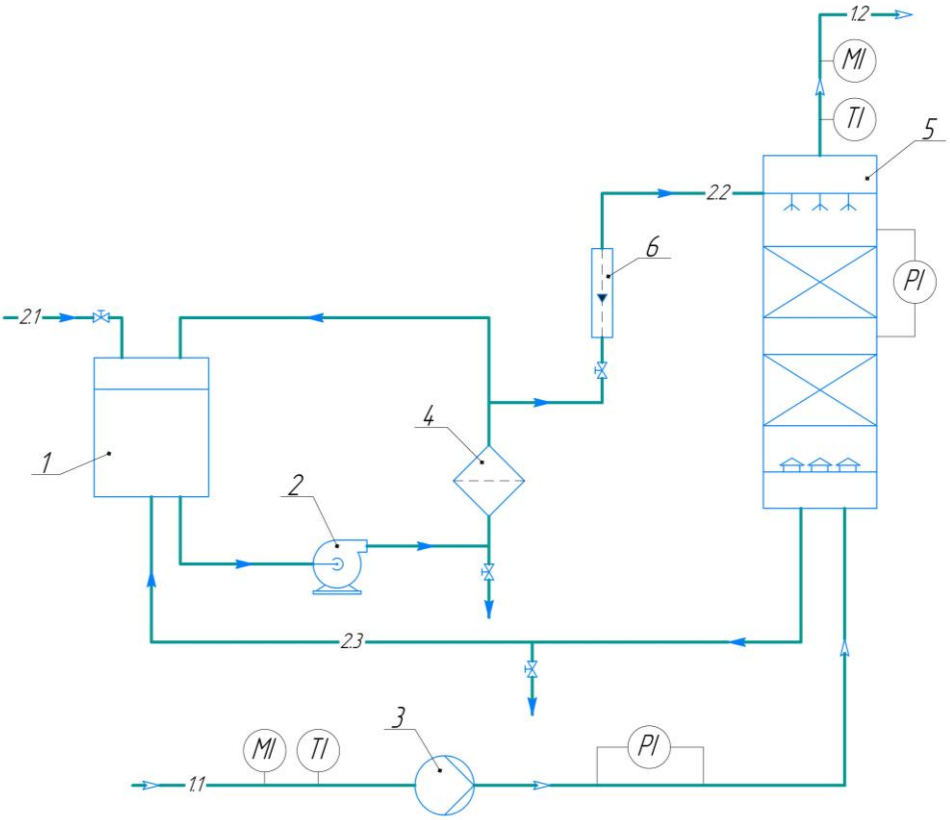


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема лабораторной установки:
1 – бак; 2 – насос; 3 – вентилятор; 4 – фильтр; 5 – насадочная колонна; 6 – ротаметр; потоки в системе: 1.1 – подача воздуха в кубовую часть колонны; 1.2 – выход воздуха из колонны; 2.1 – подача воды в бак; 2.2 – подача воды на орошение; 2.3 – поток отработанной воды в бак; *PI* – датчик контроля давления; *TI* – датчик контроля температуры; *MI* – датчик контроля влажности.

Для измерения расхода воды используется ротаметр *6* - РМФ-0.4 ЖУЗ для умеренного климата. Он предназначается для измерения стабильных или плавно меняющихся (не пульсирующих) потоков, не кристаллизирующихся

жидкостей и газов, нейтральных относительно стекла, фторопласта-4, и уплотнительной набивки ФУМ-В.

Расход воздуха регулируется симисторным регулятором, расположенным на щите КИПиА и контролируется с помощью пульта, соединенного с помощью гибкого шланга с крестовиной, расположенной внутри фланца на входе в колонну.

Контролируемые параметры приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Перечень контролируемых параметров процесса

Местоположение	Измеряемый параметр	
	Наименование	Размерность
Перед входом в вентилятор	Температура воздуха	ºС
	Относительная влажность воздуха	%
Трубопровод водяной перед входом в колонну	Расход воды	м³/ч
Трубопровод газовый перед входом в колонну	Статический напор	см.вод.ст
	Динамический напор	см.вод.ст
Выход из колонны	Относительная влажность воздуха	%
	Температура воздуха	ºС
Слой насадки колонны	Перепад давления	мм. вод. ст.

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

По перепаду статических давлений до и после слоя насадки определялось гидравлическое сопротивление с помощью наклонного микроманометра ММН-240. Для определения температур потоков использовались лабораторные термометры ТЛ-4 со шкалой 0...55°С и ценой деления 0,1°С.

Для определения относительной влажности воздуха применяется психрометр, состоящий влажного и сухого термометров ТЛ-4 со шкалой 0–50°С и ценой деления 0.1°С.

2.3 Оборудование и приборы лабораторного стенда

Для проведения экспериментов используется насадочный абсорбер, который представляет собой колонну диаметром 200 мм (рисунок 2.3), загруженную насадкой – кольца Рашига 25х25х5 (рисунок 2.4). Соприкосновение газа и жидкости происходит на смоченной поверхности насадки, по которой стекает орошающая жидкость.

В процессе работы газ поступает в кубовую часть через штуцер *А*, проходя через распределитель газа *6*. Устройство гасит высокоскоростную струю воздуха, выходящего из подводящего трубопровода, и распределяет газ по сечению колонны для равномерного входа в слой насадки. Проходя через слой насадки газ выходит из аппарата сверху через штуцер *Б*.

Жидкость поступает сверху по трубопроводу и попадает в распределитель жидкости *5* (через штуцер *В*). Далее, проходит через слой насадки, попадет на перераспределитель и проходя еще один слой насадки уходит через штуцер *Г*. Колонна опирается на металлическую конструкцию.

К насосно – компрессорному оборудованию, обеспечивающему подачу жидкой и газовой фаз, относятся вихревой насос типа ВК-1/16 и вентилятор радиальный ВР- 80-75.

Основные характеристики вихревого насоса типа ВК-1/16:

- расход Q = 3,6 $м^3$/ч;
- напор H = 16 м;
- мощность N = 1,2 кВт;
- частота вращения рабочего колеса n = 1450 об/мин.
- электродвигатель 4АМА80В2ЖУ2.

Радиальный вентилятор ВР 80-75 может перемещать воздух с температурой до 200 ^{o}С. Основным рабочим органом вентилятора является колесо с большим числом лопаток, загнутых назад для создания большего напора.

Основные характеристики вентилятора:

- мощность N = 0,3 кВт;
- частота вращения n = 1500 об/мин;
- тип электродвигателя – П-11.

Абсорбер способен работать с разными нагрузками по газу и жидкости, что позволяет в ходе лабораторных исследований задавать различные параметры процесса.

В ходе исследований и дальнейшего расчета требуется точное определение параметров процесса, ведь именно от них зависит результат эксперимента и сложность обработки полученных значений. В этом помогает подбор и реализация на опытной установке контрольно-измерительных приборов.

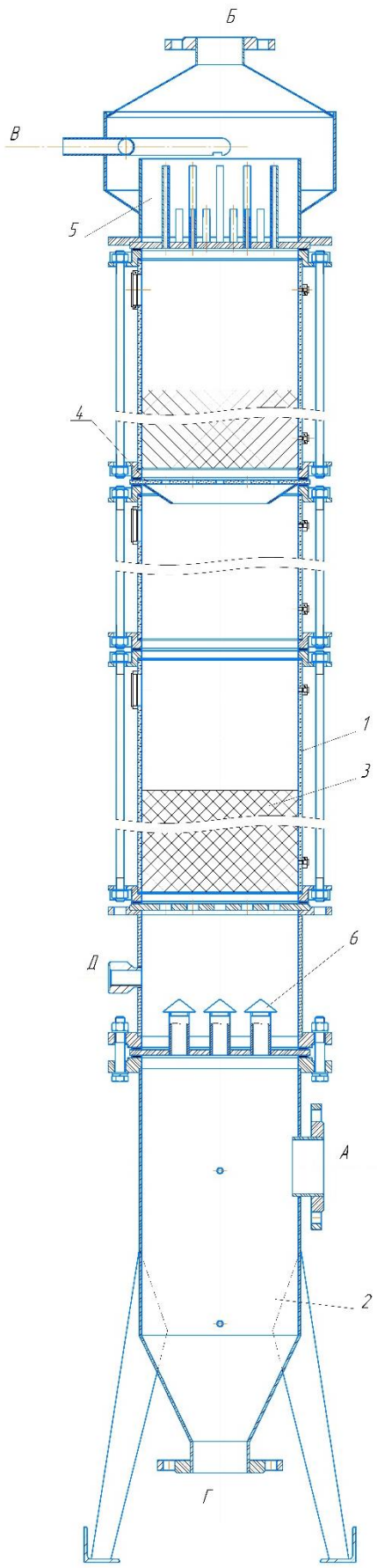


Рисунок 2.3 – Лабораторная колонна абсорбции:
1 – царга; 2 – кубовая часть колонны; 3 – слой насадки; 4 – опорная решетка (перераспределитель); 5 – распределитель жидкости; 6 – распределитель газа.

Рисунок 2.4 – Насадка кольца Рашига

Для изменения расхода воды задействован вентиль, воздуха – симисторный регулятор. Регулирование расходов рабочих фаз осуществляется вручную. В связи с этим стоит отметить, что операции, проводимые на лабораторной установке, сопровождаются незначительными затратами труда. Для работы на установке задействуется 2÷3 человека, поэтому обеспечивается достаточная степень наблюдения за ходом технологического процесса.

2.4 Конструкционные материалы

Для фланцев, каплеотбойника и кубовой части абсорбционной колонны применяется сталь марки 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-2014. Выбор стали обусловлен коррозионной стойкостью, прочностью, экологичностью, а также её доступностью [17]. Помимо этого, она обладает хорошей формуемостью, вязкостью и высокими механическими характеристиками.

Также данная сталь 12Х18Н10Т хороша для работы с повышенными температурами, при которых работает колонна абсорбции.

Кроме того, в корпусе применяется стекло органическое листовое ГОСТ 10667-90, к преимуществам которого можно отнести низкую стоимость, устойчивость к химическим воздействиям, коррозии.

Крепежные болты используются из углеродистой стали 10 по ГОСТ 1050-2013.

В качестве уплотнителя применяются прокладки из резины ГОСТ 7338-90, которая обеспечивает герметичность и фиксацию фланцевых соединений.

2.5 Методика проведения исследований

Целью проводимых экспериментов было определение зависимости коэффициента массоотдачи от расходов газа и жидкости, скорости газа, также гидравлического сопротивления от скорости газа.

Эксперименты проводили для сухой и орошаемой насадки. Перед проведением испытаний необходимо выполнить промывку систем, а также тарировку ротаметра и прибора для измерения расхода газа.

Для исследования орошаемой насадки работу установки начинаем с заполнения емкости *1* водой (рисунок 2.2) из системы водоснабжения. В первую очередь перед запуском оборудования проверяют все ли вентили закрыты. Выключателем на щите производится пуск насоса *2* и вентилятора *3*. Затем открывают все вентили на пути движения жидкости до колонны. Регулируя подачу газа симисторным регулятором, начинаем продувку колонны *5*. Выставляем требуемый расход газа. По ротаметру *6* вентилем выставляют расход жидкости. Перед началом фиксирования данных эксперимента необходимо, чтобы установка вошла в установившийся режим.

Таким образом, последовательно устанавливаются различные значения расхода жидкости, при этом расход газа увеличивается.

Для исследования гидравлических и массообменных характеристик слоя орошаемой насадки определяемыми являются все параметры, приведенные в таблице 2.1.

После завершения работы с установкой необходимо перекрыть все открытые вентили, выключить насос и вентилятор. Воду необходимо слить, открыв вентиль слива.

2.6 Методика обработки опытных данных

Целями проведенной исследовательской работы являлись:

- проверка работоспособности проектируемого стенда, расчет характеристик, требуемых для дальнейшего расчета и сравнения показателей;
- исследование работы насадочного слоя, выявление закономерностей работы.

Основными этапами научно-исследовательской работы являлись:

- сборка, тестирование лабораторной установки;
- исследование основных характеристик насадочного слоя.

Перед началом экспериментального исследования лабораторного оборудования необходимо провести гидроиспытания, а также тарировку ротаметра и прибора для измерения расхода газа. Далее необходимо провести серию экспериментов для определения гидравлического сопротивления слоя сухой и орошаемой насадки.

2.6.1 Определение гидродинамических характеристик слоя сухой керамической насадки типа кольца Рашига 25х25

Изучение гидродинамических характеристик заключается в измерении гидравлического сопротивления слоя сухой насадки. Измерение потерь давления на сухой насадке осуществляется без подачи воды на орошение.

Был проведен ряд экспериментов, по результатам которых были построены экспериментальные зависимости гидравлического сопротивления слоя от фиктивной скорости газа в колонне. Также был проведен теоретический расчет гидравлического сопротивления слоя сухой насадки.

2.6.1.1 Обработка экспериментальных данных по гидравлическому сопротивлению слоя сухой насадки

Расчет производится по [18].

Результаты измерений по показаниям приборов приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Данные эксперимента на сухой насадке

№	$\Delta H_{дн}$	t_1	t_2	$\Delta p_{сух}$
	см вод. ст.	°С	°С	мм вод. ст.
1	0,55	23,00	26,00	3,00
2	0,7	23,00	25,00	4,50
3	0,85	23,00	24,00	6,50
4	0,95	23,00	23,30	8,00
5	1,2	23,00	23,10	10,50
6	1,35	23,20	22,90	12,50
7	1,55	23,20	22,80	14,50

Обработку экспериментальных данных следует начинать с определения физических характеристик воздуха и воды при средних значениях параметров (давления и температуры).

В связи с тем, что температура воздуха при прохождении колонны изменяется вследствие испарения остаточной влаги с поверхности насадки, следует усреднять значения температур t_1 и t_2:

$$t = (t_1 + t_2)/2 \tag{2.1}$$

$$t = (23 + 26)/2 = 24{,}5°C.$$

Полное давление воздуха в слое насадки составляет:

$$\Pi = B + \Delta p / 2, \tag{2.2}$$

где B – барометрическое давление, равное B = 760 мм рт. ст., Δp – перепад давления в слое насадки, Δp = 10 мм вод. ст. = 0,736 мм рт. ст.,

$$\Pi = 760 + 0{,}736 / 2 = 760{,}368\,\text{мм рт.ст.}$$

Расход воздуха, приведенный к рабочим условиям, составит:

$$V = V_o \frac{TB_o}{T_o \Pi}, \tag{2.3}$$

$$V = 0{,}02008 \frac{297{,}5 \cdot 760}{273 \cdot 760{,}368} = 0{,}0219\,\text{м}^3/\text{с}.$$

Плотность воздуха:

$$\rho_г = \rho_о \frac{T_о \Pi}{T B_о}, \quad (2.4)$$

$$\rho_г = 1{,}293 \frac{273 \cdot 760{,}368}{297{,}5 \cdot 760} = 1{,}187 \text{ кг/м}^3.$$

По расходу газа рассчитываем приведенную к сечению колонны скорость газа:

$$w = V/S, \quad (2.5)$$

где S = 0,0314 м^2 – площадь поперечного сечения лабораторной колонны,

$$w = 0{,}0219/0{,}0314 = 0{,}7 \text{ м/с}.$$

Коэффициент гидравлического сопротивления составит:

$$\zeta = \frac{8 \Delta p_{сух} \varepsilon^3}{a W^2 \rho_г H}, \quad (2.6)$$

где $\Delta p_{сух}$ – перепад давления в слое насадки, H – высота насадочного слоя, H = 0,24 м,

$$\zeta = \frac{8 \cdot 29{,}4 \cdot 0{,}74^3}{200 \cdot 0{,}7^2 \cdot 1{,}187 \cdot 0{,}24} = 3{,}45.$$

Критерий Рейнольдса:

$$\mathrm{Re}_г = 4 w \rho_г / (a \mu_г), \quad (2.7)$$

где $\mu_г$ – динамическая вязкость воздуха при средней температуре газа в колонне, Па·с,

$$\mathrm{Re}_г = 4 \cdot 0{,}7 \cdot 1{,}187 / (200 \cdot 18{,}325 \cdot 10^{-6}) = 902.$$

Результаты расчета для всех экспериментальных точек сводим в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Данные обработки результатов опытов по определению гидравлического сопротивления сухой насадки

ΔH	T	П	V	ρ	w	ζ	Re	μ	$\Delta p_{сух}$	Vo
мм вод.ст.	°С	мм рт. ст.	м^3/с	кг/м^3	м/с			Па·с	мм вод.ст.	нм^3/с
5,50	297,50	760,368	0,0219	1,187	0,70	3,45	902	$18{,}325 \cdot 10^{-6}$	10,00	0,02008
7,00	297,00	760,552	0,0231	1,189	0,74	4,63	956	$18{,}300 \cdot 10^{-6}$	15,00	0,02124
8,50	296,50	760,797	0,0243	1,192	0,77	6,04	1008	$18{,}275 \cdot 10^{-6}$	21,67	0,02237
9,50	296,15	760,981	0,0250	1,193	0,80	6,99	1042	$18{,}258 \cdot 10^{-6}$	26,67	0,023098
12,00	296,05	761,287	0,0269	1,194	0,86	7,92	1122	$18{,}253 \cdot 10^{-6}$	35,00	0,02486
13,50	296,05	761,532	0,0280	1,195	0,89	8,71	1168	$18{,}253 \cdot 10^{-6}$	41,67	0,02588
15,50	296,00	761,778	0,0294	1,195	0,94	9,15	1227	$18{,}250 \cdot 10^{-6}$	48,33	0,02719

По данным таблицы строим графики $\Delta p_{сух} = f(w)$, $\zeta = f(\mathrm{Re})$ (рисунок 2.5, 2.6). График зависимости гидравлического сопротивления от скорости газа строим в логарифмической координатной сетке.

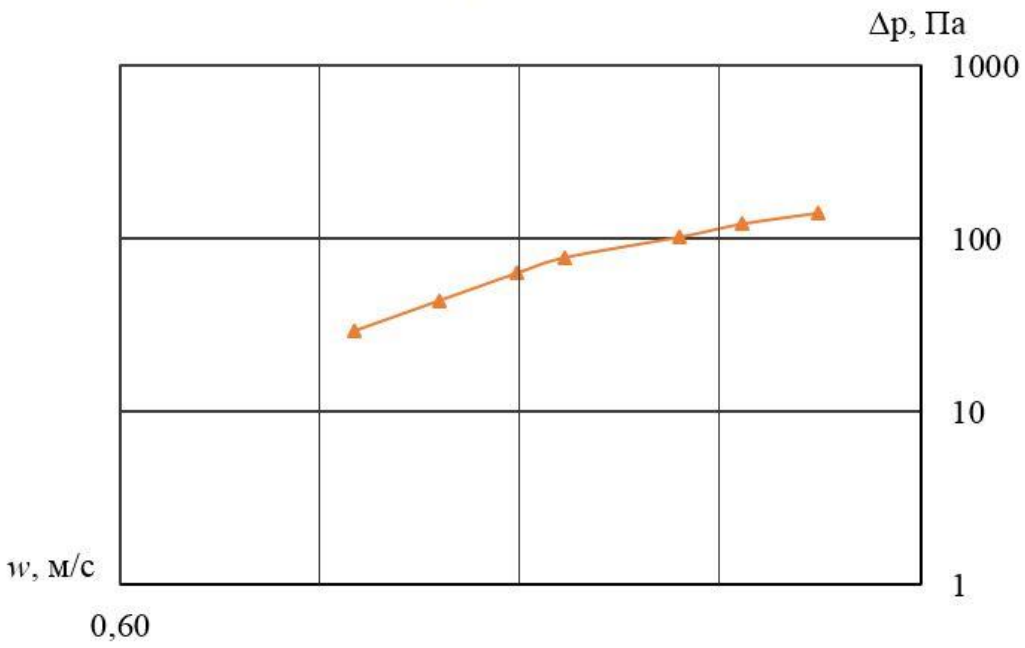


Рисунок 2.5 – Экспериментальная зависимость гидравлического сопротивления сухой насадки от скорости газа

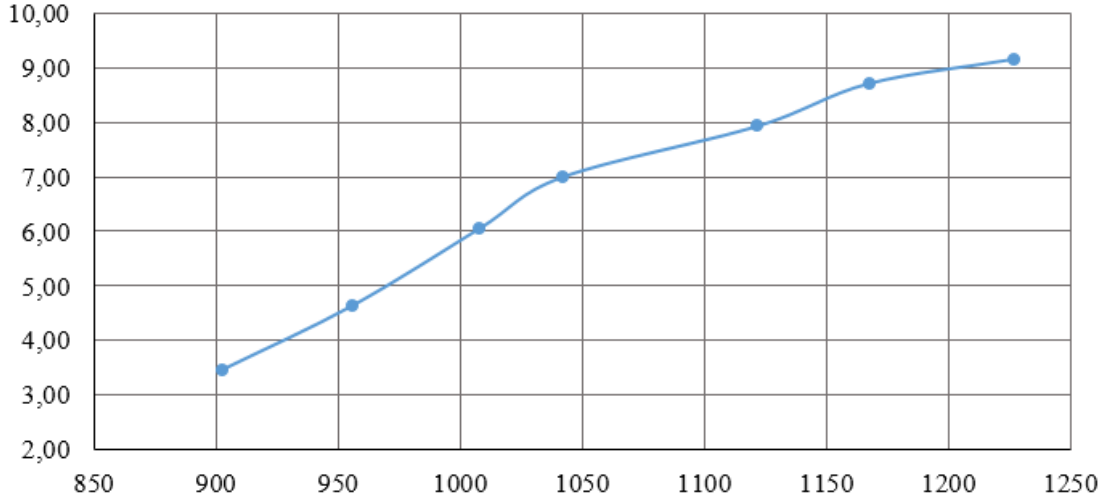


Рисунок 2.6 – Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от критерия Рейнольдса

2.6.1.2 Определение теоретической зависимости гидравлического сопротивления сухой насадки от фиктивной скорости газа в колонне

Для сравнения опытных данных был проведен расчет теоретического значения гидравлического сопротивления слоя сухой насадки. Согласно [19], оно определяется:

$$\Delta p_{\text{сух}} = \zeta \frac{H}{d_{\text{экв}}} \cdot \frac{\rho_{\text{возд}} w^2}{2\varepsilon^2}, \qquad (2.8)$$

где $d_{экв}$ – эквивалентный диаметр насадки, $d_{экв}$ = 0,015 м, H – высота слоя насадки, H = 0,24 м, ζ – коэффициент сопротивления, для колец рашига при Re < 2100, определяется:

$$\zeta = \frac{34,6}{\mathrm{Re}^{0,307}}, \tag{2.9}$$

$$\zeta = \frac{34,6}{902^{0,307}} = 4,28,$$

$$\Delta' p_{сух} = 4,28 \frac{0,24}{0,015} \cdot \frac{1,187 \cdot 0,7^2}{2 \cdot 0,74^2} = 34,2 \text{ Па}.$$

Сравнительные данные гидравлического сопротивления по сухой насадке приведены на рисунке 2.7.

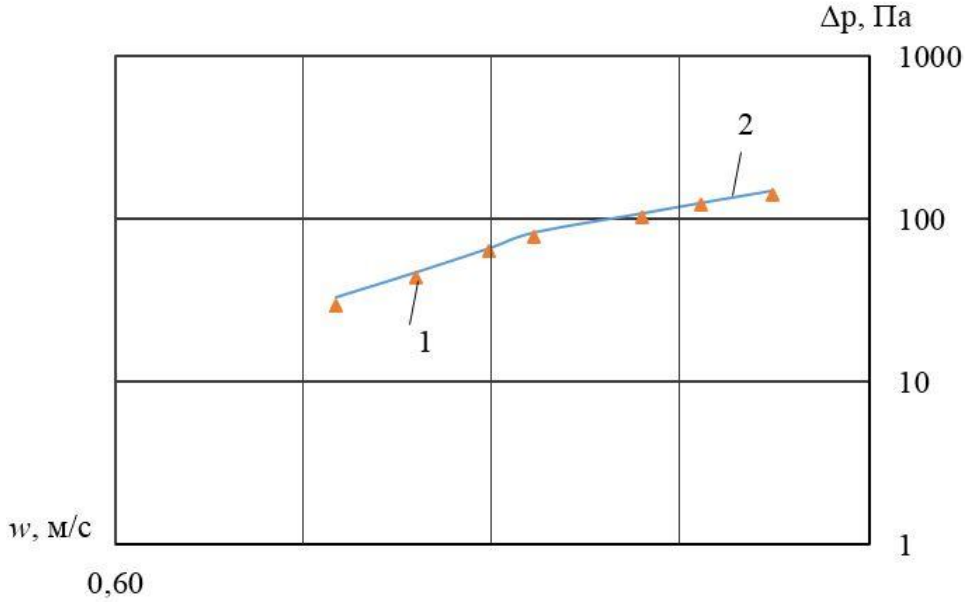


Рисунок 2.7 – Гидравлическое сопротивление сухой насадки колец Рашига:
1 – экспериментальные точки, 2 – теоретическая кривая.

При проведении эксперимента на сухой насадке кольца Рашига выявлена принципиальная сходимость гидравлических характеристик с литературными данными.

2.6.2 Определение гидродинамических и массообменных характеристик слоя орошаемой керамической насадки типа кольца Рашига 25х25.

В орошаемом режиме одновременно проводят измерения гидродинамических и массообменных характеристик.

Эксперимент проводится при трех разных расходах воды. При одном значении расхода воды устанавливают разные значения расхода газа. Результаты измерений по показаниям приборов заносят в таблицу. Далее строят графические зависимости гидравлического сопротивления от скорости газа, а также зависимость коэффициента массоотдачи от скорости газа и расхода жидкости. Для получения сравнительной характеристики был

проведен теоретический расчет гидравлического сопротивления орошаемой насадки.

2.6.2.1 Обработка экспериментальных данных по гидравлическому сопротивлению на орошаемой насадке

Расчет производится по [18].

Результаты измерений по показаниям приборов для расхода жидкости 0,0835 м^3/ч приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Данные эксперимента на орошаемой насадке при расходе жидкости 0,0835 м^3/ч

№	$\Delta H_{дн}$	t_1	φ	t_2	φ	$\Delta p_{ор}$
	см вод. ст	°С	%	°С	%	мм вод.ст.
1	0,35	25	56	23,7	100	3
2	0,55	25	56	23,5	100	6
3	0,75	25	56	23,3	100	9
4	1	25	56	23,3	100	12,5
5	1,25	25	55	22,9	100	15

При обработке опытных данных по гидравлическому орошаемой насадки первая часть расчета аналогична расчету сухой насадки.

$$t = (t_1 + t_2)/2$$

$$t = (25 + 23{,}5)/2 = 24{,}25°\text{C}.$$

Полное давление воздуха в слое насадки составляет:

$$\Pi = B + \Delta p / 2,$$

где B – барометрическое давление, равное B = 760 мм рт. ст., Δp – перепад давления в слое насадки, Δp = 20 мм вод. ст. = 1,47 мм рт. ст.,

$$\Pi = 760 + 1{,}47 / 2 = 760{,}736\,\text{мм рт.ст.}$$

Расход воздуха, приведенный к рабочим условиям, составит:

$$V = V_o \frac{TB_o}{T_o \Pi},$$

$$V = 0{,}02008 \frac{297{,}25 \cdot 760}{273 \cdot 760{,}736} = 0{,}0218\,\text{м}^3/\text{с}.$$

Плотность воздуха:

$$\rho_г = \rho_o \frac{T_o \Pi}{TB_o},$$

$$\rho_г = 1{,}293 \frac{273 \cdot 760{,}736}{297{,}25 \cdot 760} = 1{,}189\,\text{кг/м}^3.$$

По расходу газа рассчитываем приведенную к сечению колонны скорость газа:

$$w = V/S,$$

где S = 0,0314 м^2 – площадь поперечного сечения лабораторной колонны,

$$w = 0{,}0218/0{,}0314 = 0{,}7 \text{ м/с}.$$

Массовый расход воды:

$$L = V_в \rho_в, \tag{2.10}$$

где $\rho_в$ – плотность воды при температуре t,

$$L = 0{,}0835 \cdot 993{,}7 = 82{,}995 \text{ кг/ч}.$$

По расходу воды рассчитываем плотность орошения:

$$U = L/S, \tag{2.11}$$

$$U = 82{,}995/0{,}0314 = 2643{,}2 \text{ кг/(ч·м}^2\text{)}.$$

Для остальных точек, а также для опытных данных при других значениях расхода воды расчет аналогичен. Полученные результаты сводим в таблицу и по ее данным строим график $\Delta p_{ор} = f(w)$ в логарифмической координатной сетке (рисунок 2.8).

Таблица 2.5 – Данные обработки результатов опытов по определению гидравлического сопротивления орошаемой насадки

ΔH	T	П	V	$\rho_г$	w	$\Delta p_{ор}$	$V_о$	L	U	$\rho_в$
мм вод.ст.	°С	мм рт. ст.	м^3/с	кг/м^3	м/с	мм вод.ст.	нм^3/с	м^3/ч	кг/(ч·м^2)	кг/м^3
3,50	297,35	760,368	0,0201	1,188	0,64	10	0,0185	82,98	2642,7	993,56
5,50	297,25	760,736	0,0218	1,189	0,70	20	0,02008	82,995	2643,2	993,72
7,50	297,15	761,103	0,0235	1,190	0,75	30	0,0216	83,03	2644,4	994,17
10,00	297,15	761,532	0,0255	1,190	0,81	41,7	0,0235	83,045	2644,7	994,31
12,50	296,95	761,839	0,0273	1,192	0,87	50	0,0252	83,086	2646,1	994,81

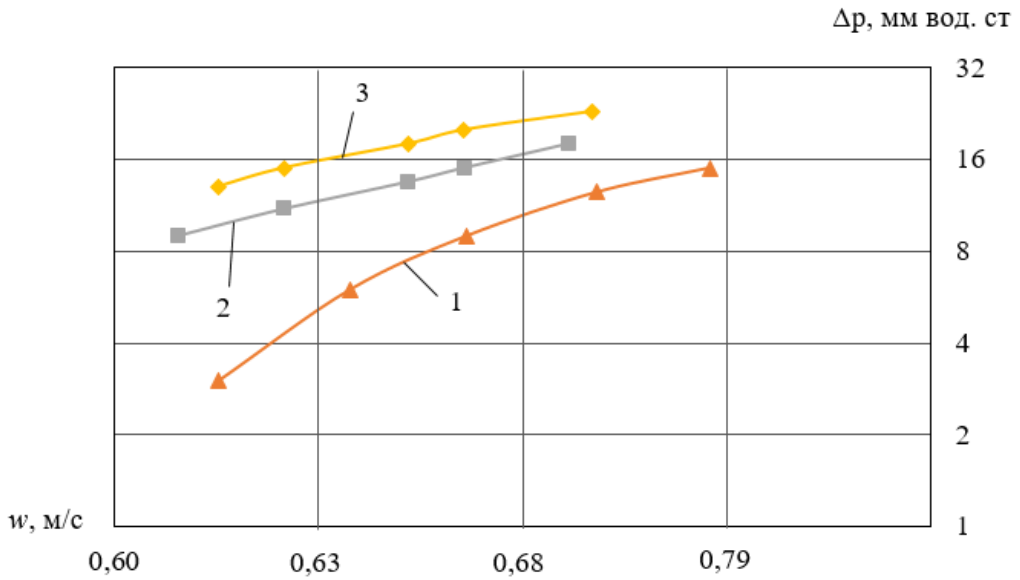


Рисунок 2.8 – Экспериментальная зависимость гидравлического сопротивления орошаемой насадки от скорости газа:

1 – расход воды 0,0835 м^3/ч, 2 – расход воды 0,149 м^3/ч, 3 – расход воды 0,21 м^3/ч

Для определения массообменных характеристик используют данные опытов из таблицы 2.4. По относительной влажности воздуха из таблицы П.7

[18] определяем значения давления насыщенных паров $p_{н1}$, $p_{н2}$ и рассчитываем действительные значения парциальных давлений паров воды в воздухе:

$$\left.\begin{aligned} p_1 &= \varphi_1 p_{н1} \\ p_2 &= \varphi_2 p_{н2} \end{aligned}\right\}, \qquad (2.12)$$

$$p_1 = (56 \cdot 3192,2)/100 = 1787,6\,\text{Па} = 182,3\,\text{мм вод.ст.},$$

$$p_2 = (100 \cdot 2916,7)/100 = 2916,7\,\text{Па} = 297,4\,\text{мм вод.ст.}$$

Движущая сила процесса (в мм вод. ст.) составит:

$$\Delta p_{ср} = \frac{(p_{н1} - p_1) + (p_{н2} - p_2)}{2}, \qquad (2.13)$$

где $p_{н1}$ = 3192,2 Па = 325,5 мм вод. ст., $p_{н2}$ = 2916,7 Па = 297,4 мм вод. ст.,

$$\Delta p_{ср} = \frac{(325,5 - 182,3) + (297,4 - 297,4)}{2} = 71,6\,\text{мм вод.ст.}$$

Объемный коэффициент массоотдачи в газовой фазе (кг/(м^3·мм вод. ст.·с)):

$$\beta_{pV} = \frac{V\rho_г 0,622\left(\dfrac{p_2}{П - p_2} - \dfrac{p_1}{П - p_1}\right)}{SH\Delta p_{ср}}, \qquad (2.14)$$

где П = 760,736 мм рт. ст. = 10342,28 мм вод. ст.,

$$\beta_{pV} = \frac{0,0218 \cdot 1,189 \cdot 0,622\left(\dfrac{297,4}{10342,28 - 297,4} - \dfrac{182,3}{10342,28 - 182,3}\right)}{0,0134 \cdot 0,24 \cdot 71,6} =$$

$$= 3,49 \cdot 10^{-4}\,\frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{мм вод.ст.} \cdot \text{с}}.$$

Коэффициент массоотдачи (с$^{-1}$):

$$\beta_{гV} = \frac{\beta_{pV} R\left(t_{ср} + 273,15\right)}{9,81 M_в}, \qquad (2.15)$$

где R = 8314 Дж/(кмоль·К) – универсальная газовая постоянная; $M_в$ = 18 кг/кмоль – мольная масса воды [20],

$$\beta_{гV} = \frac{3,49 \cdot 10^{-4} \cdot 8314 \cdot 297,25}{9,81 \cdot 18} = 4,59\,\text{с}^{-1}.$$

Для остальных точек расчет аналогичен.

Результаты расчета массообменных характеристик для расхода жидкости 0,0835 м^3/ч приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Данные расчета массообменных характеристик

p_1	$p_{н1}$	p_2	$p_{н2}$	$\Delta p_{ср}$	β_{pV}	$\beta_{гV}$
мм вод. ст.	мм вод. ст.	мм вод. ст.	мм вод. ст.	мм вод. ст.	кг/(м^3·мм вод. ст.·с)	с$^{-1}$
182,29	325,52	301,04	301,04	71,61	$3{,}31\cdot10^{-4}$	4,24
182,29	325,52	297,42	297,42	71,61	$3{,}49\cdot10^{-4}$	4,59
182,29	325,52	293,84	293,84	71,61	$3{,}64\cdot10^{-4}$	4,79
182,29	325,52	293,84	293,84	71,61	$3{,}95\cdot10^{-4}$	5,22
179,03	325,52	286,79	286,79	73,24	$3{,}998\cdot10^{-4}$	5,59

По результатам расчета строим графики $\beta_{гV} = f(w)$ (рисунок 2.9), $\beta_{гV} = f(L)$ (рисунок 2.10).

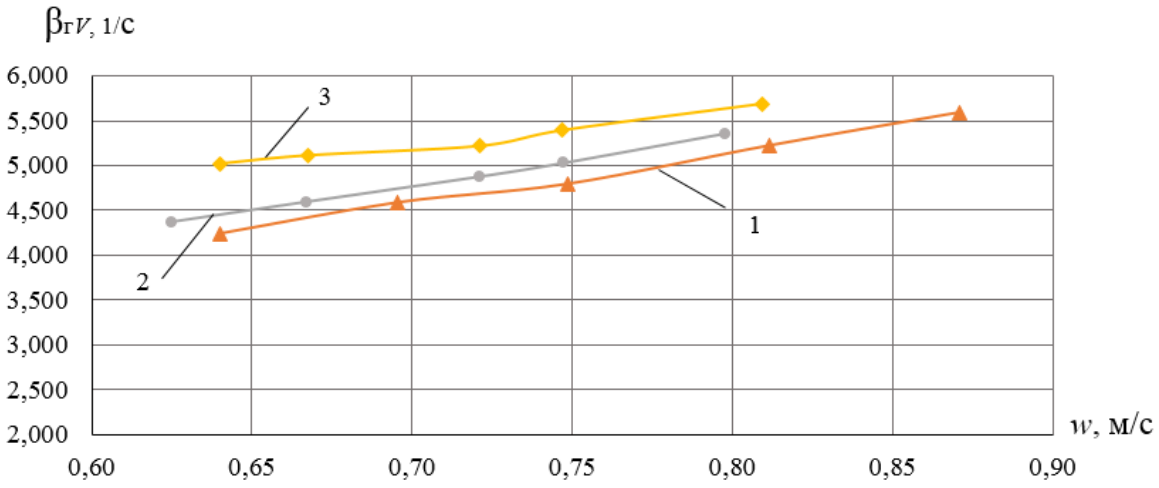


Рисунок 2.9 – Зависимость коэффициента массоотдачи от фиктивной скорости газа:

1 - расход воды 0,0835 м^3/ч, 2 – расход воды 0,149 м^3/ч, 3 – расход воды 0,21 м^3/ч

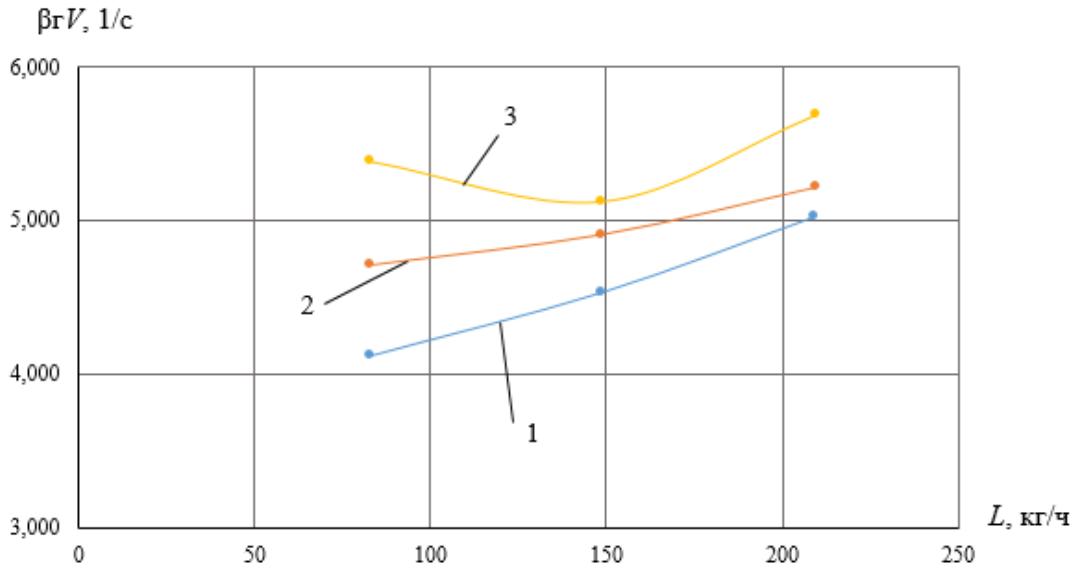


Рисунок 2.10 – Зависимость коэффициента массоотдачи от массового расхода жидкости:

1 – при орошении 0,266 м/ч; 2 – при орошении 0,476 м/ч; 3 – при орошении 0,669 м^3/ч

2.6.2.2 Определение теоретической зависимости гидравлического сопротивления орошаемой насадки от фиктивной скорости газа в колонне

По зависимости В.В. Кафарова рассчитаем сопротивление слоя орошаемой насадки, учитывающую нагрузку по газу и жидкости, а также физические свойства сред [19].

$$\Delta p = \Delta p_{\text{сух}} K, \tag{2.16}$$

где K – коэффициент, для систем газ-жидкость, определяется как

$$K = 1 + 8,4\left(\frac{\bar{L}}{\bar{G}}\right)^{0,405}\left(\frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{ж}}}\right)^{0,235}\left(\frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_{\text{г}}}\right)^{0,045} \tag{2.17}$$

при

$$\left(\frac{\bar{L}}{\bar{G}}\right)^{1,8}\left(\frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{ж}}}\right)\left(\frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_{\text{г}}}\right)^{0,2} < 0,5, \tag{2.18}$$

где $\mu_{\text{ж}}$ – динамическая вязкость воды при температуре $t = 24,25\ ^{\circ}\text{C}$, $\mu_{\text{ж}} = 92,95 \cdot 10^{-5}$ Па · с [21].

$$\left(\frac{122}{100}\right)^{1,8}\left(\frac{1,13}{1099}\right)\left(\frac{54,9 \cdot 10^{-5}}{1,8 \cdot 10^{-5}}\right)^{0,2} = 0,0021 < 0,5.$$

$$K = 1 + 8,4\left(\frac{82,995}{93,6}\right)^{0,405}\left(\frac{1,189}{993,72}\right)^{0,235}\left(\frac{92,95 \cdot 10^{-5}}{18,325 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,045} = 1,93.$$

Определим сопротивление слоя сухой насадки [19].

$$\Delta p_{\text{сух}} = \xi_0 \frac{H'}{d_{\text{экв}}} \frac{\rho_{\text{г}}}{2}\left(\frac{w_{\text{р}}}{\varepsilon}\right)^2, \tag{2.19}$$

где H' – высота слоя насадки, $H' = 0,240$ м;

ξ_0 – коэффициент сопротивления сухой насадки;

$d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр насадки, м.

Коэффициент сопротивления сухой насадки определим, как

$$\xi_0 = \frac{A}{\text{Re}_{\text{г}}^{b}}, \tag{2.20}$$

где $\text{Re}_{\text{г}}$ – критерий Рейнольдса для газовой фазы [20].

Критерий Рейнольдса для газовой фазы, определяется

$$\text{Re}_{\text{г}} = \frac{4W_{\text{г}}}{a\mu_{\text{г}}}, \tag{2.21}$$

где $\mu_{\text{г}}$ – коэффициент динамической вязкости газовой фазы при температуре $t = 24,25\,^{\circ}\text{C}$ [1], $\mu_{\text{г}} = 1,8325 \cdot 10^{-5}$ Па · с; $W_{\text{г}}$ - массовая скорость газа, кг/(м^2 · с).

Массовая скорость газа, определяется

$$W_г = \frac{\bar{G}}{3600S}, \qquad (2.22)$$

где S – площадь сечения абсорбера, м^2.

Площадь сечения абсорбера

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}2^2}{4} = 0{,}0314 \text{ м}^2, \qquad (2.23)$$

$$W_г = \frac{93{,}6}{3600 \cdot 0{,}0314} = 0{,}828 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)},$$

$$\mathrm{Re}_г = \frac{4 \cdot 0{,}828}{200 \cdot 1{,}8325 \cdot 10^{-5}} = 904.$$

Исходя из значения коэффициента Рейнольдса и вида насадки определяются коэффициенты $A = 40{,}73$ и $b = 0{,}307$ [20].

Подставив найденные значения в (2.20) определим коэффициент сопротивления сухой насадки:

$$\xi_0 = \frac{40{,}73}{904^{0{,}307}} = 5{,}04,$$

$$\Delta p_{сух} = 5{,}04 \frac{0{,}24}{0{,}015} \frac{1{,}189}{2} \left(\frac{0{,}828}{0{,}74} \right)^2 = 60 \text{ Па}.$$

Сопротивление орошаемого слоя:

$$\Delta p = 60 \cdot 1{,}93 = 115{,}8 \text{ Па}.$$

Данное значение сильно расходится с опытным значением сопротивления. Однако, при построении графика выяснилось, что следующие точки достаточно близки. График зависимости гидравлического сопротивления орошаемой насадки от фиктивной скорости газа приведен на рисунке 2.11.

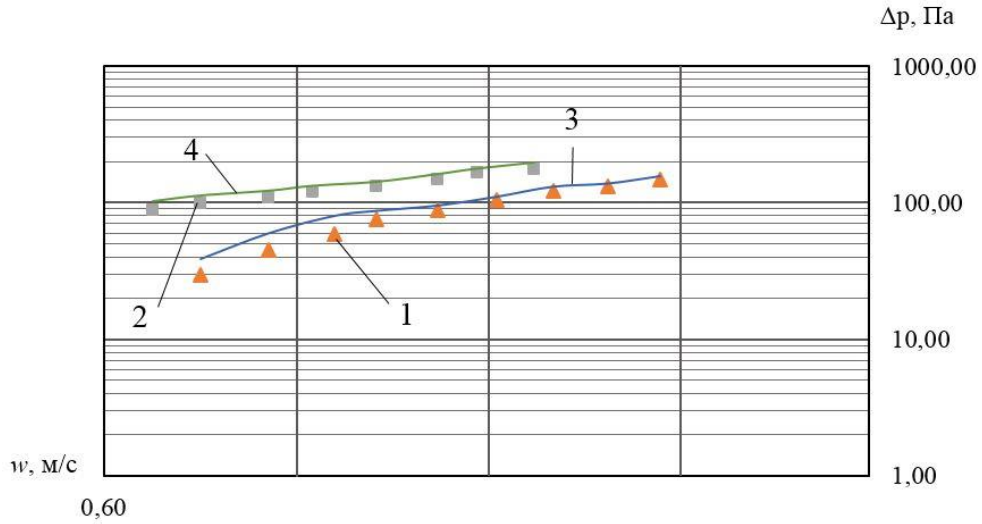


Рисунок 2.11 – Сравнение экспериментальных и теоретических гидравлических характеристик:

1 – экспериментальные точки при расходе жидкости 0,0835 м^3/ч, 2 – экспериментальные точки при расходе жидкости 0,149 м^3/ч, 3 – теоретическая кривая при расходе жидкости 0,0835 м^3/ч, 4 - теоретическая кривая при расходе жидкости 0,149 м^3/ч

2.7 Выводы по разделу

При проведении экспериментов на насадке кольца Рашига 25х25 выявлена принципиальная сходимость гидравлических характеристик с литературными данными. Результаты опытных данных гидравлического сопротивления слоя сухой насадки наиболее сопоставимы с данными теоретического расчета. Гидродинамические характеристики орошаемой насадки значительно отличаются от теоретического расчета, это может быть вызвано недостаточным орошением слоя насадки.

2.8 Безопасность и экологичность проектных решений в научно – исследовательской работе

Проведение научно – исследовательских работ требует особого внимания к вопросам охраны труда, техники безопасности и защиты от вредных факторов. Применение электрического оборудования, механических устройств требует от работников лаборатории особой внимательности и осторожности в работе.

Нарушение инструкций, правил и норм техники безопасности, пожарной безопасности и производственной санитарии на производстве могут привести к травматизму и профессиональным заболеваниям.

Целью данного раздела является разработка мероприятий при проведении научно – исследовательских работ, которые исключат производственный травматизм, взрывы, пожары и аварийные ситуации. Данные мероприятия должны обеспечить возможность быстрой ликвидации аварийных ситуаций.

2.8.1 Вредные и опасные факторы, присущие данной научно-исследовательской лаборатории

Научно – исследовательская работа проводилась в лаборатории ДПИ НГТУ № 3105. Данной лаборатории присущ ряд физических, психофизиологических и химических вредных факторов, которые могут влиять на здоровье человека.

К числу физических факторов относятся: наличие напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека; повышенная температура поверхностей, которая может явиться причиной получения термических ожогов; наличие быстровращающихся элементов механизмов.

Психофизиологические факторы по характеру действия подразделяются на тяжесть (статические и динамические физические нагрузки) и напряженность трудового процесса (умственное перенапряжение, перенапряжение анализаторов, монотонность труда, эмоциональные перегрузки) [22].

Химические опасные и вредные производственные факторы подразделяются по характеру воздействия на организм человека (токсические, раздражающие, сенсибилизирующие, канцерогенные, мутагенные и влияющие на репродуктивную функцию) и по пути проникновения в организм человека (через органы дыхания, желудочно – кишечный тракт, кожные покровы и слизистые оболочки).

2.8.2 Санитарно – гигиенические мероприятия

Характеристика наиболее опасных веществ, образующихся в результате работы лабораторной установки представлена в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Характеристика токсичных свойств веществ лабораторной установки

Наименование вещества	Агрегатное состояние	Плотность паров или газов по воздуху	Класс опасности вещества в соответствии с [26]	Предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны, мг/м^3	Литература
Двуокись углерода CO_2	газ	1,53	4	9200	[23]
Моноэтаноламин (МЭА)	жид.	-	2	0,5	[24]

Вещества, перечисленные в таблице 2.7, вызывают следующие воздействия на организм человека,

1. Двуокись углерода – согласно [25] не токсичен, наркотически воздействует на организм. Угнетает дыхательный центр, вызывает удушье.

2. Моноэтаноламин – согласно [24], опишем воздействие на организм человека:

- при отравлении ингаляционным путем вызывает головокружение, головную боль, одышку, чувство першения в горле, кашель, чувство удушья, нарушение частоты и ритма дыхания, в тяжелых случаях вызывает клонико-тонические судороги;
- при воздействии на кожу вызывает покалывание, зуд, покраснение, боль, ожоги кожи;
- при попадании в глаза вызывает слезотечение, раздражение, покраснение склер, птоз век, резь, помутнение роговицы, сильные глубокие ожоги;
- при отравлении пероральным путем вызывает головокружение, головную боль, тошноту, боль в животе, ощущение жжения, боль или коллапс.

Так как эти вещества могут нанести серьезный вред организму человека, то необходимо указать меры оказания первой помощи при воздействии данных веществ, а также средства индивидуальной зашиты для предотвращения их воздействия, используемые в производстве:

1. Двуокись углерода – необходим свежий воздух, кислород. При нарушении дыхания – искусственное дыхание, камфора, кофеин. В тяжелых случаях – кровопускание с последующим вливанием физиологического раствора.

Меры предупреждения – при высоком содержании CO_2 и нормальном содержании O_2 – шланговые противогазы (ПШ – 1; ПШ – 2 и др.). При низком содержании O_2 обязательны кислородные изолирующие приборы.

2. Моноэтаноламин – согласно [24], опишем меры оказания первой помощи:

- при воздействии на кожу промыть ее большим количеством проточной воды;
- при попадании в глаза их проточной водой при широко раскрытой глазной щели. В случае необходимости обратиться за медицинской помощью;
- при отравлении пероральном путем – необходимо обильное питье воды, активированный уголь, солевое слабительное, внутрь принимать слизистые отвары. Направить пострадавшего к врачу.

Мерой предупреждения опасного воздействия, согласно [24], является спецодежда, промышленный противогаз малого габарита ПФМ – 1 (можно может унифицировать с теми) с универсальным защитным патроном ПЗУ, автономный защитный индивидуальный комплект с принудительной подачей в зону дыхания очищенного воздуха. Кроме этого, используют щелочестойкие перчатки, перчатки из дисперсии бутилкаучука, специальная обувь.

Для предупреждения воздействия вредных веществ на организм человека необходим контроль за их наличием в воздухе рабочей зоны. Укажем методы контроля, а также требования к контролю за соблюдением их максимально разовой ПДК, согласно [26]:

– отбор проб должен проводиться в зоне дыхания при характерных производственных условиях;

– контроль содержания вредных веществ в воздухе проводится на наиболее характерных рабочих местах;

– содержание вредного вещества в данной конкретной точке характеризуется следующим суммарным временем отбора: для токсических веществ - 15 мин, для веществ преимущественно фиброгенного действия - 30 мин. За указанный период времени может быть отобрана одна или несколько последовательных проб через равные промежутки времени. Результаты, полученные при однократном отборе или при усреднении последовательно отобранных проб, сравнивают с величинами $ПДК_{МР.РЗ}$;

– при возможном поступлении в воздух рабочей зоны вредных веществ с остронаправленным механизмом действия должен быть обеспечен непрерывный контроль с сигнализацией о превышении ПДК;

– периодичность контроля устанавливается в зависимости от класса опасности вредного вещества: для II класса - не реже 1 раза в месяц, IV класса – не реже 1 раза в квартал.

2.8.3 Микроклимат помещения лаборатории

Помещение лаборатории № 3105 относится к 2 категории помещений по условиям пребывания и характеру труда в них людей. Категория тяжести работ по энергозатратам легкая I – б, так как работы с энергозатратами от 140 до 174 Вт производятся сидя, стоя или связаны с ходьбой, но не требуют систематического физического напряжения или поднятия и переноски тяжестей [27].

В таблицах 2.8, 2.9 приведены оптимальные и допустимые параметры микроклимата в рабочей зоне производственных помещений [27].

Таблица 2.8 – Оптимальные значения параметров микроклимата на рабочих местах

Период года	Температура воздуха		Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха	
	Диапазон ниже оптимальных величин	Диапазон выше оптимальных величин			для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин, не более	для диапазона температур воздуха выше оптимальных величин, не более
Холодный	19-20,9	23,1-24	18-25	15-75	0,1	0,2
Теплый	20-21,9	24,1-28	19-29	15-75	0,1	0,3

Таблица 2.9 – Допустимые нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне лаборатории

Период года	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	21-23	20-24	60-40	0,1
Теплый	22-24	21-25	60-40	0,1

Отопление помещения

В холодный период года в лаборатории используется центральное водяное отопление (радиатор, температура воды составляет 80 – 90°С) [27]. Так как в помещении лаборатории тепловыделение не превышает 84 кДж/(ч·м^3), то лаборатория относится к помещениям с незначительным выделением тепла и не требуется мер для его отвода.

Вентиляция помещения

Для обеспечения нормальных санитарно – гигиенических условий в лаборатории предусмотрена вытяжная вентиляция. Расчет ведется для теплого времени года как наиболее тяжелого режима работы системы вентиляции.

Кратность воздухообмена определяется по формуле

$$K = \frac{L}{V}, \qquad (2.24)$$

где L – объем воздуха, удаленного из помещения, м^3. Определяется из выражения:

$$L = F \cdot \upsilon \cdot 3600, \qquad (2.25)$$

где F = 7,96 м^2 – площадь проемов, через которые засасывается воздух;
υ = 0,15 м/с – скорость воздуха.
V – объем помещения, м^2. У рассматриваемого помещения V = 436,8 м^2.

$$L = 3{,}98 \cdot 0{,}15 \cdot 3600 = 1194\,\frac{\text{м}^3}{\text{ч}},$$

$$K = \frac{1194}{436{,}8} = 2{,}73\ \text{ч}^{-1}.$$

Рабочая кратность воздухообмена принимается 4 ч$^{-1}$.

2.8.4 Шум и вибрация

Характеристика шума и вибрации

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

Источником вибрации при проведении экспериментов являются движущиеся части насоса, 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 [28]	
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 противошумные [32] и беруши из вспененного полиуретана [32].

Величины параметров вибрации

Среднегеометрическая частота, Гц	8;

Среднеквадратичная виброскорость, м/с 10^{-2} 0,12;
Логарифмический уровень виброскорости, Дб 82;
Нормируемые величины параметров вибрации [28]
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.

2.8.5 Освещение лаборатории

Проектируемая лабораторная установка монтируется в помещении, относящемся к I группе по задачам зрительной работы [29], так как при проведении лабораторных исследований производится различение объектов зрительной работы при фиксированном направлении линии зрения работающих на рабочую поверхность (наблюдение за показаниями ротаметров, термометров и т.п.).

Зрительная работа характеризуется средней точностью, с наименьшим размером объекта различения от 1 до 5 мм, что соответствует V разряду зрительной работы, подразряду «b».

В зависимости от времени суток в лаборатории предусмотрено использование либо естественного освещения, либо совмещенного. Для естественного освещения помещения лаборатории используется боковое освещение через оконные проемы в наружной стене.

Расчет естественного освещения

При расчете естественного освещения необходимо определить площадь световых проемов, обеспечивающую нормируемую освещенность.

Прежде всего необходимо определить нормированное значение коэффициента естественного освещения (КЕО) e_n

$$e_n = e_H \cdot m_N, \tag{2.26}$$

где e_H – значение КЕО по [28];
m_N – коэффициент светового климата, для Нижегородской области $m_N = 1$.

При северо – восточной ориентации световых проемов в наружной стене здания $e_H = 1\%$. Таким образом,

$$e_n = 1 \cdot 1 = 1\%.$$

Необходимая площадь световых проемов при боковом освещении определяется по формуле

$$100\frac{S_o}{S_n} = \frac{e_n K_3 \eta_o}{\tau_o r_1} K_{зд}, \tag{2.27}$$

где S_o – площадь световых проемов при боковом освещении, м^2;
S_n – площадь пола помещения, м^2.

$$S_n = L \cdot B, \tag{2.28}$$

где L = 14 м – длина помещения;
B = 6 м – ширина помещения;

$$S_n = 14 \cdot 6 = 84 \text{ м}^2,$$

e_n = 1% – нормированное значение КЕО;
K_3 – коэффициент запаса, для помещения с воздушной средой, содержащей в рабочей зоне 1÷5 мг/м^3 пыли, при вертикальном расположении светопропускающего материала K_3 = 1,4;
$\eta_o = f(\frac{L}{B}, \frac{B}{H})$ – световая характеристика окон.

2.8.6 Техника безопасности

Электробезопасность

Помещение лаборатории находится в здании, относящемся к III категории устройства молниезащиты [30], так как от прямого удара молнии может возникнуть пожар, механические разрушения и поражения людей. Этой категории соответствует уровень защиты от прямых ударов молнии (ПУМ) 0,9. Применяемая в здании система молниезащиты (МЗС) состоит из молниеотводов, токоотводов и заземлительных устройств. Тип молниеотвода – стержневой, установленный на крыше здания лаборатории. Сопротивление заземляющего устройства молниезащиты не должно превышать 10 Ом.

В помещении оборудование работает под напряжением электрического тока 380/220 В. В отношении опасности поражения людей электрическим током помещение лаборатории относится к классу помещений повышенной опасности, так как в нем отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность (токопроводящие полы, высокая температура, химически активные среды) [31]. Электрооборудование должно быть закрыто. Сопротивление заземления технологического оборудования должно быть не более 4 Ом.

Статическое электричество образуется в результате транспортирования углеводородного топлива и растворителей, перемешивания сыпучих тел или перемещения их в пневмотранспорте, дробления веществ. Эти процессы при проведении лабораторных исследований отсутствуют, а значит возникновение статического электричества маловероятно.

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 [30]:

- 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 также ремонтировать приборы и оборудование, находящиеся под напряжением;

- в случае перерыва в подаче электроэнергии все электроприборы следует немедленно выключить.

Общие правила техники безопасности эксплуатации лабораторного стенда

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 вентилей;

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.

Технологическая характеристика аппарата

Вместимость (объем), $м^3$ 0,01;

рабочее давление, МПа (абс) 0,1;

среда в аппарате: обедненный моноэтаноламин, пары, смесь паров CO_2, воды и моноэтаноламина;

температура среды в аппарате ^oC, 50;

материал, контактирующий с рабочей средой: сталь 12Х18Н10Т;

материал уплотнительных прокладок: паронит ПОН.

Габаритные размеры аппарата, мм:

- диаметр 200;
- высота 2420.

Способ изготовления – сборный.

Пожарная безопасность

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

Категория помещения по [30] – 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;

расстояние от наиболее удаленного рабочего места, м 20;

средства сигнализации пожара – автоматическое извещение.

Стационарные средства тушения – пожарные гидранты, первичные – огнетушители, песок, асбестовое полотно.

Исполнение электрооборудования – пылевлагозащищенное.

Класс зоны по пожаробезопасности – П – IIа, так как она не расположена в помещении, в котором обращаются твердые горючие вещества.

2.8.7 Котлонадзорность аппарата

Колонный аппарат представляет собой цилиндрическую конструкцию. Он состоит из цилиндрических царг и плоского днища. Аппарат снабжен всеми необходимыми штуцерами для ввода и вывода рабочей среды, а также для установки КИП (термометр, дифманометр). Среда в аппарате невзрывоопасная.

Последовательность гидроиспытания аппарата:

1) подготовить аппарат к испытаниям;
2) залить воду;
3) выдержать несколько минут;
4) высушить корпус сжатым воздухом.

Аппарат регистрации в органах Ростехнадзора не подлежит.

С точки зрения безопасной эксплуатации экспериментальной установки в процессе исследований применено надежное оборудование.

Указанные выше мероприятия по охране труда создают безопасны условия работы на установке.

3 Проектно – конструкторская часть. Рекомендации к практическому использованию результатов исследования

3.1 Расчеты аппарата

3.1.1 Технологический расчет колонны абсорбции

Целью технологического расчета абсорбера является составление материального баланса аппарата, расчет основных геометрических параметров, которые включают в себя диаметр колонны, высоту слоя насадки, высоту аппарата, диаметры штуцеров. Расчет проводился на средах – раствор МЭА, дымовые газы, вода.

Исходные данные для расчета:

- начальный расход газа с содержанием CO_2 $G_0 = 100$ кг/ч;
- начальный расход раствора моноэтаноламина (МЭА) $L_{МЭА} = 122$ кг/ч;
- 9,83% от общего раствора является свободно циркулирующим;
- исходная концентрация двуокиси углерода на входе $\overline{Y}_н = 8,9$ %;
- исходная концентрация моноэтаноламина $\overline{X}_н = 35$ %;
- степень извлечения CO_2 $k = 0,75$;
- $\chi -$ степень конверсии, $\chi = 0,885$;
- $\beta_{co_2} -$коэффициент избытка по CO_2, $\beta_{co_2} = 1,18$;
- $\beta_{МЭА} -$коэффициент избытка по МЭА, $\beta_{МЭА} = 1,48$;
- абсолютное давление в абсорбере $p = 1$ атм.;
- температура в абсорбере $t = 50\,^{o}C$;
- поглотитель: раствор моноэтаноламина (МЭА);
- тип колонны: насадочная, Кольца Рашига 25, неупорядоченно уложенные.

3.1.1.1 Материальный баланс абсорбционной колонны

Основой материального баланса служат обратимые химические реакции [33]:

$$CO_2 + 2RNH_2 + H_2O \rightleftarrows (RNH_3)_2CO_3, \quad (3.1)$$

$$CO_2 + (RNH_3)_2CO_3 + H_2O \rightleftarrows 2RNH_3HCO_3, \quad (3.2)$$

где R– группа $OHCH_2CH_2$.

В действительности данные уравнения нужно рассматривать как общую систему поглощения CO_2 растворами МЭА, определяющую возможность получения в качестве конечного продукта, как карбоната, так и бикарбоната моноэтаноламмония.

Молекула МЭА, связанная цепочкой из двух метиленовых групп, включает в себя две полярные функциональные группы – гидроксильную и аминогруппу. Этими функциональными группами определяются два пути

взаимодействия CO_2 и МЭА, однако, как правило, моноэтаноламин реагирует с характерными признаками для аминосоединения.

При относительно малых степенях карбонизации (α <0,5 кмоль/кмоль) углекислый газ вступает в реакцию с водным раствором МЭА в основном с образованием замещенной карбаминовой кислоты:

$$CO_2 + RNH_2 \rightleftarrows RNHCOO^- + H^+.$$

В водном растворе моноэтаноламина равновесие устанавливается практически мгновенно:

$$RNH_2 + H^+ = RNH_3^-.$$

В результате чего образуется карбаматмоноэтаноламмония:

$$RNHCOO^- + RNH_3^+ = RNHCOORNH_3.$$

Зависимость термодинамической постоянной диссоциации МЭА $K_{b,0} = \frac{\left[RNH_3^+\right]\left[OH^-\right]}{\left[RNH_2\right]}$ от температуры показана на рисунке 3.1. [34]

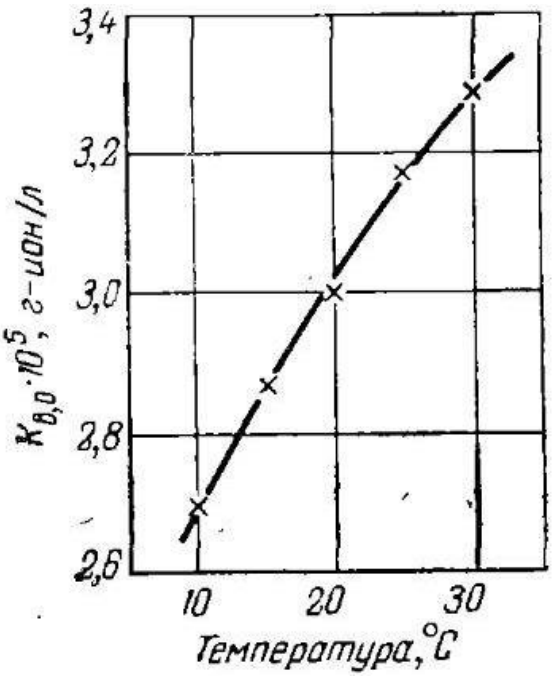


Рисунок 3.1 – Зависимость постоянной равновесия от температуры

Общую реакцию взаимодействия углекислого газа с моноэтаноламином по карбаматному механизму можно представить в виде:

$$(1+\gamma)RNH_2 + CO_2 \rightleftarrows (1-\gamma)RNHCOOH + \gamma RNHCOO^- + \gamma RNH_3^+, \quad (3.3)$$

где γ – степень диссоциации карбаминовой кислоты; для полной диссоциации $1 + \gamma = 2$, для частичной $1 < (1 + \gamma) < 2$.

Реакции, показанные на рисунке 3.2, являются определяющими для МЭА-очистки. Первая реакция включает в себя 90% всего процесса, а вторая примерно 10%.

Химическая реакция взаимодействия CO_2 и H_2O с образованием угольной кислоты занимает примерно 10% от всей реакции.

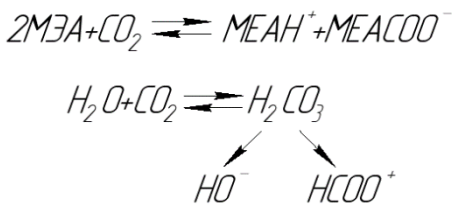


Рисунок 3.2 – Основные реакции МЭА-очистки

Главными целевыми продуктами реакции являются:

$MEAH^+$ – распавшийся на ионы МЭА;

MEA – МЭА не распавшийся на ионы;

H_2O – вода (как растворитель моноэтаноламина);

CO_2 – углекислый газ;

HCO_3^- – ион гидрокарбоната;

$MEACOO^-$ – ион, провзаимодействовавший с молекулой двуокиси углерода.

Реакции (3.1), (3.2) проходят параллельно, но согласно [35] на 1 моль углекислого газа тратится 2 моль моноэтаноламина, поэтому расчет будем вести согласно реакции (3.1). По исходным данным произведем расчет баланса по химической реакции.

$$\underset{44\,\text{кг/кмоль}}{\overset{6{,}68\,\text{кг/ч}}{CO_2}} + \underset{61\,\text{кг/кмоль}}{\overset{18{,}5\,\text{кг/ч}}{2RNH_2}} + \underset{18\,\text{кг/кмоль}}{\overset{2{,}74\,\text{кг/ч}}{H_2O}} \rightleftarrows \underset{184\,\text{кг/кмоль}}{\overset{28\,\text{кг/ч}}{(RNH_3)_2CO_3}}. \quad (3.4)$$

Количество воздуха на входе в абсорбер

$$v_{\text{возд}} = \frac{G_0}{M_{\text{возд}}} = \frac{100}{28{,}97} = 3{,}45\,\text{кмоль/час}, \quad (3.5)$$

где G_0 – расход воздушной смеси на входе в абсорбер, $G_0 = 100$ кг/ч; $M_{\text{возд}}$ – мольная масса воздуха, $M_{\text{возд}} = 28{,}97$ кг/кмоль [21].

Расход CO_2 на входе в абсорбер

$$G_{CO_2} = \overline{Y}_{\text{н}} \cdot G_0 = 8{,}9\,\text{кг/час} \quad (3.6)$$

Примем степень поглощения, согласно заданию 75%, тогда количество абсорбированного CO_2 будет рассчитываться как

$$M^{'}(CO_2) = kG_{CO_2} = 0{,}75 \cdot 8{,}9 = 6{,}68 \text{ кг/ч}; \quad (3.7)$$

Количество воздуха на выходе из абсорбера

$$G_0^{'} = 100 - 6{,}68 = 93{,}32\,\text{кг/час};$$

$$v_{\text{возд}} = \frac{G_0^{'}}{M_{\text{возд}}} = \frac{93{,}32}{28{,}97} = 3{,}22\,\text{кмоль/час}, \quad (3.8)$$

где $G_0^{'}$ – расход воздуха на выходе из абсорбера, $G_0 = 93{,}32$ кг/ч;

$M_{\text{возд}}$ – молярная масса воздуха, $M_{\text{возд}} = 28{,}97$ кг/кмоль.

Количество CO_2 на входе в абсорбер

$$v_{CO_2} = \frac{G_{CO_2}}{M_{CO_2}} = \frac{8,9}{44} = 0,202 \text{ кмоль/час}, \quad (3.9)$$

где M_{CO_2} – молярная масса CO_2, $M_{CO_2} = 44$ кг/кмоль [21].

Количество CO_2 на выходе из абсорбера

$$G''_{CO_2} = G_{CO_2} - G'_{CO_2} = 8,9 - 6,68 = 2,22 \text{кг/час};$$

$$v_{CO_2} = \frac{G''_{CO_2}}{M_{CO_2}} = \frac{2,22}{44} = 0,0505 \text{ кмоль/час}.$$

Количество прореагировавшего CO_2

$$v_{CO_2} = \frac{M'(CO_2)}{M_{CO_2}} = \frac{6,68}{44} = 0,152 \text{ кмоль/ч}. \quad (3.10)$$

Найдем массовые расходы веществ. Согласно балансу по реакции (3.4) количество вещества эквивалентно количеству CO_2, отсюда:

$$M'((RNH_3)_2CO_3) = v_{CO_2} \cdot M_{(RNH_3)_2CO_3} = 0,152 \cdot 184 = 28 \text{ кг/ч}; \quad (3.11)$$

$$M'(H_2O) = v_{CO_2} \cdot M_{H_2O} = 0,152 \cdot 18 = 2,74 \text{ кг/ч}; \quad (3.12)$$

$$M'(RNH_2) = v_{CO_2} \cdot M_{RNH_2} = 0,152 \cdot 61 \cdot 2 = 18,5 \text{ кг/ч}; \quad (3.13)$$

$$M'(CO_2) = v_{CO_2} \cdot M_{CO_2} = 0,152 \cdot 44 = 6,68 \text{ кг/ч}. \quad (3.14)$$

Массовые расходы веществ, подаваемых в абсорбер

$$M''(H_2O) = \frac{M'(H_2O)}{\chi} = \frac{2,74}{0,885} = 3,1 \text{ кг/ч}, \quad (3.15)$$

$$M''(RNH_2) = \frac{M'(RNH_2)}{\chi} = \frac{18,5}{0,885} = 20,9 \text{ кг/ч}; \quad (3.16)$$

$$M''(CO_2) = \frac{M'(CO_2)}{\chi} = \frac{6,68}{0,885} = 7,56 \text{ кг/ч}; \quad (3.17)$$

где χ – степень конверсии, $\chi = 0,885$.

Массовые расходы веществ на стадии абсорбции. Дополнительно учитываем избыток, что будет говорить о достаточности компонентов для протекания реакции, согласно рекомендации [19]

$$G_{CO_2} = 1,18 \cdot 7,56 = 8,9 \text{ кг/ч}; \quad (3.18)$$

Из исходных данных найдем

$$G_{св.р-р} = 0,0983 \cdot L_{МЭА} = 0,0983 \cdot 122 = 12 \text{кг/ч};$$

$$m_{RNH_2} = 1,48 \cdot 20,9 = 30,9 \text{ кг/ч}. \quad (3.19)$$

$$m_{H_2O} = L_{МЭА} - G_{св.р-р} - m_{RNH_2} = 122 - 12 - 30,9 = 79,1 \text{кг/час},$$

где $G_{св.р-р}$ - расход связанного раствора, G_{RNH_2} - расход МЭА, по окончании расчета все рассчитанные величины занесены в таблицу 3.1.

Дополнительно в системе циркулирует связанный раствор $(RNH_3)_2CO_3$, который равен 12 кг/ч.

Масса компонентов после стадии абсорбции

$$m_{CO_2} = 8,9 - M^{'}(CO_2) = 8,9 - 6,68 = 2,22 \text{ кг/ч}; \quad (3.20)$$

$$m_{H_2O} = 79,1 - M^{'}(H_2O) = 79,1 - 2,74 = 76,4 \text{ кг/ч};$$

$$m_{RNH_2} = 30,9 - M^{'}(RNH_2) = 30,9 - 18,5 = 12,4 \text{ кг/ч}; \quad (3.21)$$

$$m_{(RNH_3)_2CO_3} = 28 \text{кг/ч}. \quad (3.22)$$

Материальный баланс химического процесса в абсорбере представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Материальный баланс химического процесса учета инертов

Приход				Расход			
Наименование компонента	m_i, кг/ч	x_i, %	n_i, кмоль/ч	Наименование компонента	m_j, кг/ч	x_j, %	n_j, кмоль/ч
CO_2	8,92	6,81	0,202	CO_2	2,22	1,69	0,0506
RNH_2	30,9	23,6	0,507	RNH_2	12,4	9,47	0,203
H_2O	79,1	60,4	4,39	H_2O	76,4	58,3	4,24
Связан. р-р	12	9,2		Связан. р-р $(RNH_3)_2CO_3$	12	9,16	
					28	21,4	0,152
Всего	**131**	100		Всего	**131**	100	

Схема работы абсорбера представлена на рисунке 3.3. На ней указаны основные потоки (с номерами, соответствующими схеме), входящие в аппарат и выходящие из него.

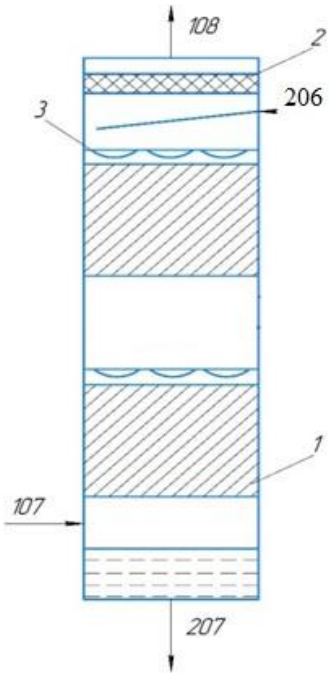


Рисунок 3.3 – Схема работы абсорбера с потоками

1 – слой насадки; 2 – каплеотбойник; 3 – желобчатый ороситель; 206, 207 – потоки моноэтаноламина (МЭА); 107, 108 –потоки газовой фазы.

3.1.1.2 Тепловой баланс абсорбционной колонны

Тепловой баланс абсорбционного процесса по [20]

$$Q_{Г1} + Q_{М1} + Q_{сорбц} - Q_{Г2} - Q_{М2} = 0 \ , \qquad (3.23)$$

где $Q_{Г1,2}$ – количество тепла газа с двуокисью углерода при входе и выходе, кВт;

$Q_{М1,2}$ – количество тепла моноэтаноламина на входе и на выходе, кВт;

$Q_{сорбц}$ – количество тепла поглощения углекислого газа, кВт.

На рисунке 3.4 показан тепловой процесс абсорбции, где $Г_1$, $Г_2$ – входящий и выходящий газы, $М_1$ и $М_2$ – МЭА до и после реакции соответственно.

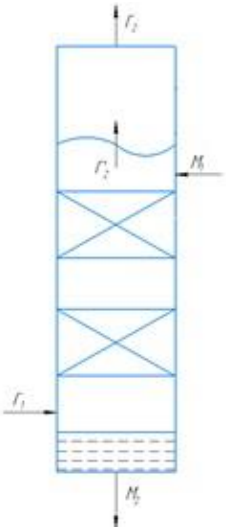


Рисунок 3.4 – Тепловой процесс абсорбции

Так как аппарат работает на поглощение, то потеря энергии для него приводит к улучшению условий протекания хемосорбционного процесса. Рассмотрим самый тяжелый для аппарата случай – когда нет потерь тепла.

Тепловой баланс абсорбера:

$$Q_{Г1} + Q_{М1} + Q_{сорбц} - Q'_{Г2} - Q_{М2} = 0 , \qquad (3.24)$$

где $Q'_{Г2}$ – количество тепла газа на выходе из нижней части, кВт.

Количество тепла газа с CO_2 на входе в абсорбер

$$Q_{Г1} = G_{Г1} ct , \qquad (3.25)$$

где $G_{Г1}$ – расход воздуха на входе в абсорбер, $G = 100$ кг/ч $= 0,0278$ кг/с;

c – теплоемкость воздуха, содержащего углекислый газ при температуре $t = 25^{o}$С [21], $c = 1,05$ кДж/кг·С;

t – температура воздуха, $t = 25^{o}$С.

$$Q_{Г1} = 0,0278 \cdot 1,05 \cdot 25 = 0,73 \text{ кВт.}$$

Количество тепла моноэтаноламина на входе в аппарат:

$$Q_{М1} = G_{МЭА} ct , \qquad (3.26)$$

где $G_{МЭА}$ – расход МЭА на входе в аппарат, $G_{МЭА} = 122$ кг/ч $= 0,0339$ кг/с;

c - теплоемкость МЭА при $t = 50\,^{o}\text{C}$, $c = 3{,}7$ кДж/кг · С;

t – температура МЭА, $t = 50\,^{o}\text{C}$.

$$Q_{\text{М1}} = 0{,}0339 \cdot 3{,}7 \cdot 50 = 6{,}27 \text{ кВт.}$$

Количество тепла сорбции определяется, как:

$$Q_{\text{сорбц.}} = m'r\,, \tag{3.27}$$

где m'_{CO_2} – масса поглощенного CO_2, $m'_{CO_2} = 6{,}675$ кг/ч $= 0{,}00185$ кг/с;

r – теплота растворения, $r = 1920$ кДж/кг [33].

$$Q_{\text{сорбц.}} = 1920 \cdot 0{,}00185 = 3{,}55 \text{ кВт.}$$

Количество тепла на выходе из верхней части, при поглощении двуокиси углерода

$$Q'_{\text{Г2}} = G'_{\text{Г2}}\,ct\,, \tag{3.28}$$

где $G'_{\text{Г2}}$ – расход газа после сорбции углекислого газа, кг/с.

$$G'_{\text{Г2}} = 100 - 6{,}69 = 93{,}3 \text{ кг/ч} = 0{,}0259 \text{ кг/с.} \tag{3.29}$$

$$Q'_{\text{Г2}} = 0{,}0259 \cdot 1{,}05 \cdot 50 = 1{,}36 \text{ кВт.}$$

Количество тепла МЭА на выходе из абсорбера является определяемой величиной. Выразив количество тепла МЭА из (2.26), получим

$$Q_{\text{М2}} = 0{,}73 + 6{,}27 + 3{,}55 - 1{,}36 = 9{,}19 \text{ кВт.}$$

Температура МЭА на выходе из аппарата

$$t = \frac{Q_{\text{М2}}}{G_{\text{МЭА}}c} = \frac{9{,}19}{0{,}0339 \cdot 3{,}7} = 73{,}3°C$$

3.1.1.3 Определение числа единиц переноса

Процесс абсорбции CO_2 можно разделить на три стадии: массоотдача в газовой фазе, массоотдача в жидкости и химическая реакция. Согласно [3] происходит быстрая химическая реакция, а значит, процесс лимитируется стадией массопередачи.

Ключевым моментом является построение линии равновесия, так как температура раствора выше критической температуры газа. Для определения равновесного парциального давления компонента в газе, следует пользоваться законом Генри [36]

$$p^* = m_{\text{рх}}\,x\,, \tag{3.30}$$

где p^* – равновесное парциальное давление компонента в газе, кПа;

$m_{\text{рх}}$ – константа фазового равновесия двуокиси углерода при температуре $61°C$, $m_{\text{рх}} = 3450 \cdot 10^2$ кПа [36];

x – мольная доля CO_2 в жидкости.

Мольное количество газа и CO_2 в абсорбере на входе и на выходе:

$\nu_{CO_2(\text{вход})} = 0{,}202$ кмоль/ч;

$\nu_{CO_2(\text{выход})} = 0{,}0506$ кмоль/ч;

$v_{\text{газа(вход)}} = 3,45$ кмоль/ч;

$v_{\text{газа(выход)}} = 3,22$ кмоль/ч.

Мольная концентрация газовой фазы на входе и на выходе

$$Y_{\text{(вход)}} = \frac{v_{CO_2\text{(вход)}}}{v_{\text{газа(вход)}}} = \frac{0,202}{3,45} = 0,0586 \text{ кмоль/кмоль;} \quad (3.31)$$

$$P_{\text{вход}} = 0,0586 \cdot 101,3 = 5,94 \text{ кПа.} \quad (3.32)$$

$$Y_{\text{(выход)}} = \frac{v_{CO_2\text{(выход)}}}{v_{\text{газа(выход)}}} = \frac{0,0506}{3,22} = 0,0157 \text{ кмоль/кмоль;} \quad (3.33)$$

$$P_{\text{выход}} = 0,0157 \cdot 101,3 = 1,59 \text{ кПа.} \quad (3.34)$$

Используя график (рисунок 3.5) найдем мольные концентрации жидкости на входе и на выходе

$$X_{\text{(вход)}} = \frac{P_{\text{(вход)}}}{m} = \frac{5,94}{3450 \cdot 10^2} = 1,72 \cdot 10^{-5} \text{ кмоль/кмоль;} \quad (3.35)$$

$$X_{\text{(выход)}} = \frac{P_{\text{(выход)}}}{m} = \frac{1,59}{3450 \cdot 10^2} = 4,61 \cdot 10^{-6} \text{ кмоль/кмоль} \quad (3.36)$$

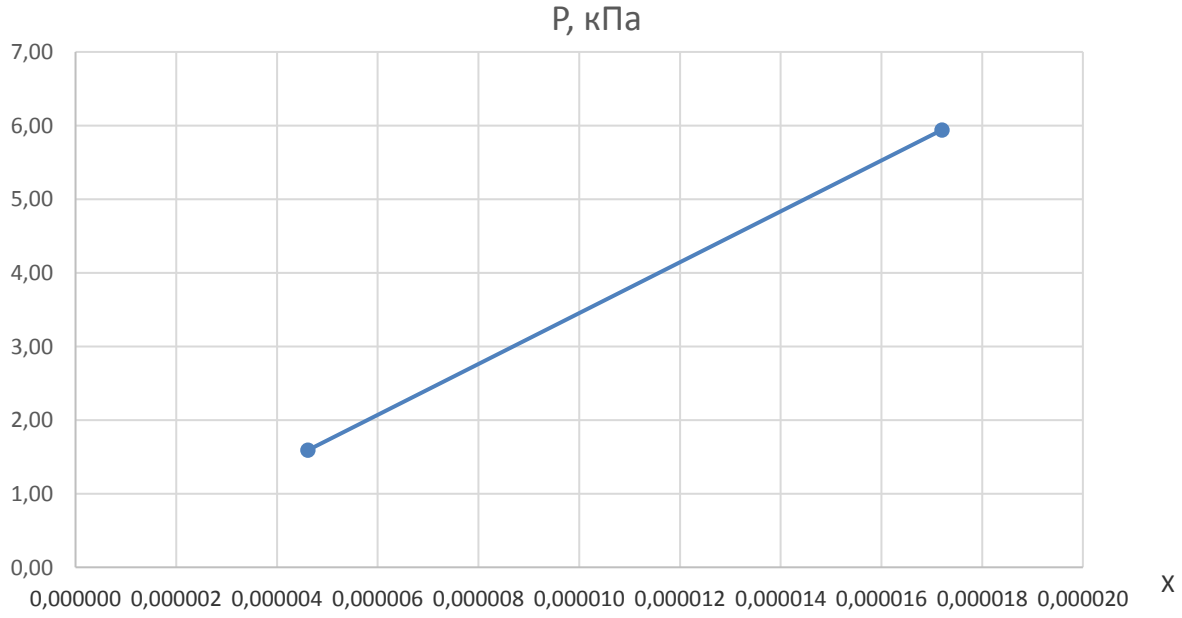


Рисунок 3.5 – Равновесная линия углекислого газа над раствором МЭА

Так как химическая реакция протекает быстро, то рабочая концентрация двуокиси углерода в растворе моноэтаноламина стремится к нулю, поэтому разница концентраций определяется по равновесной концентрации углекислого газа в жидкости.

Отсюда следует, что разность концентраций по жидкости равна концентрациям входа и выхода соответственно:

$$\Delta X_{\text{(вход)}} = 1,72 \cdot 10^{-5} \text{ кПа;}$$

$$X_{(\text{выход})} = 4,61 \cdot 10^{-6} \text{ кПа}.$$

Изменение равновесной концентрации по жидкости

$$\Delta X_{\text{р}} = \frac{\Delta X_{(\text{вход})} - X_{(\text{выход})}}{\ln \dfrac{\Delta X_{(\text{вход})}}{X_{(\text{выход})}}} = \frac{1,72 \cdot 10^{-5} - 4,61 \cdot 10^{-6}}{\ln \dfrac{1,72 \cdot 10^{-5}}{4,61 \cdot 10^{-6}}} = 0,956 \cdot 10^{-5} \text{ кмоль/кмоль}$$

$$N = \frac{\Delta X_{(\text{вход})} - X_{(\text{выход})}}{\Delta X_{(\text{р})}} = \frac{1,72 \cdot 10^{-5} - 4,61 \cdot 10^{-6}}{0,956 \cdot 10^{-5}} = 1,317 \qquad (3.37)$$

Учитывая невозможность полного смачивания и необходимость запаса, примем число теоретических тарелок $\text{ЧТТ} = 2$.

3.1.1.4 Определение геометрических размеров абсорбера

Для колец Рашига нерегулярно уложенных предельная скорость захлебывания газа определяется по формуле [19]

$$\lg C = A - B\left(\frac{\bar{L}}{\bar{G}}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\rho_г}{\rho_ж}\right)^{0,125} = 0,02 - 1,62\left(\frac{122}{100}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{1,13}{1099}\right)^{0,125} = -0,7, \qquad (3.38)$$

где C – параметр, рассчитываемый по формуле [19, с.101];

$\rho_ж$ – плотность водного раствора МЭА, $\rho_ж = 1099$ кг/м^3;

$\rho_г$ – плотность газовой фазы (по воздуху), $\rho_г = 1,13$ кг/м^3;

$\bar{L}$ – расход МЭА по колонне, по материальному балансу (поток 207), $\bar{L} = 122$ кг/ч;

$\bar{G}$ – расход газа по колонне, по материальному балансу (поток 107), $\bar{G} = 100$ кг/ч,

$$10^{-0,7} = \frac{w_{пр}^2 a}{g\varepsilon^3} \frac{\rho_г}{\rho_ж}\left(\frac{\mu_ж}{\mu_{H_2O}}\right)^{0,16} = \frac{w_{пр}^2 200}{9,81 \cdot 0,74^3} \frac{1,13}{1099}\left(\frac{0,0018}{0,000549}\right)^{0,16} = 0,0625 w_{пр}^2$$

$$\mu_ж = 0,0018 Па \cdot с, \ \mu_{H_2O} = 54,9 \cdot 10^{-5} Па \cdot с \text{ [21]}.$$

$$w_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{0,1995}{0,0625}} = 1,79 \text{ м/с}.$$

Рабочую скорость газа в абсорбере по [19] принимаем ниже скорости захлебывания

$$w_{\text{р}} = (0,7 \div 0,9) w_{\text{пр}} = 0,7 \cdot 1,79 = 1,25 \text{ м/с}. \qquad (3.39)$$

Диаметр аппарата, согласно уравнению расхода, составит

$$D = \sqrt{\frac{V}{0,785 w_{\text{р}}}} = \sqrt{\frac{0,0278}{0,785 \cdot 1,25}} = 0,187 \text{ м}, \qquad (3.40)$$

где V – объемный расход газовой фазы (поток 108), $V = 100$ м^3/ч = 0,0278 м^3/с.

Внутренний диаметр аппарата $D_{\text{внутр}} = 200$ мм.

Рабочая скорость газа при этих условиях

$$w_{\text{р}} = \frac{V}{0,785 D_{\text{внутр}}^{\ 2}} = \frac{100}{3600 \cdot 0,785 \cdot 0,2^2} = 0,885 \text{ м/с.} \qquad (3.41)$$

Предварительно принимаем общую высоту насадки $H_{\text{нас}} = 0,4$м

$$h_{экв} = \frac{w}{K} \frac{H_{нас}^{0,25}}{1-(7,5-55,2d)\sqrt{U}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_г}{\rho_ж}} \cdot \frac{1+D}{1-0,34(d/D)-8,4(d/D)^2} =$$

$$= \frac{1,25}{0,3} \frac{0,4^{0,25}}{1-(7,5-55,2 \cdot 0,025)\sqrt{0,000983}} \cdot \sqrt{\frac{1,13}{1099}} \cdot$$

$$\cdot \frac{1+0,2}{1-0,34(0,025/0,2)-8,4(0,025/0,2)^2} =$$

$$= 0,191\text{м}$$

$$U = \frac{4L_m}{\rho_ж \pi D^2} = \frac{4 \cdot 122}{1099 \cdot 3,14 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 0,000983\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$$

$$H_{\text{нас}} = h_{\text{э}} \cdot n_{\text{т}} = 0,191 \cdot 2 = 0,382\text{м}$$

По итогам расчета понятно, что мы приняли $H_{\text{нас}} = 0,4$м с запасом.

3.1.1.5 Расчет потерь давления в колонном аппарате

Гидравлическое сопротивление слоя насадки будем рассчитывать в два этапа.

Определим сопротивление слоя сухой насадки [19].

$$\Delta p_{\text{сух}} = \xi_0 \frac{H'}{d_{\text{экв}}} \frac{\rho_{\text{г}}}{2} \left(\frac{w_{\text{р}}}{\varepsilon} \right)^2, \qquad (3.42)$$

где H'– высота слоя насадки, $H' = 0,240$ м;

ξ_0 – коэффициент сопротивления сухой насадки;

$d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр насадки, м.

Коэффициент сопротивления сухой насадки определим, как

$$\xi_0 = \frac{A}{\text{Re}_{\text{г}}^b}, \qquad (3.43)$$

где $\text{Re}_{\text{г}}$ – критерий Рейнольдса для газовой фазы [36].

Критерий Рейнольдса для газовой фазы, определяется

$$\text{Re}_{\text{г}} = \frac{4W_{\text{г}}}{a\mu_{\text{г}}}, \qquad (3.44)$$

где $\mu_{\text{г}}$ – коэффициент динамической вязкости газовой фазы при температуре $t = 50\,^{\circ}\text{C}$ [21], $\mu_{\text{г}} = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с; $W_{\text{г}}$ – массовая скорость газа, кг/(м^2·с).

Массовая скорость газа, определяется

$$W_г = \frac{\bar{G}}{3600S}, \qquad (3.45)$$

где S – площадь сечения абсорбера, м^2.

Площадь сечения абсорбера

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}2^2}{4} = 0{,}0314 \text{ м}^2. \qquad (3.46)$$

$$W_г = \frac{100}{3600 \cdot 0{,}0314} = 0{,}885 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}.$$

$$\mathrm{Re}_г = \frac{4 \cdot 0{,}885}{263 \cdot 1{,}8 \cdot 10^{-5}} = 748.$$

Исходя из значения коэффициента Рейнольдса и вида насадки определяются коэффициенты $A = 40{,}73$ и $b = 0{,}307$ [19].

Подставив найденные значения в (3.43) определим коэффициент сопротивления сухой насадки.

$$\xi_0 = \frac{40{,}73}{748^{0{,}307}} = 5{,}34.$$

$$\Delta p_{сух} = 5{,}34 \frac{0{,}24}{0{,}015} \frac{1{,}13}{2} \left(\frac{0{,}885}{0{,}74} \right)^2 = 69 \text{ Па}.$$

По зависимости В.В. Кафарова приближенно рассчитаем сопротивление слоя орошаемой насадки, учитывающую нагрузку по газу и жидкости, а также физические свойства сред [19].

$$\Delta p = \Delta p_{сух} K, \qquad (3.47)$$

где K – коэффициент, для систем газ-жидкость, определяется как

$$K = 1 + 8{,}4 \left(\frac{\bar{L}}{\bar{G}} \right)^{0{,}405} \left(\frac{\rho_г}{\rho_ж} \right)^{0{,}235} \left(\frac{\mu_ж}{\mu_г} \right)^{0{,}045} \qquad (3.48)$$

при

$$\left(\frac{\bar{L}}{\bar{G}} \right)^{1{,}8} \left(\frac{\rho_г}{\rho_ж} \right) \left(\frac{\mu_ж}{\mu_г} \right)^{0{,}2} < 0{,}5, \qquad (3.49)$$

где $\mu_{воды}$ – динамическая вязкость воды при температуре $t = 50$ °С, $\mu_{воды} = 54{,}9 \cdot 10^{-5}$ Па · с [21].

$$\left(\frac{122}{100} \right)^{1{,}8} \left(\frac{1{,}13}{1099} \right) \left(\frac{54{,}9 \cdot 10^{-5}}{1{,}8 \cdot 10^{-5}} \right)^{0{,}2} = 0{,}003 < 0{,}5.$$

$$K = 1 + 8{,}4 \left(\frac{122}{100} \right)^{0{,}405} \left(\frac{1{,}13}{1099} \right)^{0{,}235} \left(\frac{54{,}9 \cdot 10^{-5}}{1{,}8 \cdot 10^{-5}} \right)^{0{,}045} = 3{,}103.$$

Подставив полученные данные в (3.55), получим следующие значения гидравлического сопротивления насадки

$$\Delta p = 69 \cdot 3{,}103 = 214{,}1 \text{ Па}.$$

3.1.1.6 Расчет штуцеров

В лабораторной колонне штуцера будут заменены патрубками, к которым хомутами будут присоединяться шланги.

Диаметр штуцера для входа газа с содержанием CO_2 в абсорбер

$$D=\sqrt{\frac{4L}{\pi w \rho_{газ}}}=\sqrt{\frac{4\cdot 0,0278}{3,14\cdot 15\cdot 1,13}}=0,0457\text{ м}, \qquad (3.50)$$

где $w-$ скорость газа на входе в абсорбер принимается согласно [37], $w=15$ м/с.

Диаметр штуцера для выхода газа

$$D=\sqrt{\frac{4L}{\pi w \rho_{газ}}}=\sqrt{\frac{4\cdot 0,0259}{3,14\cdot 13\cdot 1,13}}=0,0474\text{ м}. \qquad (3.51)$$

Диаметра штуцера для входа МЭА

$$D=\sqrt{\frac{4G_0}{\pi w \rho_{жид}}}=\sqrt{\frac{4\cdot 0,0339}{3,14\cdot 0,5\cdot 1099}}=0,00887\text{ м}. \qquad (3.52)$$

где $w-$ скорость МЭА на входе в абсорбер принимается согласно [9], $w=0,5$ м/с.

Диаметра штуцера для выхода МЭА

$$D=\sqrt{\frac{4G_0}{\pi w \rho_{жид}}}=\sqrt{\frac{4\cdot 0,0339}{3,14\cdot 1\cdot 1099}}=0,00627\text{ м}. \qquad (3.53)$$

Полученные данные по диаметрам штуцеров приводим к стандартным значениям труб [38] и заносим в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Таблица штуцеров для абсорбционной колонны

Наименование штуцера	Расход сред, кг/с	Плотность сред, кг/м^3	Скорость, м/с	Количество	Диаметр, мм	
					Расчётный	Принятый
Вход газа	0,0278	1,13	15	1	46	70
Выход газа	0,0259	1,13	13	1	48	60
Вход МЭА	0,0339	1099	1	1	9	20
Выход МЭА	0,0339	1099	1	1	6	70

3.1.2 Прочностной расчёт абсорбционной колонны

Целью прочностного расчета является определение размеров основных элементов разрабатываемой колонны абсорбции исходя из условия прочности.

В качестве исходных данных для проведения прочностного расчёта будут использованы следующие геометрические характеристики лабораторной колонны абсорбции:

- высота царг: $H_1 = H_2 = H_3 = 430$ мм;
- высота распределителя жидкости $H_{расп} = 170$ мм;
- высота кубовой части $H_{куб} = 530$ мм;
- высота царги с распределителем газа $H_{расп.г} = 183$ мм;
- внутренний диаметр колонны $D = 200$ мм;
- толщина стенки колонны $s = 5$ мм;
- толщина фланца $s_ф = 20$ мм;
- наружный диаметр фланца $D_ф = 285$ мм;
- слой насадки – кольца Рашига 25;
- общая высота слоя насадки $H_{сл} = 480$ мм;
- давление в аппарате атмосферное $p_{абс} = 0{,}1$ МПа

3.1.2.1 Определение расчетных параметров

За расчетную температуру принимается наибольшая температура стенки, соприкасающейся со средой, следовательно максимальная температура в колонне равна $t = 50°C$.

Расчетное давление принимается как максимальное рабочее давление или давление выше (ниже) рабочего. Аппарат работает при атмосферном давлении, т.е. расчетное давление равно нулю $p_{расч} = 0$. Исходя из этого следует, что давление наблюдается только при гидроиспытаниях.

Давление при гидроиспытании:

$$p_{ги} = p_{пр} + \rho g h, \tag{3.54}$$

где ρ – плотность воды при $t = 20$ °С [14, табл. IV], $\rho = 998$ кг/м^3;

g – ускорение свободного падения, $g = 9{,}81$ м/с;

h – высота цилиндрической части обечайки, м.

Высота цилиндрической части обечайки

$$H = H_{расп} + H_{куб} + H_{расп.г} + H_1 \cdot 3 + H_{п1} + H_{п2} + H_{п3} + H_{п4} + H_{п5} + H_{п6}, \tag{3.55}$$

где $H_{п1} - H_{п6}$ – прибавки на толщину прокладочного материала для абсорбционной колонны.

$$H = 0{,}175 + 0{,}530 + 0{,}43 \cdot 3 + 0{,}183 + 0{,}003 + 0{,}003 +$$
$$+0{,}003 + 0{,}003 + 0{,}003 + 0{,}003 = 2{,}196 \text{ м}.$$

$$p_{\text{ги}} = 0 + 998 \cdot 9{,}81 \cdot 2{,}196 = 21499{,}7\,\text{Па} = 0{,}021\,\text{МПа}.$$

Допускаемое напряжение при гидроиспытании:

$$[\sigma]_{\text{ги}} = \frac{\sigma_{\text{Т}}^{20}}{n_{\text{Т}}}, \qquad (3.56)$$

где $\sigma_{\text{Т}}^{20}$ – предел текучести для стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-2014 [39, табл. Б7], $\sigma_{\text{Т}}^{20} = 276\,\text{МПа}$;

$n_{\text{Т}}$ – коэффициент запаса прочности по пределу текучести в условиях испытаний, $n_{\text{Т}} = 1{,}1$.

$$[\sigma]_{\text{ги}} = \frac{276}{1{,}1} = 251\ \text{МПа}.$$

Общее значение прибавки к расчётной толщине стенки

$$c = c_1 + c_2 + c_3 = 1\ \text{мм},$$

где c_1 – прибавка для компенсации коррозии и эрозии, $c_1 = 1$ мм;

c_2 – прибавка для компенсации минусового допуска, не учитывается из-за малых габаритов аппарата;

c_3 – прибавка для компенсации утонения стенки при технологических операциях, не учитывается из-за малых габаритов аппарата.

Для аппарата со сроком службы $\tau = 10$ лет, и скорость коррозии $v = 0{,}1$ мм/год.

Расчетная толщина стенки обечайки в условиях гидроиспытаний:

$$s_{\text{ги}} = \frac{p_{\text{ги}} D}{2\varphi[\sigma]_{\text{ги}} - p_{\text{ги}}}, \qquad (3.57)$$

где φ – коэффициент прочности стыкового сварного шва с двухсторонним сплошным проваром, выполняемый автоматической и полуавтоматической сваркой, принимается в условиях гидроиспытаний, $\varphi = 1$.

$$s_{\text{ги}} = \frac{0{,}021 \cdot 200}{2 \cdot 1 \cdot 251 - 0{,}021} = 0{,}0084\ \text{мм}.$$

Добавляем прибавку к расчётной толщине обечайки:

$$s = 1 + 0{,}0084 = 1{,}0084\ \text{мм}.$$

Принимаем стандартную толщину стенки обечайки $s = 3$ мм.

Допускаемое напряжение при гидроиспытании для органического листового стекла СО-95.

Цилиндрическая часть обечайки склеена смолой ЭД-20, поэтому прочность шва может отличаться от прочности обечайки из органического стекла. Напряжения растяжения смолы ЭД-20 по [40] составляют 40 – 90 МПа. Таким образом, коэффициент прочности шва принимается $\varphi \approx 55/66 = 0{,}833$.

$n_{\text{Т}}$ – коэффициент запаса прочности по пределу текучести в условиях испытаний, $n_{\text{Т}} = 1{,}1$ [39].

$$[\sigma]_{ги} = \frac{0,833 \cdot 66}{1,1} = 50 \text{ МПа}.$$

Общее значение прибавки к расчётной толщине стенки:

$$c = c_1 + c_2 + c_3 = 0 \text{ мм},$$

где c_1 – прибавка для компенсации коррозии и эрозии не учитывается ввиду коррозионной устойчивости органического стекла;

c_2 – прибавка для компенсации минусового допуска, не учитывается из-за малых габаритов аппарата;

c_3 – прибавка для компенсации утонения стенки при технологических операциях.

Расчетная толщина стенки обечайки в условиях гидроиспытаний:

$$s_{ги} = \frac{0,021 \cdot 200}{2 \cdot 50 - 0,021} = 0,042 \text{ мм}.$$

Принимаем стандартную толщину стенки обечайки $s = 5$ мм.

3.1.2.2 Расчет внутреннего объема аппарата

Для расчета внутреннего объема аппарата необходимо определить объем внутренней полости и вычесть объем внутренних устройств.

Объем внутренней полости аппарата определяется

$$V_П = \left(\sum_{i=1}^{5} H_i + \sum_{i=1}^{5} H_{Пi} \right) \frac{\pi D^2}{4}, \quad (3.58)$$

где $H_{Пi}$ – толщина промежутков между царгами (или царгой и основанием).

$$V_П = \frac{(430 \cdot 3 + 530 + 175 + 183 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3) \frac{3,14 \cdot 200^2}{4}}{10^9} = 0,069 \text{ м}^3.$$

Все внутренние устройства за исключением насадки являются тонкостенными и не занимают более 5 – 10 % внутренней части аппарата. Поэтому их величины объема не учитываются для дальнейшего расчета.

Полный объем жидкости:

$$V_о = V_П \frac{(100 - n_{уст})}{100} - \frac{\pi D^2}{4} H_{сл} (1 - \varepsilon), \quad (3.59)$$

$$V_о = 0,069 \frac{(100 - 7,5)}{100} - \frac{3,14 \cdot 0,2^2}{4} 0,48(1 - 0,74) = 0,0599 \text{ м}^3.$$

3.1.2.3 Определение массы аппарата

Наибольшую массу аппарат имеет во время гидроиспытаний.

Суммарная масса аппарата определяется:

$$M_А = M_Э + M_Н + M_Ж, \quad (3.60)$$

где $M_Э$ – масса элементов аппарата, кг;

$M_{н}$ – масса насадки, кг;

$M_{ж}$ – масса жидкости, кг.

Масса жидкости определяется:

$$M_{ж} = V_{о}\rho_{ж}, \tag{3.61}$$

где $\rho_{ж}$ – плотность воды при гидроиспытании, $\rho_{ж} = 997$ кг/м^3.

$$M_{ж} = 0,0599 \cdot 997 = 59,7 \text{ кг}.$$

Масса насадки определяется:

$$M_{Н} = \frac{\pi D^2}{4} H_{сл}\gamma_{н}, \tag{3.62}$$

где $\gamma_{н}$ – масса 1 м^3 насадки, $\gamma_{н} = 530$ кг/м^3.

$$M_{Н} = \frac{3,14 \cdot 0,2^2}{4} 0,48 \cdot 530 = 8 \text{ кг}.$$

Масса элементов абсорбера складывается из массы царг, массы внутренних устройств и крепежных элементов (около 10 % от массы царг), массы основания. Массу аппарата, включая крепежные элементы возьмем из 3D-модели (рисунок 3.6).

Рисунок 3.6 – Масса колонны абсорбции по 3D – модели

В качестве опоры используются уголки (4 шт), которые привариваются к кубовой части аппарата. Длина уголков $L_{у}$ = 400 мм, погонная масса: 3,05 кг/м. Уголки крепятся на цилиндрической части куба, на расстоянии 180 мм от штуцера *Г* (рисунок 3.7). Масса основания будет рассчитана с полной длиной уголков, а при расчете опор это пойдет в запас.

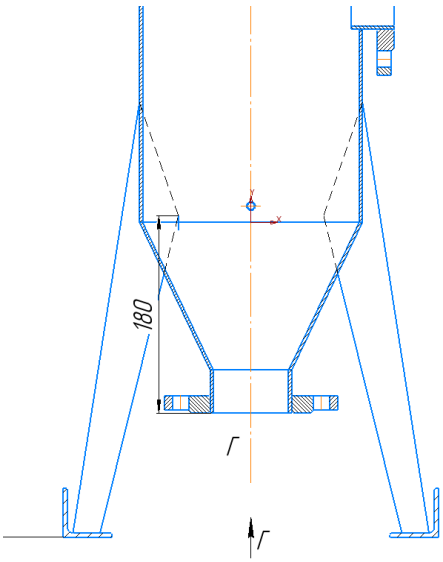


Рисунок 3.7 – Опора колонного аппарата

$$M_{\text{ОСН}} = 4 \cdot 0,40 \cdot 3,05 = 4,88 \text{кг}.$$

Масса всего аппарата:

$$M_{\text{АП}} = 59,7 + 8 + 75,5 + 4,88 = 148 \text{ кг}.$$

3.1.2.4 Расчет цилиндрической обечайки абсорбера

Действующая сила в рабочих условиях:

$$F = M \cdot 9,8 = 148 \cdot 9,8 = 1450 \text{ Н}. \quad (3.63)$$

Допускаемая осевая сжимающая сила

$$[p]_1 = \frac{[p]_{1\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{1\text{п}}}{[p]_{1\text{E}}}\right)}}, \quad (3.64)$$

где $[p]_{1\text{п}}$ – допускаемая осевая сжимающая сила из условий прочности;

$[p]_{1\text{E}}$ – допускаемая осевая сжимающая сила из условий устойчивости в пределах упругости.

Допускаемая осевая сжимающая сила из условий прочности

$$[p]_{1\text{п}} = \pi(D + s + c)(s - c)[\sigma]^t; \quad (3.65)$$

$$[p]_{1\text{п}} = 3,14(0,2 + 0,005)0,005 \cdot 66 = 0,212 \text{ МН}.$$

Допускаемая осевая сжимающая сила из условий устойчивости в пределах упругости.

$$[p]_{1\text{E}} = \min\left\{[p]_{1\text{E}_1}; [p]_{1\text{E}_2}\right\}, \quad (3.66)$$

где $[p]_{1\text{E}_1}$ – допускаемая осевая сжимающая сила из условия местной устойчивости в пределах упругости;

$[p]_{1E_2}$ – допускаемая осевая сжимающая сила из условия общей устойчивости в пределах упругости.

Допускаемая осевая сжимающая сила из условия местной устойчивости в пределах упругости

$$[p]_{1E_1} = \frac{310 \cdot 10^{-6} E}{n_y} D^2 \left[\frac{100(s-c)}{D} \right]^{2,5}, \qquad (3.67)$$

где E – модуль продольной упругости СО-95 [41], $E = 3000$ МПа;

n_y – коэффициент запаса устойчивости, $n_y = 2,4$.

$$[p_1]_{E1} = \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot 3000}{2,4} 0,2^2 \left[\frac{100 \cdot 0,005}{0,2} \right]^{2,5} = 0,153 \text{МН}.$$

Допускаемая осевая сжимающая сила из условия общей устойчивости в пределах упругости

$$[p]_{1E_2} = \frac{\pi(D+s+c)(s-c)E}{n_y} \left(\frac{\pi}{\lambda_{пр}} \right)^2, \qquad (3.68)$$

где $\lambda_{пр}$ – гибкость конструкции, определяется

$$\lambda_{пр} = \frac{2,83 l_{пр}}{D+s-c}, \qquad (3.69)$$

где $l_{пр}$ – высота цилиндрической части обечайки, $l_{пр} = H = 0,43$ м.

$$\lambda_{пр} = \frac{2,83 \cdot 0,43}{0,2+0,005} = 5,94.$$

$$[p]_{1E_2} = \frac{3,14(0,2+0,005) \cdot 0,005 \cdot 3000}{2,4} \left(\frac{3,14}{5,94} \right)^2 = 1,13 \text{ МН}.$$

$$[p]_{1E} = \min\{0,153; 1,13\} = 0,153 \text{ МН}.$$

$$[p]_1 = \frac{0,212}{\sqrt{1 + \left(\frac{0,153}{0,212} \right)}} = 0,137 \text{ МН}.$$

Проверка абсорбционной колонны на устойчивость:

$$\frac{p_{ГИ}}{[p_1]} \le 1; \qquad (3.70)$$

$$\frac{0,021}{0,137} = 0,153 \le 1.$$

Условие устойчивости выполняется.

3.2 Прочностной анализ царги колонны абсорбции

Для проверки царги колонны на прочность был использован один из модулей программного комплекса «APM WinMachine». Перед проведением расчета была спроектирована 3D модель колонного аппарата. Полная модель колонны представлена на рисунке 3.8.

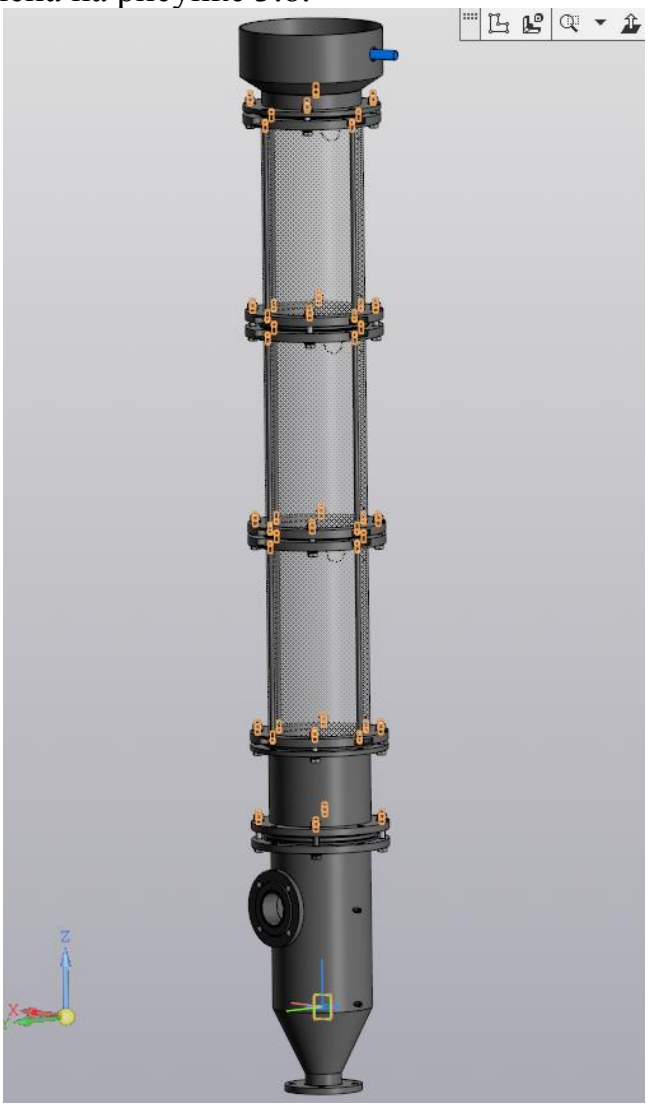


Рисунок 3.8 – Колонна абсорбции

3.2.1 Прочностной анализ в модуле APM Structure 3D

Основной моделью расчета будет являться модель царги колонны (самая нижняя), которая рассчитывается от осевой силы. На прочность будет проверяться именно часть из оргстекла, т.к. в ней имеются отверстия под штуцера.

Величина ячеек расчетной сетки является основным показателем соотношения быстроты и качества проводимого расчета. Для проведения расчета был выбран размер сетки 2 мм. На рисунке 3.9 приведена модель с размерами КЭ сетки 2 мм.

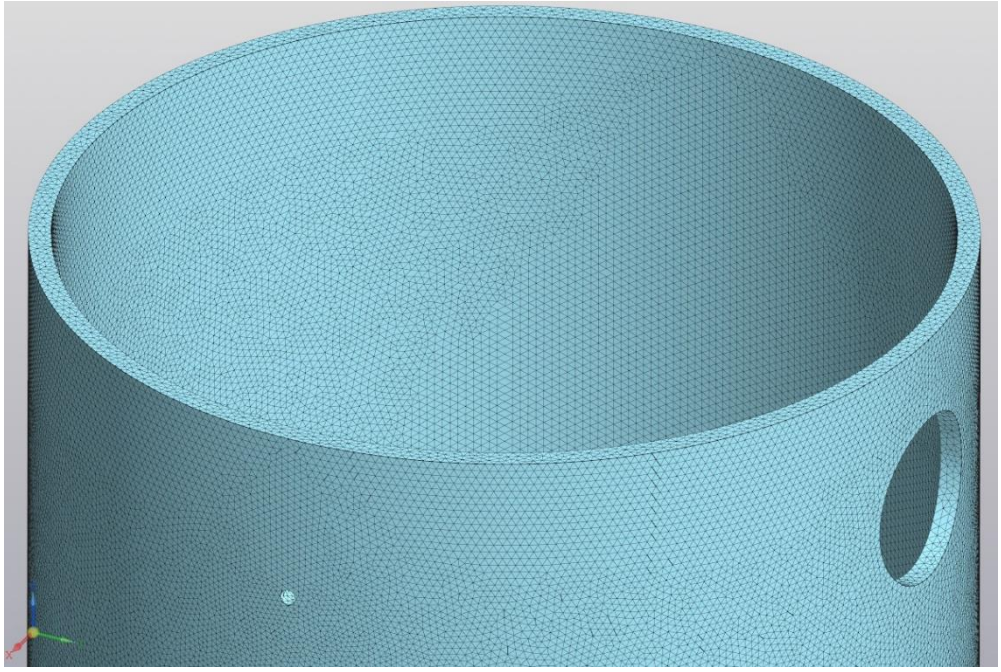


Рисунок 3.9 – КЭ сетка с размером кусков 2 мм

Для ячеек 2 мм был проведен расчет в программе APM Structure 3D. Модель была закреплена жесткой заделкой по нижней поверхности, осевая нагрузка была приложена сверху (рисунок 3.10). Величина осевой нагрузки это масса царг, расположенных выше при гидроиспытании - 628Н, а также болтовая стяжка – 400Н.

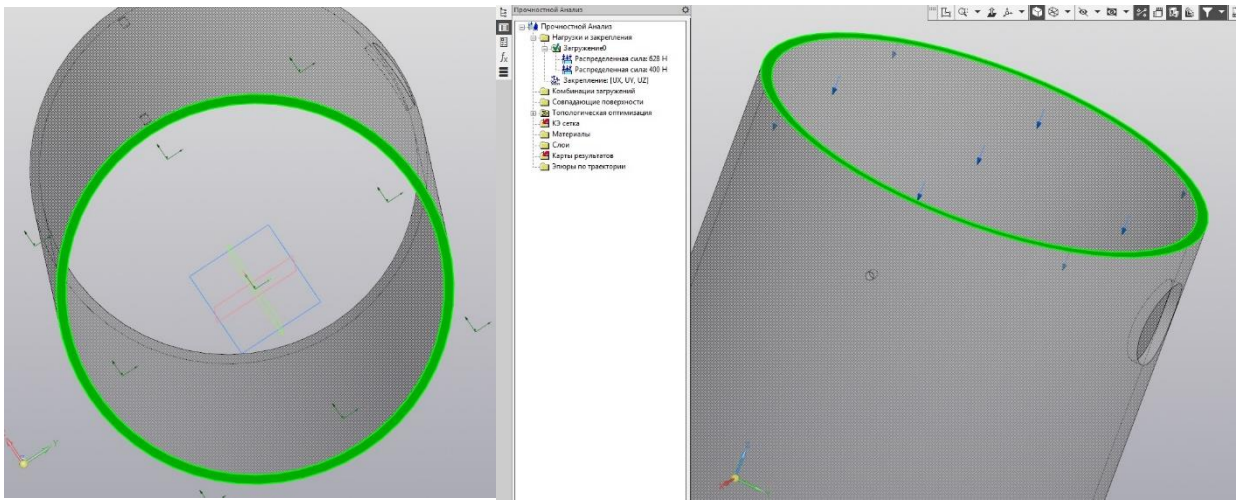


Рисунок 3.10 – Расположение закрепления и нагрузки

В результате расчета были получены результаты, представленные на рисунке 3.11.

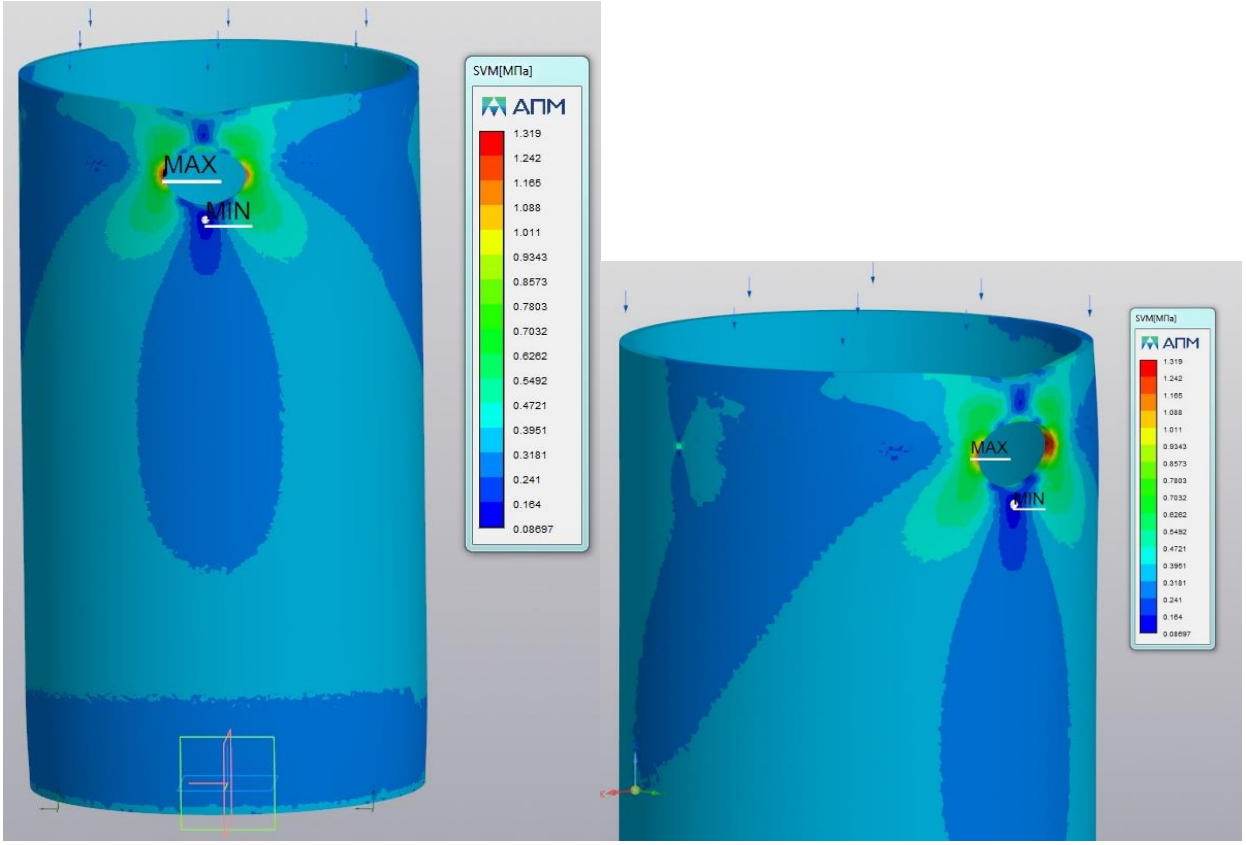


Рисунок 3.11 – Результаты расчета в программе APM Structure 3D

По полученным данным делаем вывод о том, что максимальные напряжения 1,3 МПа, возникающие в результате нагрузки – не являются опасными, т.е. не превышают допускаемое напряжение для органического стекла – 50 МПа. По карте результатов видно, что значительное увеличение напряжений приходится именно на отверстие.

4 ОРГАНИЗАЦИОННО – ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ

4.1 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 [42]:

$$t_{ож} = \frac{3a + 2b}{5}, \qquad (4.1)$$

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 4.1:

Таблица 4.1 – Виды работ и затраты времени

№ п/п	Наименование работы	Исполнитель	Оценка длительности работы		
			a	b	$t_{ок}$
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	Доразработка чертежей	студент	14	18	15,6
7	Изготовление внутренних устройств аппарата	слесарь	5	6	5,4
8	Разработка методики проведения эксперимента	студент, инженер	3	4	3,4
9	Монтаж внутренних устройств в аппарате	студент, инженер	1	1,5	1,2
10	Подключение аппарата к схеме	электрик	1	1,5	1,2
11	Проведение экспериментов	студент, инженер	20	25	22
12	Ввод результатов экспериментов в ЭВМ	студент	2	3	2,4

Продолжение таблицы 4.1

13	Обработка результатов экспериментов	студент, инженер	3	4	3,4
14	Оформление графиков	студент	3	5	3,8
15	Оформление записки	студент	9	11	9,8
16	Утверждение проекта	студент	1	2	1,4
17	Подготовка к защите	студент	1	2	1,4
18	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

$$t_{pj} = t_{pi} + t_{ij}, \tag{4.2}$$

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

$$t_{nj} = t_{nj} - t_{ij}, \tag{4.3}$$

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

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

3) резерв времени события определяется по формуле

$$R_i = t_{ni} - t_{pi}, \tag{4.4}$$

Расчеты основных параметров сетевого графика заносим в таблицу 6, а обозначение событий и график приведена на рисунке 4.1 и 4.2 соответственно.

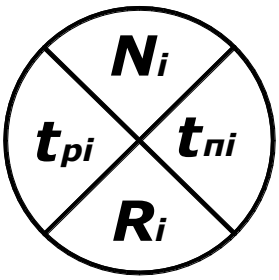


Рисунок 4.1 – Обозначение событий

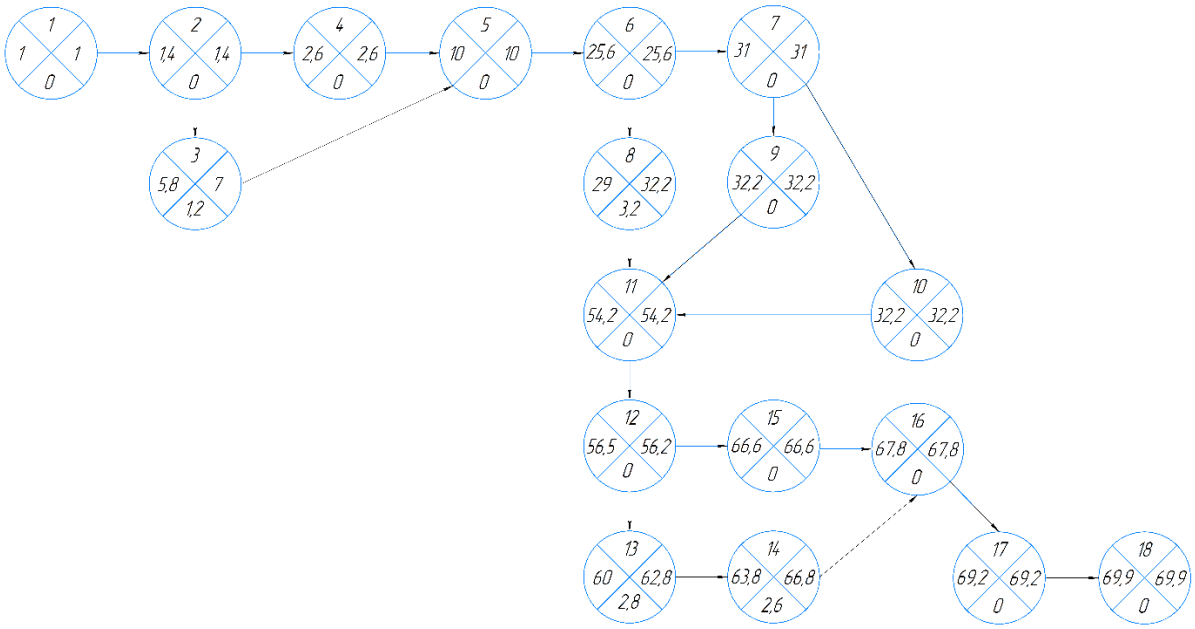


Рисунок 4.2 – Сетевой график

Таблица 4.2 – Время свершения событий

№ п/п	Наименование работы	t_p, дней	t_n, 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	32,2	3,2
9	Внутренние устройства смонтированы	32,2	32,2	0
10	Аппарат подключен к схеме	32,2	32,2	0
11	Эксперименты проведены	54,2	54,2	0
12	Результаты экспериментов введены в ЭВМ	56,6	56,6	0
13	Результаты экспериментов обработаны	60	62,8	2,8
14	Графики оформлены	63,8	66,6	2,8
15	Записка оформлена	66,6	66,6	0
16	Проект утвержден	67,8	67,8	0
17	Подготовка к защите закончена	69,2	69,2	0
18	Защита проведена	69,9	69,9	0

На сетевом графике представлены все данные из таблицы 4.2.

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

Критический путь:

1-2-4-5-6-7-9-11-12-15-16-17-18

Для выполнения всего комплекса работ по сетевому графику необходимо 69,9 рабочих дня или $\frac{69,9 \cdot 7}{6} = 81,55 \approx 82$ календарных дня.

При анализе сетевого графика рассчитываем вероятность свершения конечного события в срок. Считается, что вероятность должна находиться в пределах [42]:

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

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 [42]:

$$z = \frac{T_З - T_К}{\sqrt{\sum_{ij} \sigma_{tij}^{\ 2}}}, \tag{4.5}$$

где z – аргумент нормальной функции распределения вероятностей;

$T_З$ – заданный срок свершения конечного события, $T_З = 70$ дн.;

$T_К$ – срок свершения завершающего события, $T_К = 69,9$ дн.;

$\sigma_{tij}^{\ 2}$ - дисперсия работы, лежащей на критическом пути. Определяется по формуле (4.6)

$$\sigma_{tij}^{\ 2} = \sum 0,04(b-a)^2. \tag{4.6}$$

Рассчитав дисперсию на критическом пути, получим сумму

$$\sum \sigma_{tij}^{\ 2} = 4,84;$$

$$z = \frac{70 - 69,9}{\sqrt{4,84}} = 0,045.$$

По таблице [42] определяем $P_K = 0,53$.

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

Следовательно, график является напряженным.

4.2 Расчет полной себестоимости исследований

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.

4.2.1 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.

4.2.1.1 Расчет затрат на канцелярские принадлежности

Статьи по этому разделу приведены в таблице 4.3

Таблица 4.3 – Затраты на канцтовары

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

4.2.1.2 Расчет основной заработной платы исследователей в период проектирования

Стоимость работ исследователей складывается из:
- заработной платы инженера;
- заработной платы преподавателя.
Оклад инженера составляет 15000 руб.
Оклад преподавателя 20500 руб.
Длительность работ по проектированию лабораторной колонны составляет:
- у инженера 30 календарных дней;
- у преподавателя 8 рабочих дней или $\frac{9 \cdot 7}{6} = 9,3$ календарных дня.

Таблица 4.4 – Данные о заработной плате исследователей

Должность	Месячный оклад, руб.	Зарплата за один рабочий день, руб.
Инженер	15000	451,2
Преподаватель	20500	820

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

Зарплата преподавателя за один рабочий день $\frac{20500}{25} = 820$ руб.

Таблица 4.5 – Затраты на заработную плату в период проектирования

Должность	Затрачено дней	Зарплата, руб/день	Сумма основной зарплаты, руб.
Инженер	30	600	18000
Преподаватель	9,3	820	7626
Итого:			25626

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

Сумма основной зарплаты преподавателя $9,3 \cdot 820 = 7626$ руб.

Таким образом, сумма основной заработной платы по проектированию лабораторной установки составляет 25626 руб.

4.2.1.3 Расчет дополнительной заработной платы исследователей в период проектирования

Дополнительная заработная плата составляет 25% от основной заработной платы.

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

Сумма дополнительной зарплаты преподавателя $7626 \cdot 0,25 = 1906,5$ руб.

Таким образом, сумма дополнительной заработной платы по проектированию лабораторной установки составляет 6407 рублей.

4.2.1.4 Расчет отчислений на социальные нужды

Отчисления на социальные нужды составляют 30,2% от основной и дополнительной заработной платы.

$$0,302 \cdot (25626 + 6407) = 9337 \text{ руб.}$$

Таблица 4.6 – Затраты на установку в период проектирования

№ п/п	Наименование статьи расхода	Сумма
1	Затраты на канцелярские принадлежности	450
2	Основная з/п сотрудников	25626
3	Дополнительная з/п сотрудников	6407
4	Отчисления на социальные нужды	9337
Итого:		41820

В итоге сумма затрат на проектирование составляет 41820 руб. Можно заключить, что максимальная часть затрат сосредоточена на заработной плате сотрудников.

4.2.2 Расчет затрат на монтаж лабораторной установки

4.2.2.1 Расчет затрат на оборудование

В процессе проектирования установки был произведен выбор необходимого оборудования (насосно – компрессорное оборудование, иное вспомогательное оборудование), материалов (материалы корпуса лабораторной колонны, уплотнительные материалы и герметики, гибкие шланги), узлов и приборов (контрольно-измерительные приборы, пусковые устройства, трубопроводная арматура).

Основной статьей затрат на монтаж лабораторной установки будет являться стоимость этих элементов установки и стоимость транспортных средств, которые сведены в таблицу 4.7.

Таблица 4.7 – Стоимость оборудования

№ п/п	Наименование	Количество	Ед. изм.	Цена единицы, руб.	Сумма, руб.
1	2	3	4	5	6
Трубы и арматура					
1	Труба DN15	10	п.м	47	470
2	Труба DN25	14	п.м	107	1498
3	Труба DN32	6	п.м	142	852
4	Клапан запорный с пневмоприводом KSHNFPA020 DN15	2	шт.	8594	17188
5	Клапан запорный с пневмоприводом KSHNFPA020 DN25	4	шт.	9642	38568
6	Кран шаровый DN15	3	шт.	519	1157
7	Кран шаровый DN25	4	шт.	1103	4412
8	Вентиль DN15	4	шт.	3500	14000
9	Вентиль DN25	4	шт.	5500	22000
10	Вентиль DN32	1	шт.	4000	4000
Итого					104145
Оборудование					
11	Фильтр ER-G100D25B130 1,5 BSP	1	шт.	4422	4422
12	Компрессор DENZEL PC2/100-370	1	шт.	21757	21757
13	Циркуляционный насос Grundfos UPS 25-40	2	шт.	5529	11028
14	Бак STPUT STW-002-000100	2	шт.	6210	12420
15	Скруббер ЦС №3	1	шт.	9057	9057
16	Колонна абсорбции К2	1	шт.	24100	24100
17	Колонна десорбции К3	1	шт.	8900	8900
18	Насос вихревой ВК-1/16	6	шт.	11100	66600
19	Холодильник воды Т2	1	шт.	5400	5400
20	Холодильник моноэтаноламина Т3	1	шт.	5720	5720
21	Рекуператор поточный	1	шт.	10300	10300
22	Ребойлер	1	шт.	14300	14300
23	Холодильник CO_2	1	шт.	6400	6400
24	Холодильник водный	1	шт.	6500	6500
Итого					206904
Контрольно-измерительные приборы					
25	Регулятор ОВЕН ТРМ1	15	шт.	2820	42300
26	Датчик температуры ОВЕН ДТС054-50М.В3.60/1	10	шт.	1032	5160

Продолжение таблицы 4.7

27	Преобразователь расхода вихревой электромагнитный ВПС1-ЧИ2.54	5	шт.	16700	83500
38	Датчик уровня ОВЕН ПДУ4-1	2	шт.	1680	3360
29	Ротаметр жидкости РМ-02-0.016 ЖУЗ	14	шт.	5000	70000
30	Ротаметр газа РМ-2,5 ГУЗ-К	1	шт.	7600	7600
31	Выключатель автоматический IEK BA47-29	5	шт.	220	1100
32	Кабель ПРГД 07	5	м	170	850
Итого:					213870
Итого (статья расходов 1-32):					524919
33	Прочие расходы				20000
Итого (статья расходов 1-33):					544919
34	Транспортные расходы	9% от суммы статей расходов 1-34			49042,71
Итого (статья расходов 1-34):					593961,71

Таблица демонстрирует, что основная часть от общей предполагаемой суммы затрат на лабораторную установку приходится на оборудование и приборы.

4.2.2.2 Расчет услуг сторонних организаций

Монтаж лабораторной установки осуществляется с использованием услуг сторонних организаций. В работе участвовали: слесарь 4-го разряда (монтаж трубопроводов и трубопроводной арматуры) с тарифной ставкой повременщика при нормальных условиях труда 80 руб/ч и электромонтер 6-го разряда (подключение насосов, установка КИП) с тарифной ставкой 110 руб/ч.

Таблица 4.8 – Стоимость услуг сторонних организаций

Должность	Затрачено дней	Тарифная ставка	Зарплата, руб.
Слесарь	5,4	80	3456
Электромонтер	1,2	110	1056
Итого:			4512

Оплата работы слесаря составит $5,4 \cdot 8 \cdot 80 = 3456$ руб.

Оплата работы электромонтера составит $1,2 \cdot 8 \cdot 110 = 1056$ руб.

Стоимость услуг сторонних организаций составляет 4512 руб.

4.2.2.3 Расчет основной заработной платы исследователей в период испытаний установки

Длительность работ по испытанию лабораторной колонны составляет:
- у инженера 20 календарных дней;
- у преподавателя 10 рабочих дней или $\frac{10 \cdot 7}{6} = 11,67$ календарных дня.

Таблица 4.9 – Затраты на заработную плату в период испытаний

Должность	Затрачено дней	Зарплата, руб/день	Сумма основной зарплаты, руб.
Инженер	20	600	12000
Преподаватель	11,67	820	9569,4
Итого:			21569,4

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

Сумма основной зарплаты преподавателя $11,67 \cdot 820 = 9569,4$ руб.

Сумма основной заработной платы на испытания лабораторной установки составляет 21569,4 руб.

4.2.2.4 Расчет дополнительной заработной платы исследователей в период испытаний установки

Дополнительная заработная плата составляет 25% от основной заработной платы.

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

Сумма дополнительной зарплаты преподавателя
$9569,4 \cdot 0,25 = 2392,4$ руб.

Таким образом, сумма дополнительной заработной платы на испытания лабораторной установки составляет 5392,4 рублей.

4.2.2.5 Расчет отчислений на социальные нужды

Отчисления на социальные нужды составляют 30 + (0,2 – 8,5)% от основной и дополнительной заработной платы.

Принимаем отчисления на социальное страхование в размере 31% от основной и дополнительной заработной платы, т.е.

$$0,302 \cdot (21569,4 + 5392,4) = 8142 \text{ руб.}$$

4.2.2.6 Расчет затрат, связанных с использованием установки во время испытаний

Учитывая характер исследовательской работы, стоит отметить, что расчет затрат, связанных с использованием установки, сводится к расчету затрат на электроэнергию, расход воды и моноэтаноламина.

Таблица 4.10 – Затраты на электроэнергию и сырье в период испытаний

Оборудование	Количество	Мощность, кВт	Цена, руб/кВт·ч	Потребление сырья и энергетических ресурсов, $м^3$	Сырье и энергетические ресурсы	Цена за единицу теплоносителя, руб/$м^3$	Время работы, ч	Сумма, руб.
Насос циркуляционный	2	0,04	5,9	8	Вода	15,6	8	178,5
Насос вихревой	6	1,2	5,9	0,1	Моноэтаноламин	107000	-	10742,5
Компрессор	1	2,2	5,9	-	-	-	8	103,8
Итого								10982,3

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

- для циркуляционного насоса $2 \cdot 0,04 \cdot 8 \cdot 5,9 + 8 \cdot 15,6 = 178,5$ руб;
- для вихревого насоса $6 \cdot 1,2 \cdot 8 \cdot 5,9 + 0,1 \cdot 107000 = 10742,5$ руб;
- для компрессора $1 \cdot 2,2 \cdot 8 \cdot 5,9 = 103,8$ руб.

Таким образом, затраты на электроэнергию во время испытаний установки составили 10982,3 руб.

Таблица 4.11 – Расчет затрат на установку в период монтажа

№ п/п	Наименование статьи расхода	Сумма, руб
1	Затраты на оборудование	593961,71
2	Затраты на услуги сторонних организаций	4512
3	Основная з/п сотрудников	21569,4
4	Дополнительная з/п сотрудников	5392,4
5	Отчисления на социальные нужды	8142
6	Затраты на испытание установки	10982,3
Итого:		644560

В итоге сумма всех затрат на монтаж составит 644560 руб.

Наибольшие затраты приходятся на покупку оборудования.

4.2.3 Расчет затрат на проведение исследовательской работы

4.2.3.1 Расчет основной заработной платы исследователей в период исследования

Длительность работ на лабораторной установке составляет:
- у инженера 35 календарных дней;
- у преподавателя 21 рабочий день или $\frac{21 \cdot 7}{6} = 24,5$ календарных дня.

Таблица 4.12 – Затраты на заработную плату в период проведения исследований

Должность	Затрачено дней	Зарплата, руб/день	Сумма основной зарплаты, руб.
Инженер	65	600	39000
Преподаватель	24,5	820	20090
Итого:			59090

Сумма основной зарплаты инженера $65 \cdot 600 = 39000$ руб.

Сумма основной зарплаты преподавателя $24,5 \cdot 820 = 20090$ руб.

Таким образом, сумма основной заработной платы составляет 59090 руб.

4.2.3.2 Расчет дополнительной заработной платы исследователей

Сумма дополнительной зарплаты инженера $39000 \cdot 0,25 = 9750$ руб.

Сумма дополнительной зарплаты преподавателя

$$20090 \cdot 0,25 = 5022,5 \text{ руб.}$$

Таким образом, сумма дополнительной заработной платы составляет 14772,5 руб.

4.2.3.3 Расчет отчислений на социальные нужды

Отчисления на социальные нужды составляют 30% + (0,2 – 8,5) % от основной и дополнительной заработной платы, окончательно принимается 30,2%.

$$0,302 \cdot (59090 + 14772,5) = 22306 \text{ руб.}$$

4.2.3.4 Расчет затрат, связанных с использованием установки

Поскольку моноэтаноламин является оборотным сырьем и практически полностью остается участвовать в технологическом процессе, его потребление на этапе испытаний (таблица 4.10) и исследований остается неизменным.

Таблица 4.13 – Затраты на электроэнергию и сырье

Оборудование	Количество	Мощность, кВт	Цена, руб/кВт·ч	Потребление теплоносителя, $м^3$	Теплоноситель	Цена за единицу теплоносителя, руб/$м^3$	Время работы, ч	Сумма, руб.
Насос циркуляционный	2	0,04	5,9	80	Вода	15,6	160	1251,8
Насос вихревой	6	1,2	5,9	0,05	Моноэтаноламин	107000	160	17496,8
Компрессор	1	2,2	5,9	-	-	-	160	2076,8
Итого								20825,4

Затраты на электроэнергию и воду составят (20 дней):

- для циркуляционного насоса $2 \cdot 0,04 \cdot 160 \cdot 5,9 + 80 \cdot 15,6 = 1251,8$ руб;
- для вихревого насоса $6 \cdot 1,2 \cdot 160 \cdot 5,9 + 0,1 \cdot 107000 = 17496,8$ руб;
- для компрессора $1 \cdot 2,2 \cdot 160 \cdot 5,9 = 2076,8$ руб.

Таким образом, затраты составили 20825,4 руб.

4.2.3.5 Прочие расходы

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.

$$0,02 \cdot (59090 + 21569,4 + 25626) = 2125,7 \text{ руб.}$$

Таблица 4.14 – Расчет затрат на установку в период монтажа

№	Наименование статьи расхода	Сумма, руб.
1	2	3
1	Основная з/п сотрудников	59090
2	Дополнительная з/п сотрудников	14772,5
3	Отчисления на социальные нужды	22306
4	Затраты при использовании установки	20825,4
5	Прочие затраты	2125,7
Итого:		119123

Сумма затрат на проведение исследований составит 119123,2 руб.

4.2.4 Составление сметы затрат на лабораторную установку

Таблица 4.15 – Смета затрат на лабораторную установку

№	Наименование статьи расхода	Сумма, руб.
1	2	3
1	Затраты на проектирование экспериментальной установки	40809
2	Затраты на монтаж экспериментальной установки	644560
3	Затраты на проведение исследований	119123
Итого		804582

Таким образом затраты на создание экспериментального стенда и проведение научно-исследовательских работ составили 804582 руб.

4.3 Выводы по разделу

В процессе выполнения работы составлен сетевой график, смета затрат, рассчитаны нормативы на выполнение работ. Наибольшую долю расходов (около 95%) 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%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы был спроектирован лабораторный стенд для исследования процесса абсорбции. Проведенные расчеты подтверждают работоспособность аппарата для дальнейших исследований параметров работы абсорбера.

Был проведен литературный обзор конструкций абсорбционных аппаратов, а также насадочных тел.

В исследовательской части работы была проведена обработка полученных опытных данных и по их результатам проведено сравнение с литературными источниками. Были получены гидродинамические и массообменные характеристики работы аппарата.

Проведены технологический и прочностной расчеты лабораторной колонны, исходя из которых были приняты основные геометрические характеристики аппарата. Также был проведен прочностной анализ царги из органического стекла, по результатам которого были получены максимальные напряжения, возникающие при действующей нагрузке.

В организационно – экономической части научно – исследовательской работы были просчитаны затраты на установку, а также выявлено какую часть удастся сэкономить на дальнейшее проведение исследований.

Также была проработана безопасность и экологичность установки.

В дальнейшем стенд будет модернизирован и будет использоваться для дальнейших исследований работы колонны в соответствующих рабочих условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Каган А.М., Лаптев А.Г, Пушнов А.С., Фарахов М.И. Контактные насадки промышленных тепломассообменных аппаратов. Монография. По ред. Лаптева А.Г. – Казань: Отечество, 2013, -454 с.

2. Кузнецов А.А., Судаков Е.Н. Расчеты основных процессов и аппаратов переработки углеводородных газов: Справочное пособие. – М.: Химия, 1983. – 224 с., ил.

3. Анучин К.М. Современные технологии переработки и использования газа. «Возможность применения метилдиэтанола, активированного пиперазином, в качестве абсорбента для глубокой очистки газа от CO_2» К.М.Анучин, Д.А.Мирошниченко

4. Алекперова Л.В., Аксельрод Ю.В., Дильман В.В., Струнина А.В., Морозов А.И. Гидродинамические исследования седловидных насадок и колец Палля, Хим. пром., 1974, № 5, с. 380-384.

5. Комарова Л.Ф., Кормина Л.А. Инженерные методы защиты окружающей среды. Учебное пособие. Издательство «Алтай», 2000

6. Zaporozhets E.P «Water and acid removal from petroleum from gases and natural and natural gases» E.P.Zaporozhets, G.K.Zibert, E.E.Zaporozhets, N.N.Andreyva, A.G.Zibert, I.M.Valiullin.

7. International Journal of Greenhouse Gas Control Process modifications for solvent-based post-combustion CO_2 capture (2014)

8. Степыкин А.В «Массообменные характеристики регулярной насадки с внедренными теплообменными модулями» А.В.Степыкин, А.А.Сидягин., В.М.Ульянов.]

9. Intallox Hign-Performance wire Gauze packing (каталог фирмы «Norton», 1988)

10. Музафарова А.Р., Емельянычева Е.А. Классификация, основные требования и конструктивные особенности современных насадочных контактных устройств. Вестник технологического университета. 2016. Т.19, №2

11. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Минеев Н.Г. Основы расчета и модернизация тепломассообменных установок в нефтехимии. Казань: Казан. гос. энергетический ун-т, 2010, 574 с.

12. Ralu-Pak (каталог фирмы Raschig GmbH, 1988)

13. Гладильщикова С.В., Щелкунов В.А., Круглов С.А., Молоканов Ю.К. Насадки массообменных аппаратов для нефтепереработки и нефтехимии», ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, М., 1983.

14. Дмитриева Г.Б., Беренгартен М.Г., Клюшенкова М.И., Пушнов А.С. Эффективные конструкции структурированных насадок для процессов тепломассообмена // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2005, № 8, с. 15-17.

15. Ясавеев Х.Н., Лаптев А.Г., Фарахов М.И. Модернизация установок переработки углеводородных смесей, Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2004, 307 с.

16. Flexigrid structured packing (каталог фирмы «Koch Eng.», N KEG-2, 1986).

17. Воробьева Г.В. Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств. Справочник. М.: «Химия», 1975 – 816 с.

18. А.И. Пронин [и др] Машины и аппараты химических производств: лабораторный практикум / под ред. В.М. Ульянова. – Н.Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т, 2007. – 196 с.

19. Сидягин А.А. Колонные аппараты для массообменных процессов: учеб. Пособие для студентов вузов / А.А. Сидягин.–Н. Новгород: Нижегород. Гос. Техн. Ун – т им. Р.Е.Алексеева, 2009.–115 с.

20. Ульянов В.М., Сидягин А.А., Диков В.А. Технологические расчеты машин и аппаратов химических и нефтеперерабатывающих производств. Примеры и задачи: учеб. пособие; под ред. В.М Ульянова; Нижегород. гос. техн. ун – т им. Р.Е. Алексеева. – Н.Новгород, 2015. – 633 с.

21. Ульянов В. М. – Физико – химические характеристики веществ. Справочник проектировщика химического оборудования: учебное пособие. – Н. Новгород, 2009. – 309 с.

22. ГОСТ 12.003 – 2015. Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация

23. ГН 2.2.5.1313 – 03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Гигиенические нормативы.

24. Паспорт безопасности химической продукции // 2019. 18 марта. URL: https://sintez-oka.com/upload/pdfs/ПБ%20на%20Моноэтаноламин%20(2019).pdf

25. Лазарев Н.В. Вредные вещества в промышленности. Т 2/ Н.В. Лазарев. –Л.: Химия, 1976.

26. ГОСТ 12.1.007-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности

27. СаНПиН 2.2.4.548 – 96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Санитарные правила и нормы.

28. ГОСТ 12.1.012 – 2004. Система стандартов безопасности труда. Вибрационная безопасность. Общие требования.

29. СНиП 41.01.2003. Нормы проектирования. Отопление, вентиляция и кондиционирование. – М.: ГПЦПП, 1994.

30. Проектирование и устройство молниезащиты зданий и сооружений (РД 34.21.122 – 87).

31. Правила устройства электроустановок. – ПУЭ, Изд. 7.

32. ГОСТ Р 12.4.255-2011. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты органа слуха.

33. Семенова А. И. Физико-химические свойства газов и жидкостей. Производство технологических газов. Очистка технологических газов. Синтез аммиака / А. И.Семенова [и др.]. 2-е изд., Москва: Химия, 1986

34. Справочник азотчика. Физико-химические свойства газов и жидкостей. Производство технологических газов. Очистка технологических газов. Синтез аммиака / А. И. Семенова [и др.]. - Москва: Химия, 1986.

35. Семенова Т.А «Очистка технологических газов» Семенова Т.А., Лейтеса И.Л. изд. 2-е, пер. идоп. М., «Химия», 1977

36. Рамм В.М. Абсорбция газов. Изд. 2-е, переработ. И доп. М., “Химия”, 1976 г., 656 с.

37. Павлов К.Ф Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: Учебное пособие для вузов/Под ред. чл.-корр. АН СССР П.Г. Романкова. – 9-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1981. – 560 с., ил.

38. ГОСТ 11068-81 Трубы электросварные из коррозионной-стойкой стали

39. ГОСТ Р 34233.1–2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования

40. ГОСТ 10587-84 Смолы эпоксидно – диановые неотвержденные. Технические условия

41. ГОСТ 10667-90 Стекло органическое листовое. Технические условия

42. Шах А. Д., Погостин С. 3., Альман П. А. Ш31 Организация, планирование и управление предприятием химической промышленности: Учебник/Под ред. Н. П. Федоренко. — 3-е изд., перераб. и доп.— М.: Высш. школа, 1981

Приложение А

Опись чертежей

Приложение Б

Спецификации