

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»
(НГТУ)
ДЗЕРЖИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Факультет Инженерно-технологический
Направление подготовки (специальность) 15.04.02
(код и наименование)
Технологические машины и оборудование

Направленность (профиль) образовательной программы Технологическое оборудование
химических и нефтехимических производств
(наименование)

Кафедра Технологическое оборудование и транспортные системы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

магистра

(бакалавра, магистра, специалиста)

Студента Васильева Павла Дмитриевича группы М19-ТМО
(Ф.И.О.)

на тему Разработка лабораторного стенда и исследование структуры потоков в
барботажной колонне
(наименование темы работы)

СТУДЕНТ:

Васильев П.Д.
(подпись) (фамилия, и., о.)

(дата)

РУКОВОДИТЕЛЬ:

Сидягин А.А.
(подпись) (фамилия, и., о.)

(дата)

РЕЦЕНЗЕНТ:

(подпись) (фамилия, и., о.)

(дата)

ЗАВЕДУЮЩИЙ КАФЕДРОЙ

Диков В.А.
(подпись)

(дата)

КОНСУЛЬТАНТЫ:

1. По экономике и организации исследований

Орлов А.В.
(подпись) (фамилия, и., о.)

(дата)

2. По безопасности и экологичности проекта

Рябова Т.А.
(подпись) (фамилия, и., о.)

(дата)

3. По _____

(подпись) (фамилия, и., о.)

(дата)

ВКР защищена _____
(дата)

протокол № _____
с оценкой _____

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»
(НГТУ)
ДЗЕРЖИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Кафедра _____ Технологическое оборудование и транспортные системы _____

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

_____ В.А. Диков

«__» _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

по направлению подготовки (специальности) _____ 15.04.02 _____
(код и наименование)
_____ Технологические машины и оборудование _____

студенту _____ Васильеву Павлу Дмитриевичу _____ группы _____ М19ТМО _____
(Ф.И.О.)

1. Тема ВКР _____ Разработка лабораторного стенда и исследование структуры потоков в барботажной колонне _____

(утверждена приказом по вузу от 09.04.2021 № 67/5)

2. Срок сдачи студентом законченной работы _____ 26.06.2021 г. _____

3. Исходные данные к работе объемный расход воздуха $V = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; массовый расход воды $L = 0,25 \text{ кг/с}$; требуемая степень насыщения воды кислородом $\chi = 50\%$; начальная концентрация растворенного кислорода в воде (отн. об. масс. доля) $C_{\text{н}} = 1,5 \text{ мг/л}$; начальная концентрация кислорода в воздухе (мол. доля) $\gamma_{\text{н}} = 0,21 \text{ кмоль/кмоль}$; давление в колонне: атмосферное ($P = 760 \text{ мм рт. ст.}$); начальная температура газожидкостной смеси $t_1 = 15^\circ\text{C}$; требуемая температура газожидкостной смеси в колонне $t_2 = 30^\circ\text{C}$.

4. Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень вопросов, подлежащих разработке): Аннотация; Содержание; Введение; 1 Характеристика вопроса по литературным и производственным данным. Обоснование актуальности исследования. Описание объекта исследования; 2 Исследовательская часть. Общие требования к безопасности проведения исследований; 3 Проектно-конструкторская часть; 4 Организационно-экономическая часть; Заключение; Список литературных источников; Приложения

5. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

- _____ 1. Технологическая схема лабораторной установки, А2.
- _____ 2. Сборочный чертеж лабораторной колонны, А1, 3 листа.
- _____ 3. Сборочный чертеж теплообменного блока, А2.
- _____ 4. Сборочный чертеж большого теплообменного модуля, А2.
- _____ 5. Сборочный чертеж малого теплообменного модуля, А2.
- _____ 6. Чертеж гофрированной насадки, А2.
- _____ 7. Организационно-экономические показатели проекта, А1.
- _____ 8. Результаты исследований, А1, 3 листа.

6. Консультанты по ВКР (с указанием относящихся к ним разделов)

по разделу «Организационно-экономическая часть» – Орлов А.В.

по разделу «Общие требования к безопасности проведения исследований» – Рябова Т.А.

Нормоконтроль – Балахнин И.А.

7. Дата выдачи задания 24.05.2021 г.

Руководитель Сидягин А.А. / _____ /
(подпись)

Задание принял к исполнению 24.05.2021 г.
(дата)

Студент Васильев П.Д. / _____ /
(подпись)

Примечания:

1. Это задание прилагается к законченной работе и в составе пояснительной записки предоставляется в ГЭК.

2. До начала консультаций студент должен составить и утвердить у руководителя календарный график работы на весь период выполнения ВКР (с указанием сроков выполнения и трудоемкости отдельных этапов).

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

(НГТУ)
ДЗЕРЖИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

АННОТАЦИЯ
к выпускной квалификационной работе

по программе магистратуры 15.04.02 «Технологические машины и оборудование»
(код и наименование)

студента Васильева Павла Дмитриевича группы M19-ТМО
(Ф.И.О.)

по теме «Разработка лабораторного стенда и исследование структуры потоков в барботажной колонне»

Выпускная квалификационная работа выполнена на 128 страницах, содержит 32 рисунка, 17 таблиц, библиографический список из 57 источников, 9 приложений.

Актуальность: разработка и исследование новых конструкций газлифтных и барботажных аппаратов является в достаточной степени наукоемкой и актуальной задачей для дальнейшего развития промышленности.

Объект исследования: гидродинамическая структура потоков при восходящем движении газожидкостной смеси.

Предмет исследования: барботажная колонна с контактными теплообменными устройствами.

Цель исследования: выявление перспективной конструкции из группы газлифтных и барботажных аппаратов и экспериментальное изучение параметров ее работы в барботажном режиме.

Задачи исследования: обзор и сравнение конструкций газлифтных и барботажных аппаратов, выбор конструкции для проведения научных исследований, разработка лабораторного стенда и экспериментальное изучение параметров работы выбранной конструкции в барботажном режиме.

Методы исследования: теоретический, экспериментальный.

Структура работы: Содержание, Введение; 1 Характеристика вопроса по литературным и производственным данным. Обоснование актуальности исследования. Описание объекта исследования; 2 Исследовательская часть. Общие требования к безопасности проведения исследований; 3 Проектно-конструкторская часть; 4 Организационно-экономическая часть; Заключение; Список литературных источников; Приложения.

Во введении: приводится краткая характеристика изучаемого вопроса, указываются примеры использования газлифтных и барботажных аппаратов в промышленности,

производится предварительная оценка современного состояния инженерных разработок в области конструирования барботажного оборудования; обосновывается актуальность работы, формулируются цель и задачи, решаемые в работе.

В разделе «Характеристика вопроса по литературным и производственным данным. Обоснование актуальности исследования. Описание объекта исследования»: приводится литературный обзор и сравнение конструкций газлифтных и барботажных аппаратов, осуществляется выбор объекта исследования и приводится его описание, дается технико-экономическое обоснование исследования.

В разделе «Исследовательская часть. Общие требования к безопасности проведения исследований»: определяются ключевые направления и методы научных исследований, описывается лабораторный стенд, методика проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных, приводятся результаты проведенных исследований, формулируются основные выводы и выявляются перспективные направления для будущих исследований, описываются мероприятия для обеспечения оптимальных условий труда и безопасности при проведении научных исследований.

В разделе «Проектно-конструкторская часть»: приводится расчет и конструирование лабораторной барботажной колонны с контактными теплообменными устройствами, осуществляется подбор насосно-компрессорного и вспомогательного оборудования.

В разделе «Организационно-экономическая часть»: составляется сетевой график работ, связанных с проектированием, монтажом и проведением исследований на лабораторном стенде, приводится расчет вероятности свершения конечного события в поставленные сроки, а также расчет затрат на реализацию проекта.

В заключении излагаются основные результаты работы, теоретические и практические выводы, полученные в результате проведенного исследования.

Выводы:

1. Выявлена перспективная конструкция для проведения технологических процессов в системах «газ – жидкость».
2. Разработана технологическая схема лабораторного стенда, рассчитаны основные геометрические размеры барботажной колонны, сконструировано контактное теплообменное устройство, подобрано насосно-компрессорное и вспомогательное оборудование.
3. Получены кривые отклика пустотелой барботажной колонны и ее модификации с одним блоком контактного устройства на импульсные возмущения, а также определены численные показатели, отражающие структуру потоков.
4. Представлены зависимости среднего времени пребывания частиц и безразмерные дисперсии их пребывания от расходного газосодержания при постоянной фиктивной скорости жидкости в барботажной колонне.

5. Описаны результаты видеосъемки движения газожидкостной смеси в барботажной колонне во время проведения экспериментов, а также получена схема с общим видом структуры потоков в колонне с контактным устройством.
6. Намечены перспективные направления будущих исследований.
7. Разработаны мероприятия для обеспечения оптимальных условий труда и безопасности при проведении научных исследований.
8. Составлен сетевой график работ и произведен расчет затрат на реализацию проекта.

Рекомендации:

1. Разработанный лабораторный стенд рекомендуется для изучения гидродинамических, тепло- и массообменных параметров работы контактного теплообменного устройства в затопленном режиме.
2. Дальнейшие исследования работы контактного теплообменного устройства рекомендуется в первую очередь проводить в направлениях, которые были выявлены в исследовательской части настоящей работы.
3. Разработанная методика проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных рекомендуется для исследования структуры потоков в барботажной колонне.
4. Рекомендуется использование полученных результатов исследования для последующего сравнения структур потоков в барботажной колонне с различными модификациями контактных теплообменных устройств.

_____/ Васильев П.Д.
подпись студента /расшифровка подписи

« 21 » июня 2021 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 ХАРАКТЕРИСТИКА ВОПРОСА ПО ЛИТЕРАТУРНЫМ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ДАННЫМ. ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ	5
1.1 Обзор конструкций газлифтных и барботажных аппаратов	5
1.2 Сравнение конструкций газлифтных и барботажных аппаратов	15
1.3 Описание объекта исследования	19
1.4 Техничко-экономическое обоснование исследования	22
2 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К БЕЗОПАСНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	23
2.1 Теоретическая часть	23
2.2 Экспериментальная часть	26
2.3 Результаты экспериментов.....	32
2.4 Выводы по исследовательской части	38
2.5 Общие требования к безопасности проведения исследований.....	41
3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ.....	50
3.1 Технологический расчет лабораторной колонны	50
3.2 Прочностной расчет лабораторной колонны	66
3.3 Подбор насосно-компрессорного и вспомогательного оборудования ..	72
4 ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	78
4.1 Организационная часть	78
4.2 Экономическая часть.....	83
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	90
СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	93
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Опись чертежей	98

					<i>ВР-НГТУ-М19ТМ-000-21 ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Выполнил</i>	<i>Васильев П.Д.</i>				<i>Разработка лабораторного стенда и исследование структуры потоков в барботажной колонне</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>	<i>Сидягин А.А.</i>					1	128	
<i>Н. Контр.</i>	<i>Балахнин И.А.</i>				<i>М19ТМО ДПИ НГТУ</i>			
<i>Утверд.</i>	<i>Диков В.А.</i>							

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Колонна лабораторная. Спецификация	99
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Блок теплообменник. Спецификация.....	101
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Большой теплообменник модуль. Спецификация.....	102
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Малый теплообменник модуль. Спецификация	103
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Кривые отклика пустотелой колонны	104
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Кривые отклика колонны с контактным устройством .	105
ПРИЛОЖЕНИЕ И. Кадры экспериментов	106
ПРИЛОЖЕНИЕ К. Отчет из программы ПАССАТ.....	108

ВВЕДЕНИЕ

Большую долю среди различных технологических процессов, включая химические реакции, занимают процессы, протекающие в гетерогенных системах «газ - жидкость». Они находят широкое применение в химической, нефтехимической и пищевой отраслях промышленности, а также в биотехнологии. Для проведения данных процессов используется различное технологическое оборудование. К одному из самых распространенных видов оборудования для проведения технологических процессов в системах «газ - жидкость» относится группа газлифтных и барботажных аппаратов (ГБА), о которой пойдет речь в настоящей работе.

Актуальность использования ГБА в промышленности обусловлена наличием у них множества достоинств, перспектив развития и широких возможностей их модернизации. Рассматриваемая группа оборудования характеризуется эксплуатационной надежностью, возможностью переработки больших объемов реагентов, а также высокими показателями тепло- и массопереноса. В барботажных аппаратах возможно значительное увеличение поверхности контакта фаз за счет осуществления более тонкого диспергирования газа в жидкости. Также следует отметить, что оборудование, работающее в затопленном режиме, имеет большие перспективы по оптимизации процессов тепло- и массообмена за счет внедрения в него новых конструктивных особенностей.

ГБА характеризуются широким спектром применения в различных отраслях промышленности. Например, они могут использоваться в системах синтеза жидкого топлива [1], в технологии комплексной переработки нефтешламов и кислых гудронов [2]. Рассматриваемая группа аппаратов нашла широкое применение в процессах дистилляции и ректификации при переработке нефти и ее очистки от вредных газов десорбцией [3]. Барботажные аппараты применяются для процессов выделения из газов вредных веществ или нежелательных примесей, например, при очистке газовых потоков от сероводорода [4]. Данное оборудование также используется в биотехнологии при проведении процессов синтеза, переработки и утилизации различных веществ [5, 6, 7]. Применение барботажных аппаратов в микробиологической и фармацевтической промышленности при выращивании суспензионных культур различных клеток описано в литературе [8, 9].

В настоящее время состояние инженерных разработок в области конструирования ГБА характеризуется значительным разнообразием. При этом процесс разработки новых конструкций и модификации устаревшего оборудования не останавливается, а только нарастает. Это свидетельствует о том, что настоящая тема в достаточной степени наукоемка и актуальна для дальнейшего развития промышленности.

										Лист
										3
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ					

Целью настоящей выпускной квалификационной работы является выявление перспективной конструкции из группы газлифтных и барботажных аппаратов и экспериментальное изучение параметров ее работы в барботажном режиме.

В работе решаются следующие задачи:

- обзор и сравнение конструкций газлифтных и барботажных аппаратов с целью выявления оборудования, которое в перспективе сможет повысить эффективность протекания технологических процессов в системах «газ – жидкость»;

- выбор конструкции для проведения исследований, выбор и обоснование ключевых направлений и методов научных исследований;

- разработка технологической схемы лабораторного стенда, расчет и конструирование лабораторного аппарата, подбор насосно-компрессорного и вспомогательного оборудования;

- монтаж лабораторного стенда, разработка методики проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных;

- проведение экспериментов, обработка экспериментальных данных, получение результатов исследования, анализ результатов, привязка к промышленной практике и выявление направлений будущих исследований;

Дополнительно в работе решаются вопросы по разработке перечня мероприятий для обеспечения оптимальных условий труда и безопасности при работе на лабораторной установке, а также рассчитываются необходимые организационно-экономические показатели проводимых научных исследований.

Выпускная квалификационная работа включает в себя четыре раздела, заключение, список литературных источников и 9 приложений. Работа выполнена на 128 листах формата А4, содержит 32 рисунка, 17 таблиц и 57 библиографических ссылок.

					ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		4

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

1.1 Обзор конструкций газлифтных и барботажных аппаратов

На первом этапе настоящей работы необходимо выбрать объект и предмет исследования, но ввиду большого конструктивного разнообразия газлифтных и барботажных аппаратов (ГБА) этот выбор должен быть грамотно обоснован. Следовательно целью данного раздела является являться обзор конструкций ГБА с выявлением оборудования, которое в перспективе сможет повысить эффективность протекания технологических процессов в системах «газ – жидкость».

В первую очередь произведем обзор самых распространенных конструкций газлифтных и барботажных аппаратов, которые активно используются в промышленности. Схожие конструкции с идентичными принципами работы и аналогичными особенностями будем объединять в небольшие группы. Первыми выделим полые ГБА, показанные на рисунке 1.1.1 [10, 11].

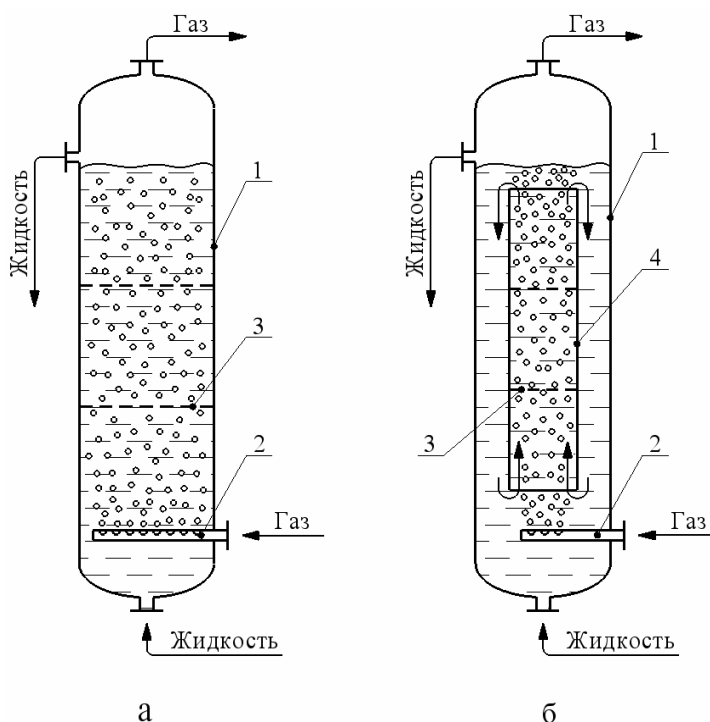


Рисунок 1.1.1 - Полые газлифтные и барботажные аппараты:

а – барботажный аппарат; б – газлифтный аппарат; 1 – корпус;
2 – перегородки; 3 – барботер; 4 – барботажная труба

В полых газлифтных и барботажных аппаратах отсутствуют какие-либо внутренние устройства. Единственное, что присутствует в данных конструкциях, это барботер и горизонтальные перегородки, которые

устанавливаются в корпусе (рисунок 1.1.1, а) или в барботажной трубе (рисунок 1.1.1, б). Полые ГБА нашли широкое применение, поскольку простота конструкции позволяет спроектировать их на большие объемы, допускает установку антикоррозионной футеровки и гарантирует высокую надежность в эксплуатации.

Из недостатков барботажного аппарата следует отметить сравнительно малую интенсивность массопереноса, ограничение скорости газа (до 0,1 м/с), приведенной к его поперечному сечению, и отсутствие циркуляции жидкости. Газлифтные аппараты работают интенсивнее и позволяют организовать циркуляцию потока за счет разности плотностей между восходящей газожидкостной смесью в барботажной трубе 2 и нисходящим жидкостным потоком в кольцевом сечении между трубой 2 и корпусом 1 аппарата. Максимальная приведенная скорость газа в циркуляционном контуре составляет 2 м/с, а скорость циркулирующей жидкости – 1-2 м/с. Недостатком газлифтного аппарата является то, что его рабочая зона уменьшается по сравнению с аппаратом барботажного типа, поскольку фазы контактируют только в барботажной трубе 2.

В качестве следующей отдельной группы ГБА выделяем конструкции с внутренними перемешивающими устройствами [10]. Типовые представители данной группы представлены на рисунке 1.1.2.

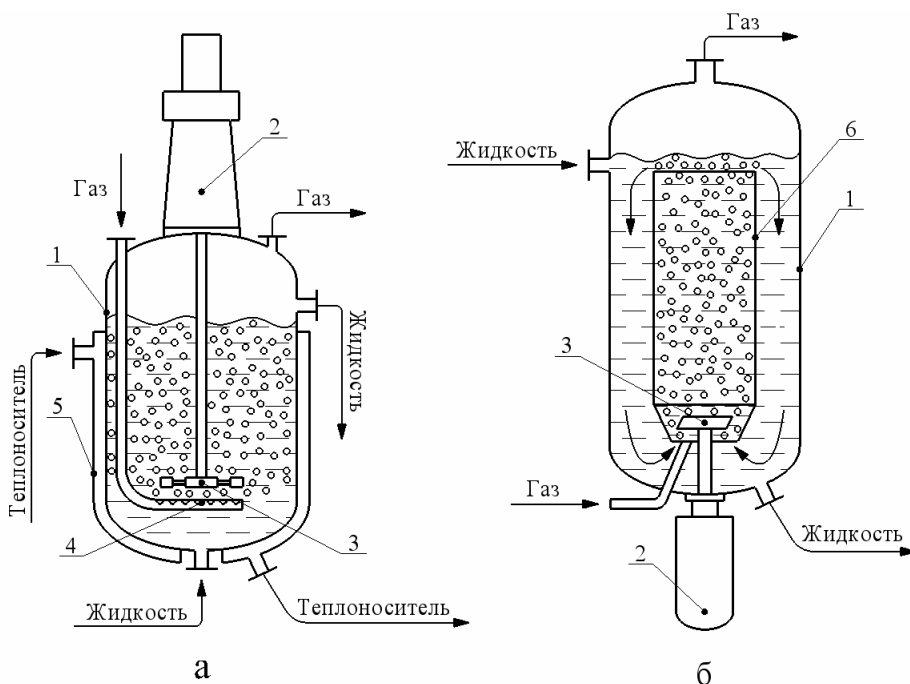


Рисунок 1.1.2 - Барботажные аппараты с мешалками:
а – в свободном объеме; б – в циркуляционном контуре; 1 – корпус;
2 – привод; 3 – мешалка; 4 – барботер; 5 – рубашка; 6 – барботажная труба

Установка мешалки в представленных конструкциях осуществляется на уровне барботера (или над ним). Газ, попадая в аппарат, сразу перемешивается и разбивается на маленькие пузыри. Так, достигается наиболее тонкое диспергирование газовой фазы и, следовательно,

					Лист	
					6	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ	

повышение поверхности контакта фаз. Кроме того, при работе перемешивающих устройств значительно интенсифицируются процессы тепломассопереноса.

Принципиально газожидкостные аппараты с перемешивающими устройствами разделяют на два вида: в свободном объеме, в циркуляционном контуре. Первый тип имеет общие сходства с полым барботажным аппаратом, а второй – с газлифтным. Барботажные аппараты с мешалкой в свободном объеме целесообразно применять при малой производительности быстрорастворимых газов, поскольку их скорость в свободном сечении не должна превышать 0,05 м/с. Для реакций с большим временем пребывания реагентов в аппарате, а также для процессов, в которых могут образовываться взрывоопасные газовые смеси целесообразнее применять реакторы с мешалкой в циркуляционном контуре [10]. Пропускная способность такого аппарата, также как и реактора с мешалкой в свободном объеме, ограничена скоростью газа, которая не должна превышать 0,02 м/с для обеспечения стабильного проведения процесса.

Самым эффективным видом оборудования, среди конструкций ГБА с перемешивающими устройствами, являются аппараты с многоярусными мешалками. Они являются высокоинтенсивными аппаратами, которые позволяют увеличить поверхность контакта фаз за счет тонкого диспергирования газа (с использованием закрытых турбинных мешалок диспергаторов) и выровнять локальное газосодержание по высоте аппарата за счет подбора оптимального количества ярусов. При этом гидродинамическая обстановка внутри аппарата сопровождается интенсивным перемешиванием и турбулизацией газожидкостного потока по всей высоте данного аппарата.

Недостатками аппаратов с мешалками можно считать значительные дополнительные энергозатраты и усложнение конструкции. Кроме того, покупка, установка и эксплуатация перемешивающего устройства и его привода приведет к дополнительным расходам на проведение процесса.

Обычно подвод или отвод теплоты во всех вышеперечисленных аппаратах осуществляется через теплообменную рубашку. Однако при проведении весьма экзо- или эндотермических процессов данной поверхности теплообмена может оказаться недостаточно, что несколько ограничивает применение вышеперечисленных аппаратов.

Данная проблема решается путем установки в вышеперечисленные конструкции ГБА вертикальных или змеевиковых теплообменных труб. Обычно, в оборудовании барботажного типа теплообменные трубы устанавливаются в виде вертикальных пучков непосредственно в рабочем объеме аппарата. В оборудовании газлифтного типа трубчатка или змеевик располагаются вокруг барботажной трубы. Для дополнительного увеличения поверхности теплообмена в данных аппаратах допускается установка теплообменной рубашки.

Благодаря данным усовершенствованиям значительно увеличивается удельная поверхность теплообмена, приведенная к 1 м^3 газожидкостной смеси, поэтому в данных аппаратах открывается возможность проведения

					<i>BP-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						7
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

процессов с повышенной тепловой нагрузкой. Однако, наличие внутри реактора труб существенно уменьшает используемый для процесса рабочий объем аппарата, а также нарушает гидродинамическую обстановку в реакторе, что может способствовать появлению локальных застойных зон.

В промышленности существует множество технологических процессов, в том числе и химических реакций, протекающих со значительным тепловым эффектом (более 500 кДж/моль). В связи с этим теплообменная поверхность рассматриваемых аппаратов с теплообменными трубами не будет в полной мере покрывать потребность в подводе или отводе достаточного количества тепла. Для проведения таких теплонапряженных процессов применяют кожухотрубные газлифтные аппараты, конструкция которых отражена на рисунке 1.1.3.

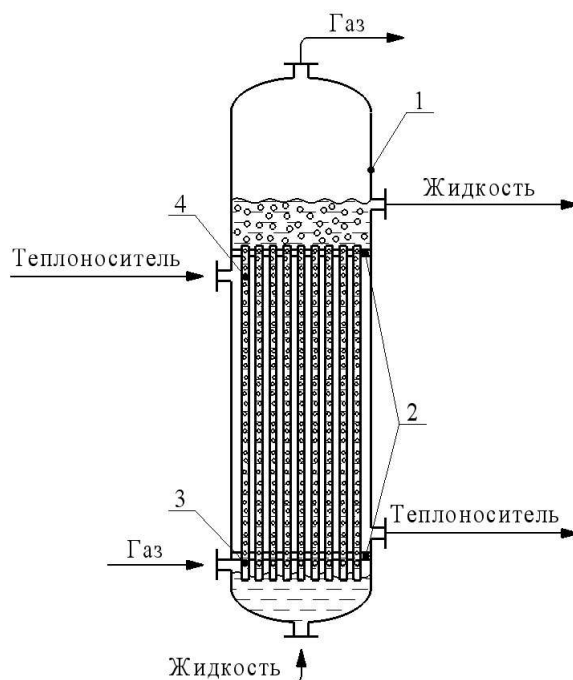


Рисунок 1.1.3 - Кожухотрубный газлифтный аппарат:
1 – корпус; 2 – трубая решетка; 3 – отверстия; 4 – барботажные трубы

Аппарат выполняется в виде теплообменника с увеличенной сепарационной зоной, где происходит отделение газа от жидкости. В решетках закреплены барботажные трубы. Нижние концы труб выведены под трубную решетку. В стенках выступающих концов труб просверлены отверстия, расположенные на одном уровне. Диаметр и количество отверстий в одной трубе выбираются исходя из условий работы газораспределителя.

Жидкость вводится в аппарат и заполняет трубное пространство. При подаче в аппарат газа под нижней трубной решеткой образуется газовый слой, отжимающий жидкость вниз до тех пор, пока не откроются отверстия газораспределителя и газ не устремится через них в барботажные трубы. Межтрубное пространство аппарата используется для подачи в него теплоносителя.

					BP-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

Такие аппараты выгодно применять для быстрых реакций с большим тепловым эффектом, где не требуется длительное время пребывания реагентов в реакционной зоне. Если возникнет необходимость в проведении реакции с длительным временем пребывания реагентов, то применяют исполнение кожухотрубчатого газлифтного аппарата с наличием отдельных циркуляционных труб. Циркуляция жидкости осуществляется по такому же принципу, как и в газлифтном реакторе, представленном на рисунке 1.1.1, б.

Главным недостатком аппаратов данной группы является то, что они имеют малый объем реакционной зоны, которая локализована внутри барботажных труб, и довольно большую металлоемкость.

Далее рассмотрим современные запатентованные конструкции ГБА, которые могут найти широкое применение в различных отраслях промышленности. Так, исследователи [12] проводили опыты по оптимизации процесса жидкофазного каталитического окисления параксилола с получением терефталевой кислоты. В данной работе представлено несколько конструктивных исполнений аппарата для проведения рассматриваемого процесса. Их отличия между собой заключаются в исполнении отвода деаэрированного шлама и методе распределения газовой фазы по поперечному сечению аппарата.

В качестве примера рассмотрим аппарат, представленный на рисунке 1.1.4. Жидкая фаза вводится в реактор через патрубок 3 и заполняет аппарат до определенного уровня. Подача газа осуществляется с помощью кольцевого барботера 2 и системы распределения исходных материалов 4, которая представляет собой сеть вертикальных патрубков с отверстиями. Данные патрубки расположены по периферии ближе к корпусу аппарата.

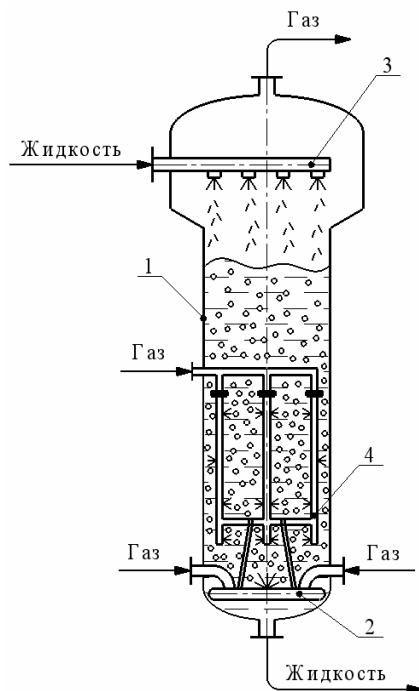


Рисунок 1.1.4 - Барботажный аппарат для жидкофазного окисления:

1 – корпус; 2 – газораспределитель; 3 – патрубок подачи жидкости;
4 – система распределения исходных материалов

Благодаря представленной системе наблюдается интенсивное и равномерное диспергирование газа в слое жидкости, что значительно повышает качество проведения процесса. Также с использованием данного распределителя газовой фазы наблюдается повышение поверхности контакта фаз за счет уменьшения диаметра образующихся газовых пузырей. Стоит отметить, что данная конструкция отличается своей простотой, наличием большой рабочей зоны, отсутствием застойных зон и равномерным распределением полей скоростей по сечению аппарата.

Также следует отметить, что исследователи [12] вели работу над оптимизацией жидкофазного окисления с участием твердой фазы, поэтому в данной конструкции легко осуществляется возможность удаления жидкости с различными осадками. В этом случае в аппарат внедряются камеры деаэрации шлама.

У рассматриваемой конструкции есть существенные недостатки: теплообмен может быть организован только за счет рубашки, поверхность которой при определенных условиях является недостаточной; интенсивность массопереноса невысока и находится на уровне полых барботажных аппаратов; имеются ограничения по фиктивной скорости газа (до 0,1 м/с).

Рассмотренная выше конструкция со встроенной системой распределения реагентов по своей сути является модернизацией полый барботажной колонны. В настоящее время существует множество модернизаций и газлифтного аппарата. В основном улучшения направлены на оптимизацию гидродинамических условий циркуляции жидкой фазы. Например, на рисунке 1.1.5 изображен реактор прямого хлорирования этилена [13], который потенциально может использоваться и для других технологических процессов в системах «газ - жидкость». Данный реактор, в отличие от полого газлифтного аппарата (см. рисунок 1.1.1, б), имеет вместо барботажной трубы, циркуляционную 3. Ввод газовой фазы осуществляется через газораспределители 2 в рабочее пространство кольцевого сечения, образованного между циркуляционной трубой 3 и корпусом 1. Для уменьшения влияния продольного перемешивания и более равномерного распределения газа по сечению аппарата, в нем установлены секционирующие решетки 4.

К корпусу 1 привариваются вертикальные пластины 5, которые образуют дополнительные каналы для циркуляции жидкости. Верхняя часть циркуляционной трубы перфорирована. Перфорация выполнена в виде прямоугольных окон 6, расположенных по окружности у оснований верхних секционирующих решеток. В верхней части аппарата жидкость поступает в окна 6 и равномерно распределяется по циркуляционным каналам и центральной трубе 3.

Авторы [13] отмечают, что данная конструкция позволит повысить технологичность процесса за счет обеспечения максимально равной циркуляции жидкости со всей площади секционирующих решеток реактора. Недостатки рассматриваемого аппарата аналогичны недостаткам полого газлифтного аппарата. В основном они основываются на ограничениях

										Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ					10

теплообменной поверхности рубашки. Аналогичный недостаток имеют и аппараты с погружными барботерами [14, 15], представленные на рисунке 1.1.6.

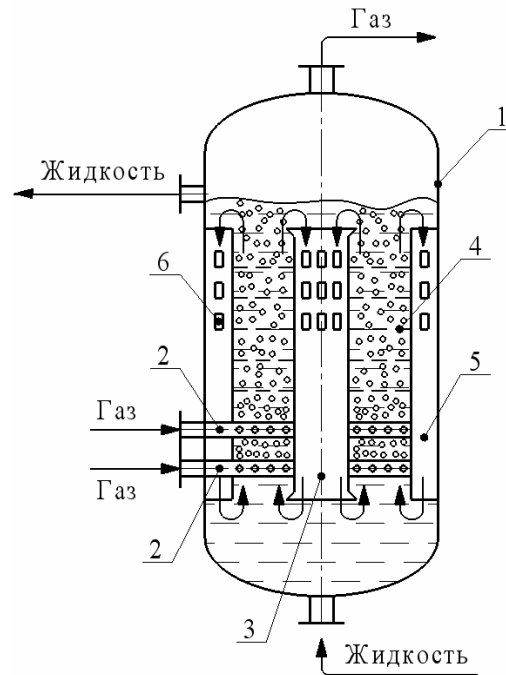


Рисунок 1.1.5 - Реактор прямого хлорирования этилена:

- 1 – корпус; 2 – газораспределители; 3 – циркуляционная труба;
- 4 – секционирующие решетки; 5 – вертикальные пластины;
- 6 – прямоугольные отверстия

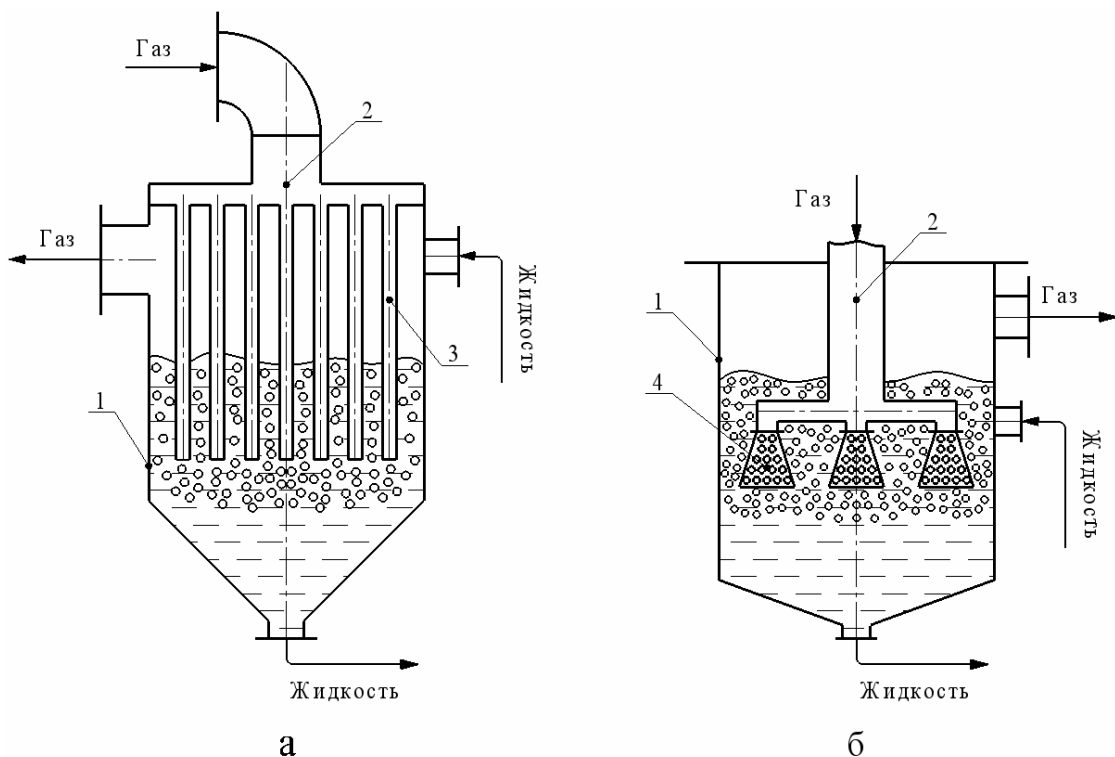


Рисунок 1.1.6 - Аппараты с погружными барботерами:
 1 – корпус; 2 – газовый коллектор; 3 – трубы для диспергирования газа;
 4 – насадки для диспергирования газа

Аппараты, представленные на рисунке 1.1.6, состоят из корпуса, внутрь которого погружаются барботеры в виде труб 3 или специальных насадок в форме усеченного конуса 4. Газовая фаза вводится в аппарат через верхний патрубок в общий газовый коллектор, после которого она равномерно распределяется по трубкам или насадкам. Отработанный газ удаляется через боковой штуцер аппарата, а жидкая – через нижний штуцер.

Одной из отличительных особенностей данных конструкций, является то, что уровень погружения барботера может регулироваться по высоте [14]. Это повышает общую технологическую гибкость оборудования, поскольку в данном случае можно осуществить регулировку времени контакта жидкой и газовой фаз, а также, если будет необходимо, обработать достаточно малое количество жидкости.

Также, согласно описанию авторов [14, 15], рассматриваемые конструкции могут легко применяться для работы с трехфазными потоками, поскольку в них легко осуществляется отделение твердых включений и различных осадков. Тем не менее, они могут эффективно использоваться только в малотоннажных производствах при частой смене нагрузок по жидкости и газу.

Далее рассмотрим конструкцию пленочно-барботажного аппарата для культивирования автотрофных микроорганизмов [16], представленную на рисунке 1.1.7.

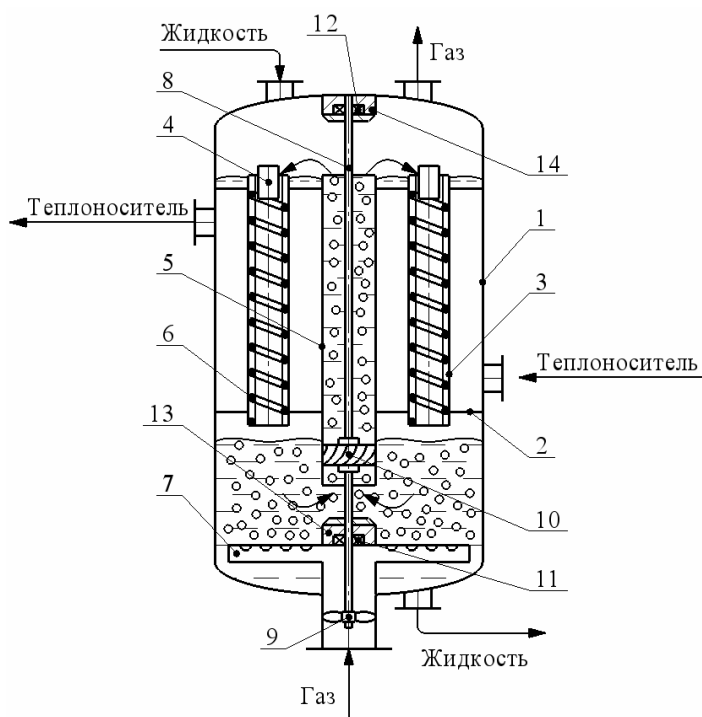


Рисунок 1.1.7 - Аппарат для культивирования автотрофных микроорганизмов:

- 1 – корпус; 2 – горизонтальные перегородки; 3 – вертикальные трубки;
- 4 – пленкообразующее устройство; 5 – циркуляционная труба; 6 – проволока;
- 7 – барботер; 8 – вал; 9 – крыльчатка; 10 – роторный нагнетатель;
- 11, 12 – подшипники; 13, 14 – корпуса подшипников

Аппарат состоит из корпуса 1, разделенного горизонтальными перегородками 2 на несколько секций. В данных перегородках вертикально закреплены цилиндрические трубки 3 с пленкообразующими устройствами 4 и циркуляционная труба 5. На внутренней поверхности трубок располагается винтовая спираль из проволоки 6. Полученное межтрубное пространство между горизонтальными перегородками, корпусом и трубками используется для подачи в него теплоносителя. Для диспергирования газа в аппарате используется барботер 7. Внутри патрубка подачи газа на валу 8 располагается крыльчатка 9, вращающаяся вокруг своей оси за счет кинетической энергии газового потока. Таким образом обеспечивается работа нагнетателя 10. Сам вал устанавливается в подшипниках 11 и 12, расположенных в корпусах 13 и 14 соответственно.

Аппарат работает следующим образом: газ раскручивает крыльчатку, затем проходит через барботер и диспергируется в нижнем слое жидкости. Роторный нагнетатель захватывает газожидкостной поток в циркуляционную трубу. Таким образом происходит ее движение до верхней части аппарата, где газовая фаза выходит из реактора через штуцер, а жидкая фаза поступает через пленкообразующее устройство в вертикальные трубки. На поверхности пленки происходит контакт между стекающей вниз жидкостью и восходящим потоком газа, прошедшим через барботажный слой в нижней части аппарата.

Процессы тепло- и массопереноса в данном аппарате протекают достаточно интенсивно, кроме того, он имеет высокую энергоэффективность, поскольку для работы роторного нагнетателя используется кинетическая энергия газового потока, без подвода других дополнительных источников энергии. Однако, рассматриваемый аппарат имеет довольно сложную конструкцию, а рабочий объем и поверхность контакта фаз в его трубной части имеют меньшие значения по сравнению с другими барботажными аппаратами.

Известно, что при проведении неизотермических химических реакций температурный режим аппарата следует поддерживать в области линии оптимальных температур. Данное требование также актуально и в биотехнологии, когда строго необходимо обеспечение жизнедеятельности микроорганизмов. Для проведения подобных процессов хорошо подходят секционированные аппараты, например противоточный секционированный газлифтный реактор [17], представленный на рисунке 1.1.8. Он выполняется в виде колонного аппарата, секционированного на несколько участков, каждый из которых представляет собой кожухотрубчатый теплообменник. В каждой секции имеются барботажные 3 и циркуляционные трубки 4 для восходящей газожидкостной смеси и циркулирующей жидкости. В межтрубное пространство отдельных секций может осуществляться подача теплоносителей с различной температурой. Так, можно устанавливать необходимые температурные поля по высоте данного аппарата и проводить процесс при оптимальных условиях.

						Лист
					ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ	13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

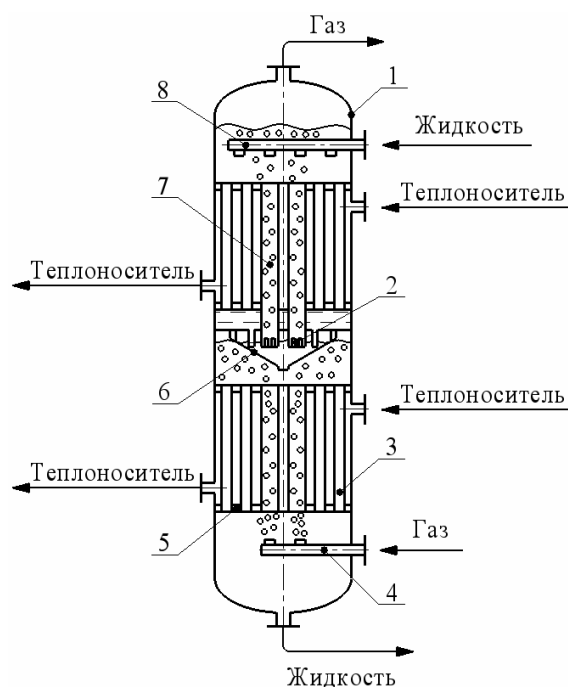


Рисунок 1.1.8 - Противоточный секционированный газлифтный реактор:

- 1 – корпус; 2 – перфорация; 3 – циркуляционная труба; 4 – барботер;
 5 – трубная решетка; 6 – отражательная воронка; 7 – барботажная труба;
 8 - патрубок ввода жидкости

Общее движение фаз в рассматриваемом аппарате реализуется в противоточном режиме за счет отражательных воронок 2, а также специальной конструкции барботажных 3 и циркуляционных 4 труб.

Противоточный секционированный газлифтный реактор обладает высокой эффективностью, в нем предпочтительно проводить реакции с длительным временем пребывания реагентов и большим тепловым эффектом. При этом в данном реакторе реализуются преимущества противотока реагентов и имеется возможность управления профилем температур по высоте за счет подачи в отдельные секции реактора теплоносителей с различной температурой. Однако, данный реактор имеет довольно сложную конструкцию и высокую металлоемкость.

Более простую конструкцию имеет барботажный аппарат (см. рисунок 1.1.9) с контактными теплообменными устройствами [18], которые устанавливаются в несколько ярусов на опорные решетки 3 и, таким образом, секционируют аппарат по высоте. Теплообменный блок представляет собой набор теплообменных модулей 4, соединяющиеся между собой штуцерами, и гофрированную насадку 5, укладываемую в пространства между модулями.

Таким образом, движение газожидкостной смеси осуществляется в каналах между модулями, а внутренние пространства модулей служат для подачи в них теплоносителя. Количество теплообменных модулей можно изменять в зависимости от протекающего технологического процесса. Например, оперируя конфигурацией устройства можно увеличить

(уменьшить) поверхность теплообмена или подобрать определенный объем рабочей зоны аппарата и задать требуемую пропускную способность.

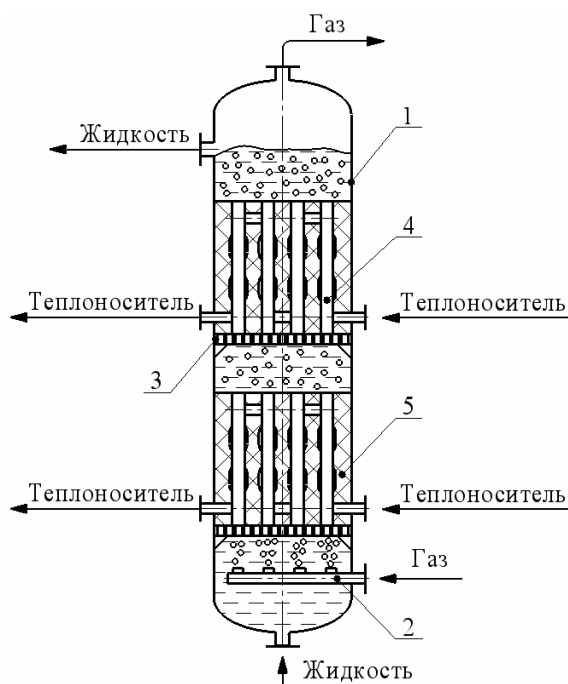


Рисунок 1.1.9 - Барботажная колонна с контактными устройствами:
 1 – корпус; 2 – барботер; 3 – опорная решетка; 4 – теплообменный модуль;
 5 – гофрированная насадка

Преимуществами представленной барботажной колонны являются: технологичность, гибкость, сравнительная простота конструкции, высокие показатели интенсивности процесса, упрощение монтажных и ремонтных операций за счет блочной конструкции устройства, наличие возможности управления профилем температур по высоте аппарата.

1.2 Сравнение конструкций газлифтных и барботажных аппаратов

Произведем сравнительный анализ рассмотренных конструкций ГБА, результаты которого сводятся к поиску такой конструкции, которая сможет наиболее полно удовлетворить основным требованиям, предъявляемым к аппаратам для проведения технологических процессов в системах «газ-жидкость». Следовательно, выделяем следующие критерии эффективности:

1. Удельная поверхность массообмена

$$F_M = \frac{F_M}{V_p}, \quad (1.2.1)$$

где F_M – поверхность массообмена, m^2 ; V_p – рабочий (реакционный) объем аппарата, m^3 .

В промышленных аппаратах должно реализовываться тонкое и равномерное распределение газовых пузырей в объеме жидкости, что

позволяет достичь высокой удельной поверхности массообмена. С увеличением данного показателя уменьшается требуемый объем аппарата и, соответственно, снижается его стоимость.

2. Удельная поверхность теплообмена

$$F_Q = \frac{F_T}{V_p}, \quad (1.2.2)$$

где F_T – поверхность теплообмена, m^2 ; V_p – рабочий (реакционный) объем аппарата, m^3 .

Для проведения теплонапряженных процессов требуется большее значение F_Q . При этом тип и вид теплообменной поверхности должны обеспечивать постоянство значения F_Q при увеличении объема аппарата.

3. Интенсивность процесса. В соответствии с данным критерием в аппарате должно обеспечиваться наименьшее время достижения требуемого результата. Таким образом, данный критерий определяется значениями коэффициентов тепло- и массопереноса для того или иного оборудования.

4. Простота конструкции. Этот критерий является базовым требованием к конструированию любого технологического оборудования, в том числе и ГБА. Простота конструкции напрямую влияет на себестоимость изготовления аппарата и время, затрачиваемое на его монтаж и ремонт. В связи с этим простые конструкции обычно чаще пользуются спросом в промышленности.

5. Удельная металлоемкость внутренних устройств

$$M = \frac{G}{V}, \quad (1.2.3)$$

где G – масса внутренних устройств, кг; V – внутренний объем аппарата, m^3 .

Предпочтительными являются конструкции с низкой удельной металлоемкостью, поскольку потенциально они имеют меньшую стоимость.

6. Доля рабочего (реакционного) объема

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V}. \quad (1.2.4)$$

Данный критерий определяет производительность реактора и характеризует количество обрабатываемого вещества в единицу времени. В связи с этим, оптимальным является тот случай, когда внутренние устройства аппарата не занимают большие объемы его внутренней полости.

7. Технологическая гибкость. Данный параметр определяет возможность быстрого изменения конструкции аппарата под изменяющийся технологический процесс, что имеет особую важность для производств с циклической сменой выпускаемой продукции.

8. Управление профилем температур. Возможность управления профилем температур в аппарате увеличивает эффективность протекания неизотермических технологических процессов.

										Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						16

Все выделенные критерии можно разделить на количественные и качественные. В первую очередь проведем сравнение конструкций, рассмотренных в обзорной части работы (см. подраздел 1.1), в соответствии с количественными критериями эффективности. Для этого разделим все эти конструкции на отдельные группы по характерным признакам, приведем их к одному общему внутреннему объему $V = 10 \text{ м}^3$ (с учетом заполнения на 85%), а затем рассчитаем нужные показатели и представим их в таблице 1.2.1. Расчет удельной поверхности массообмена проводить не будем, ввиду отсутствия полной информации о работе газораспределительных устройств рассматриваемых конструкций ГБА.

Таблица 1.2.1 - Сравнение конструкций ГБА по количественным критериям эффективности

№ п/п	Наименование	Вид теплообменной поверхности	$F_Q, \text{ м}^2/\text{м}^3$	$\varepsilon, \%$	$M, \text{ кг}/\text{м}^3$
1	Полые ГБА	Рубашка	2,5 – 4	80 – 84	15 – 40
2	ГБА с мешалками и ГБА с погружными барботерами	Рубашка	2 – 2,5	75 – 80	до 60
3	ГБА с теплообменными трубами	Рубашка и трубы	10 – 25	68 – 75	150 – 350
4	Кожухотрубные ГБА	Трубы	до 250	20 – 40	до 550
5	Секционированный газлифтный аппарат	Трубы	до 160	30 – 50	до 500
6	Пленочно-барботажный аппарат	Трубы	до 30	20 – 30	до 300
7	Барботажный аппарат с контактными устройствами	Модули	5 – 40	65 – 78	100 – 400

Согласно таблице 1.2.1 имеем, что полые ГБА, а также их модификации с мешалками и погружными барботерами обладают наименьшей удельной поверхностью теплообмена. С другой стороны они имеют большую долю рабочего объема и не требуют существенных затрат на изготовление по сравнению с другими конструкциями ГБА, ввиду низкой металлоемкости. На основании этого данные аппараты, кроме ГБА с погружными барботерами, преимущественно применяют в многотоннажных производствах для проведения технологических процессов с небольшим тепловым эффектом. ГБА с погружными барботерами, как указывалось выше, могут эффективно использоваться только в малотоннажных производствах при частой смене нагрузок по жидкости и газу.

Более универсальными конструкциями по сравнению с полыми ГБА следует признать ГБА с теплообменными трубами, поскольку они имеют большую удельную поверхность теплообмена. Трубы, расположенные внутри аппарата, занимают до 15% его рабочего объема, но при этом заметно увеличивают металлоемкость конструкции. ГБА с теплообменными трубами

находят широкое применение в промышленности для проведения технологических процессов с тепловыми эффектами до 200 кДж/моль.

Кожухотрубные вариации конструктивного исполнения ГБА обладают наибольшими значениями удельной поверхности теплообмена. В большой мере это связано с тем, что рабочий объем у них локализуется внутри труб и сравнительно невелик. Кроме того данные конструкции обладают большой металлоемкостью, и, вследствие чего, имеют максимальную стоимость изготовления. Область применения кожухотрубных ГБА ограничена, но они практически не имеют конкуренции при проведении процессов с большими тепловыми эффектами (более 500 кДж/моль).

Пленочно-барботажный аппарат обладает низкими показателями по сравнению с другими ГБА. Его конструкция весьма специфична и предназначена для культивирования микроводорослей, где он имеет свои достоинства по сравнению с другими биореакторами. Тем не менее, данный аппарат в настоящее время не имеет широкого применения в других отраслях промышленности.

Наибольшую удельную поверхность теплообмена (после кожухотрубных ГБА) имеет барботажный аппарат с контактными тепломассообменными устройствами. При этом доля рабочего объема и удельная металлоемкость практически соответствует ГБА с теплообменными трубами. Также следует отметить, что барботажный аппарат с контактными устройствами имеет довольно большие диапазоны значений выделенных параметров, ввиду наличия возможности изменения конфигурации устройства под конкретный технологический процесс. Следовательно, путем расчета устройства с учетом заданных производственных условий можно добиться оптимальных соотношений по удельной поверхности теплообмена, металлоемкости и доли рабочего объема, что отражает его высокую технологическую гибкость.

Рассматривая барботажный аппарат с контактными устройствами в рамках выделенных качественных критериев эффективности, следует отметить следующее:

- аппарат имеет упрощенную блочную конструкцию;
- аппарат обладает потенциально высокими показателями тепло- и массопереноса за счет турбулизации и интенсивного перемешивания потока в каналах устройства;
- в аппарате реализована возможность управлять профилем температур по ходу движения реагентов.

Таким образом, по результатам сравнительного анализа конструкций ГБА можно сделать вывод, что барботажный аппарат с контактными тепломассообменными устройствами наиболее полно удовлетворяет указанным ранее критериям эффективности и имеет большие перспективы для проведения технологических процессов в различных отраслях промышленности.

									Лист
									18
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ				

Перспективы применения барботажных аппаратов с контактными теплообменными устройствами в промышленности выделяются преимущественно за счет их теоретического анализа, поскольку данные конструкции практически не изучены. Отсутствуют режимные параметры их работы, нет конкретного представления о структуре потоков в данных аппаратах, не определены точные значения коэффициентов тепло- и массопереноса. Следовательно, барботажный аппарат с контактными теплообменными устройствами является отличным объектом для предстоящих исследований, которые, в свою очередь, позволят подтвердить или опровергнуть эффективность данного аппарата для проведения технологических процессов в системах «газ-жидкость».

1.3 Описание объекта исследования

На основании проведенного литературного обзора и сравнительного анализа конструкций ГБА в качестве объекта исследования выбираем барботажную колонну с контактными теплообменными устройствами. Общий вид контактного устройства представлен на рисунке 1.3.1.

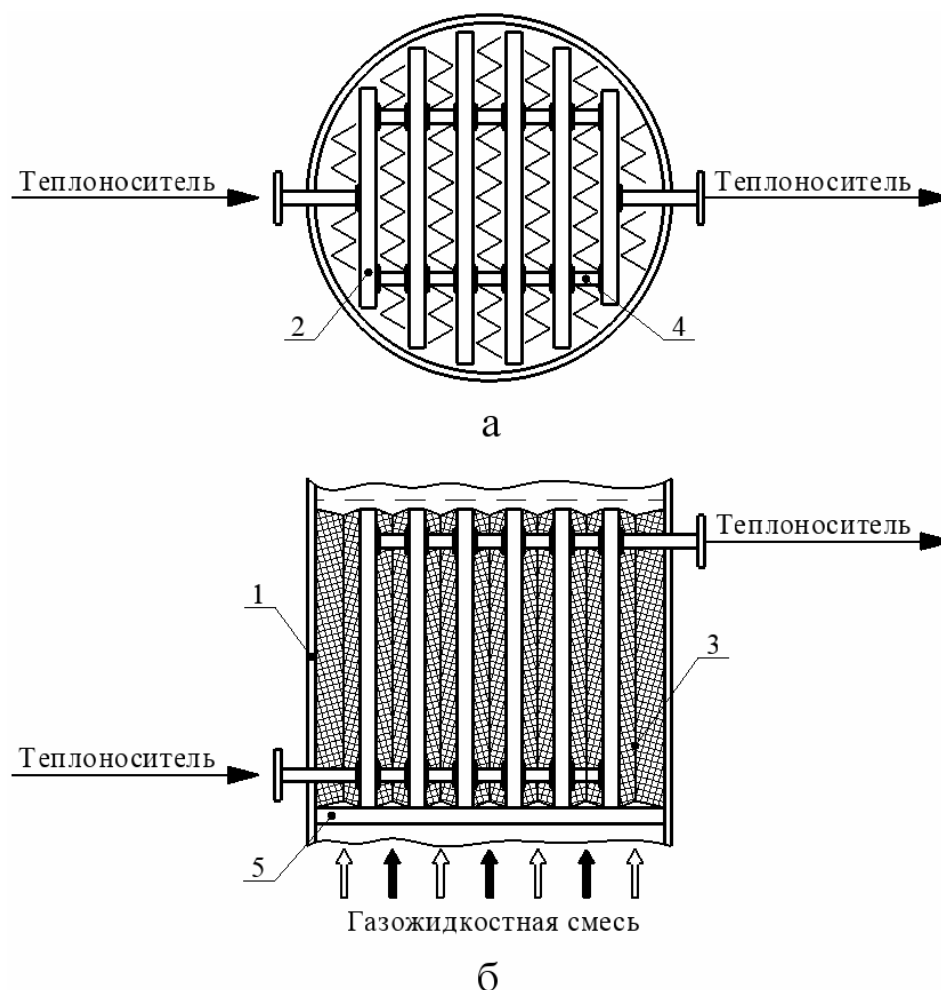


Рисунок 1.3.1 – Контактное теплообменное устройство:
 1 – корпус аппарата; 2 – теплообменный модуль; 3 – гофрированная перфорированная насадка; 4 – соединительные патрубки; 5 – опорная газораспределительная решетка

Контактное теплообменное устройство представляет собой набор теплообменных модулей 2, соединяющихся между собой патрубками 4. Теплообменный модуль изготавливается из гофрированных металлических пластин, представленных на рисунке 1.3.2, соединенных между собой болтами. В качестве уплотнения используется прокладка, которая зажимается между соединяемыми пластинами. Внутренние полости теплообменных модулей, образуемые между прокладкой и металлическими пластинами, служат для подачи в них теплоносителя. Данные модули можно также изготавливать цельносварными для повышения простоты и надежности устройства. Выбор метода изготовления теплообменных модулей будет осуществляться на этапе конструирования контактного устройства.

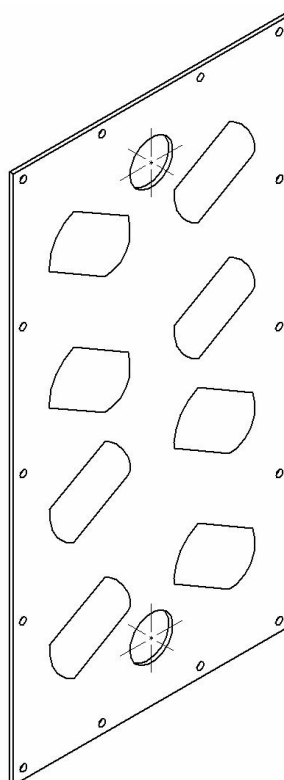


Рисунок 1.3.2 - Пластина теплообменного модуля

В пространства между теплообменными модулями укладывается гофрированная насадка 3, представленная на рисунке 1.3.3. Данные модули и насадка компонуются в один блок, который укладывается на опорные конструкции в корпусе аппарата. Таким образом можно осуществлять его секционирование на слои теплообменных блоков. Секционирование аппарата на данные блоки позволяет задавать требуемый профиль температур по его высоте. Это легко осуществимо за счет подачи в каждые блоки теплоносителей с различной температурой.

Конфигурация одного блока контактного устройства рассчитывается под конкретный технологический процесс. Так, путем изменения количества устанавливаемых теплообменных модулей в блоке контактного устройства

					ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

можно подобрать оптимальное соотношение удельной поверхности теплообмена и доли рабочего объема в аппарате. Диапазоны возможных числовых показателей, отражающих эффективность данного устройства для проведения технологических процессов в системах «газ – жидкость» представлены в таблице 1.2.1 предыдущего подраздела настоящей работы.

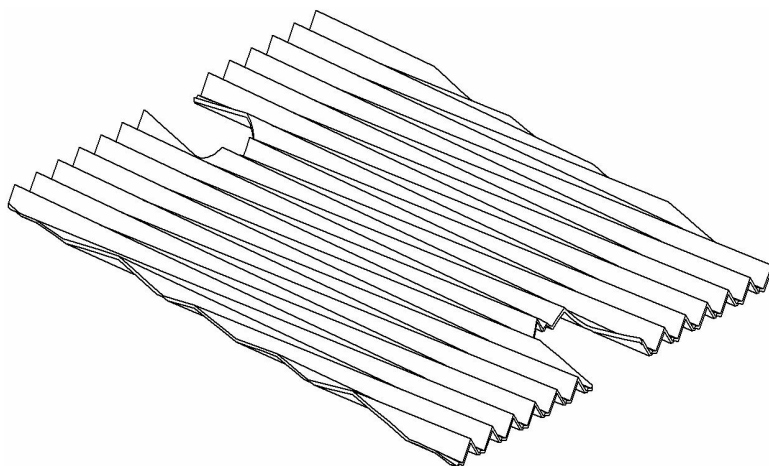


Рисунок 1.3.3 - Гофрированная насадка

Исследование работы контактного устройства будет проводиться в условиях барботажа. В таком случае принцип его работы заключается в следующем: газожидкостная смесь, восходящая в колонном аппарате доходит до тепломассообменной секции и распределяется по каналам между теплообменными модулями и гофрированной насадкой, которая в свою очередь дробит большие пузыри газа и увеличивает поверхность контакта фаз. В рассматриваемых каналах осуществляется непрерывная турбулизация и перемешивание потока, что способствует интенсификации процессов тепло- и массопереноса.

Во внутренние каналы теплообменных модулей подается теплоноситель. Гофрированные пластины способствуют турбулизации как теплоносителя внутри модуля, так и газожидкостной смеси с его наружной стороны. Стоит отметить, что теплообмен организуется непосредственно в рабочем объеме аппарата, таким образом, насадочные элементы не препятствуют подводу или отводу тепла.

Выбор материального исполнения контактного тепломассообменного устройства осуществляется на основании выбранных модельных сред для проведения научных исследований. Если исследования будут проводиться при температурах до 80°C, а в качестве модельных сред будут использоваться безопасные и неагрессивные вещества, то теплообменные модули рекомендуется изготавливать из стали 20, а насадку из полимерных материалов. Например, в случае изготовления насадки с помощью 3D-печати рекомендуется применять ABS-пластик, а в случае пневмовакуумного формования листов насадки – полипропилен.

1.4 Технико-экономическое обоснование исследования

Выше был проведен литературный обзор конструкций газлифтных и барботажных аппаратов, а также представлено их сравнение по принятым критериям эффективности. В результате данного сравнения было выявлено, что барботажные колонны с контактными теплообменными устройствами являются наиболее перспективными конструкциями для проведения различных технологических процессов.

С экономической точки зрения следует отметить, что барботажные колонны с контактными теплообменными устройствами могут найти применение во многих отраслях промышленности. Спрос на данное оборудование будет обеспечиваться его универсальностью, позволяющей быстро подстроиться под конкретный технологический процесс, а также высокими показателями интенсивности тепло- и массопереноса.

Так, например, использование контактных устройств со встроенными теплообменными модулями вместо слоев насадки при проведении весьма экзо- или эндотермических процессов может позволить сэкономить на установке вспомогательного теплообменного оборудования. Также барботажные аппараты с рассматриваемыми контактными устройствами могут послужить заменой аппаратам с теплообменными трубами, поскольку они обеспечивают большую удельную теплообменную поверхность при неизменных параметрах по металлоемкости и пропускной способности. Использование контактного устройства, как статического интенсификатора, для процессов, протекающих в диффузионной области, позволит увеличить их энергоэффективность за счет исключения необходимости в установке перемешивающих устройств, работающих от внешних источников энергии.

Таким образом, использование барботажных аппаратов с контактными теплообменными устройствами в промышленности может значительно повысить технологическую и экономическую эффективность различных предприятий. Однако, потенциальная эффективность данного устройства должна быть проверена путем проведения соответствующих научных исследований. При этом будут иметь место следующие виды работ: проектирование лабораторного стенда, закупка материалов и вспомогательного оборудования, монтаж стенда, проведение экспериментов, обработка полученных данных и оформление результатов исследования.

Ориентировочная сумма затрат по данному проекту с учетом процессов проектирования и монтажа лабораторного стенда, а также проведения научных исследований, составляет 350000 рублей. На реализацию проекта заложено 3 календарных месяца.

					ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

2 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К БЕЗОПАСНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Теоретическая часть

2.1.1 Определение и обоснование направления исследований

Научные исследования контактного теплообменного устройства являются прикладными, поскольку они направлены на изучение состояния нового технического оборудования с целью получения конкретного результата, который будет использоваться в дальнейших проектных разработках. Необходимыми результатами научно-исследовательской работы являются качественные и количественные параметры работы контактного теплообменного устройства в затопленном режиме. К последним относятся гидродинамические, теплообменные и массообменные характеристики, определяемые в ходе изучения объекта исследования.

Известно, что показатели теплообменных процессов и химических превращений имеют прямую зависимость от гидродинамических параметров работы оборудования. Следует отметить, что структура потока в аппарате оказывает существенное влияние на время пребывания, степень конверсии реагентов, интенсивность переноса массы и тепловой энергии [19, 20]. Следовательно, исследование блочно-модульного контактного устройства необходимо начинать с изучения структуры проходящего через него потока.

Основными методами исследования явлений, процессов, объектов являются их математическое и физическое моделирование [21]. Математическое моделирование заключается в замене объекта исследования его математической моделью, например, системой алгебраических и дифференциальных уравнений.

Структура потоков в аппаратах химической технологии описывается с помощью типовых математических моделей [20, 22]. Для моделирования работы контактного теплообменного устройства будем использовать широко распространенные модели: диффузионную и ячеечную.

Математическое описание представленных моделей имеет вид:

- для однопараметрической диффузионной модели:

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = -w \frac{\partial C}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}; \quad (2.1.1)$$

- для ячеечной модели:

$$\frac{1}{n} \frac{dC}{d\theta} = \theta_n (C_{i-1} - C_i), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2.1.2)$$

где C – концентрация; θ – время; x – продольная координата; n – количество линейных дифференциальных уравнений первого порядка.

									Лист
									23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

Степень соответствия структуры потоков в аппарате выбранной математической модели устанавливается с помощью физического моделирования (эксперимента). После проведения лабораторных исследований сопоставляются теоретические и экспериментальные данные, позволяющие судить о том, насколько точно выбранная модель соответствует действительности. При этом опытным путем определяются основные параметры математической модели, которые отражают реальную структуру потоков в аппарате.

2.1.2 Выбор метода исследований

Существует множество методов изучения структуры потоков в аппаратах, самые используемые из них это: трассерные, оптические, акустические и кондуктометрические [23]. Все представленные методы, кроме трассерного, предназначены для исследования локальных гидродинамических характеристик технологического оборудования. При этом они обходятся гораздо дороже и требуют привлечения сложных технических средств [20].

Результаты первоначальных исследований блочно-модульного контактного устройства должны сформировать общее понимание структуры потоков в аппарате. Таким образом, искомой величиной будут являться выходные брутто-характеристики. Исследования локальных гидродинамических особенностей устройства необходимо проводить после получения общих интегральных показателей эффективности его работы.

Для представленных целей лучше всего подходит трассерный метод исследования структуры потока в аппарате. Он достаточно эффективен и прост в реализации. При этом трассерный метод получения кривых отклика исследуемой системы на импульсные и ступенчатые возмущения наиболее часто используется различными исследователями и широко расписан в научной и технической литературе. На основании этого в настоящей работе будем использовать трассерный метод исследования структуры потоков в лабораторной барботажной колонне.

2.1.3 Сущность выбранного метода

Сущность трассерного метода исследования структуры потоков заключается в том, что в поток на входе его в аппарат вводят индикатор, движущийся вместе с потоком и не оказывающий на него влияния, а на выходе потока из аппарата измеряют концентрацию индикатора как функцию времени. Эта выходная кривая носит название функции отклика системы на типовое возмущение по составу потока. В качестве трассера обычно используют красители, электролиты, магнитные включения, изотопы и другие вещества [19].

Возмущающие сигналы могут быть различными по форме и физической природе: импульсные, ступенчатые и циклические. Наибольшее распространение получила импульсная форма возмущения, когда на входе в

					Лист
					24
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

аппарат практически мгновенно вводят определенное количество индикатора. В тоже время в потоке на выходе из аппарата измеряют концентрацию данного индикатора как функцию времени. После приведения полученных параметров к безразмерным величинам строится экспериментальная кривая (рисунок 2.1.1), которая называется *C*-кривой или дифференциальной функцией распределения частиц по времени пребывания в аппарате.

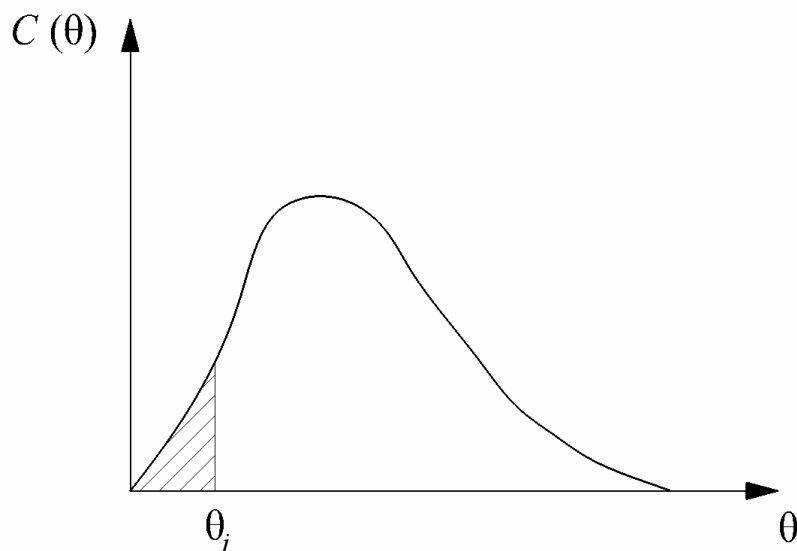


Рисунок 2.1.1 - Типичная *C*-кривая

Заштрихованная область, представленная на рисунке 2.1.1, означает долю потока, время пребывания которого изменяется в пределах от 0 до θ_i , и рассчитывается как площадь под *C*-кривой:

$$\int_0^{\theta_i} C(\theta_i) d\tau. \quad (2.1.3)$$

В соответствии с этим, не подвергается сомнению факт, что

$$C(\theta) \geq 0; \quad (2.1.4)$$

$$C(0) = 0; \quad (2.1.5)$$

$$\int_0^{\infty} C(\theta) d\theta = 1. \quad (2.1.6)$$

Таким образом, *C*-кривая является характеристикой распределения элементов потока по времени их пребывания в аппарате. А среднее время пребывания в нем частиц определяется следующим выражением:

$$\bar{\tau} = \int_0^{\infty} \tau C(\tau) d\tau, \quad (2.1.7)$$

где $C(\tau)$ – нормированная *C* – кривая; τ – время.

										Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						25

2.2 Экспериментальная часть

2.2.1 Описание лабораторного стенда

Для проведения исследований был разработан лабораторный стенд, технологическая схема которого представлена на рисунке 2.2.1.

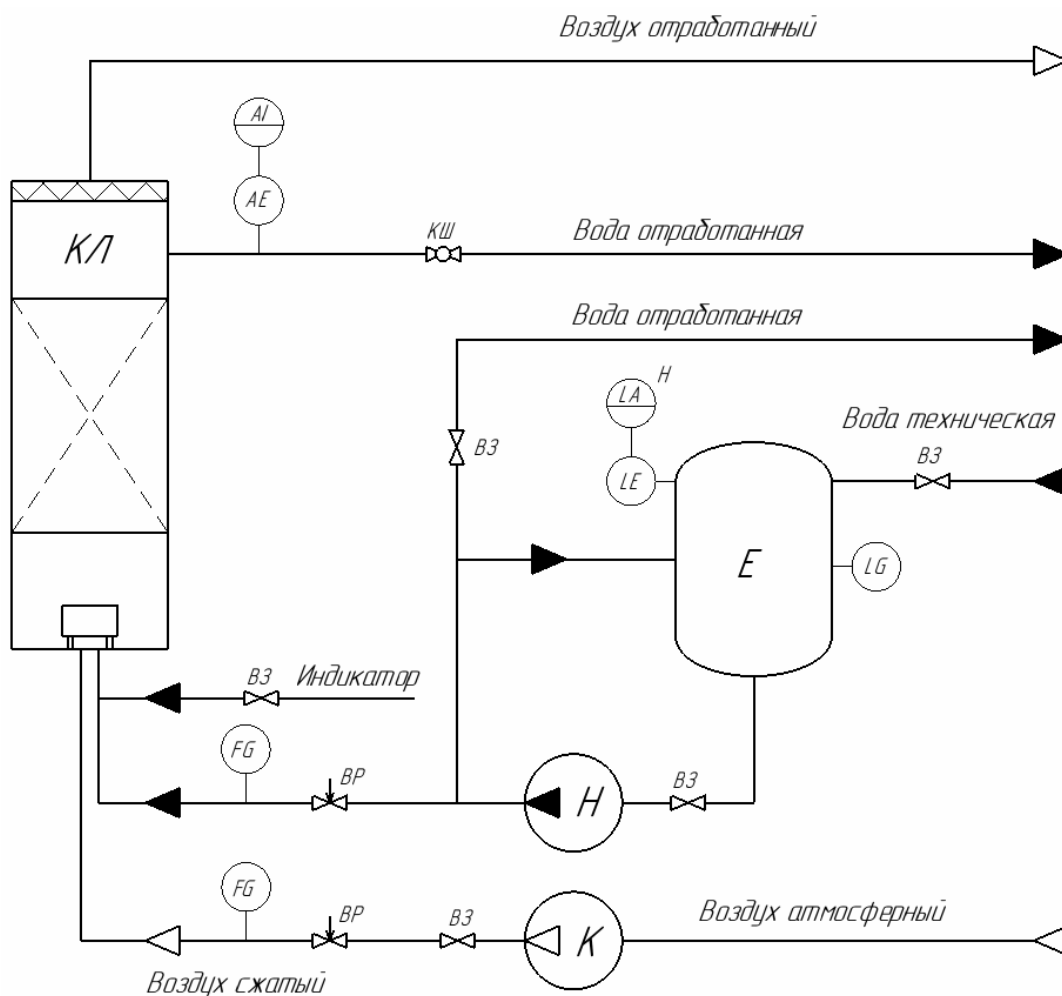


Рисунок 2.2.1 - Технологическая схема лабораторного стенда:
КЛ - колонна лабораторная; Е - емкость; Н - насос; К - компрессор;
BP - вентиль регулирующий; BЗ - вентиль запорный

Главным элементом установки является лабораторная барботажная колонна КЛ. Ее корпус с внутренним диаметром 200 мм и высотой порядка 1,5 м собирается из царг, изготовленных из прозрачного органического стекла. Внутри колонны на опорные газораспределительные решетки устанавливаются блоки контактных теплообменных устройств.

Подача воды в колонну осуществляется с помощью центробежного насоса Н, всасывающая линия которого подключается к стальной буферной емкости Е. На нагнетательной линии насоса предусмотрен циркуляционный байпас, который возвращает поток обратно в буферную емкость. В указанный циркуляционный байпас врезается линия слива отработанной жидкости в канализацию. Направление движения жидкости устанавливается

					Лист
BP-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ					26
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

с помощью трубопроводной арматуры. Для контроля уровня жидкости в буферной емкости предусмотрена стеклянная уровнемерная колонка в металлическом корпусе и кондуктометрический сигнализатор уровня с сигнализацией по верхнему значению (пределно высокий уровень).

Источником сжатого воздуха является поршневой компрессор *K* с ресивером, который подключается через систему трубопроводов к нижней части барботажной колонны. Отработанный воздух выходит обратно в помещение через верхнюю открытую часть лабораторной колонны.

С целью изучения структуры потоков в барботажной колонне предусмотрен узел ввода индикатора, который используется для снятия кривых отклика изучаемого объекта на импульсное возмущение. Ввод индикатора реализован с помощью тройника, установленного на нагнетающей линии насоса непосредственно перед входом воды в нижнюю часть колонны. На линии вывода жидкости из колонны устанавливается кондуктометрическая ячейка, которая подключена к микроконтроллеру Arduino. Он подает электрический ток напряжением 5В на кондуктометрическую ячейку и принимает приходящий от нее аналоговый сигнал, измеряя тем самым параметры обратного электрического тока. Результаты замеров сводятся в таблицу персонального компьютера.

Кондуктометрическая ячейка должны быть полностью заполнена жидкостью для достижения стабильности электрического сигнала. Данное требование обеспечивается поддержанием уровня жидкости в колонне выше уровня расположения ячейки с помощью шарового крана, устанавливаемого за ней по потоку. На случай непредвиденного повышения уровня предусмотрен резервный отвод жидкости в канализацию через дополнительный штуцер в верхней части аппарата (на схеме не показан). Помимо полного затопления кондуктометрической ячейки необходимо обеспечить отсутствие в проходящем через нее потоке газовых пузырей. Для этого в корпусе колонны у выходного штуцера жидкости устанавливается секторный карман.

2.2.2 Порядок проведения опытов

Эксперименты проводятся на лабораторной установке, описанной выше. Модельными средами являются вода и воздух. В качестве трассера принято использовать раствор поваренной соли с концентрацией не ниже 20%. Перед началом эксперимента необходимо выполнить следующие действия:

- произвести визуальный осмотр лабораторного стенда на наличие дефектов и поломок;
- осуществить проверку работоспособности насосно-компрессорного оборудования;
- подтвердить возможность подачи электроэнергии, воды и сжатого воздуха на установку;

- включить персональный компьютер, запустить программное обеспечение микроконтроллера, проверить чистоту сигнала кондуктометрической ячейки при отсутствии электропроводящей среды;

- приготовить раствор трассера соответствующей концентрации (для каждой экспериментальной точки готовится раствор с одинаковой концентрацией);

- отмерить необходимое количество индикатора (160 мл) и подготовить систему его впрыска в линию подачи воды на входе в лабораторную колонну;

- заполнить стальной бак водой до требуемого уровня;

- открыть запорный клапан на трубопроводе подачи сжатого воздуха от компрессора (регулирующий клапан перед лабораторной колонной остается закрытым).

После успешного выполнения всех вышеперечисленных мероприятий можно приступить к соответствующим опытам. Ниже представлена методика проведения эксперимента:

1. Запускают насос и компрессор, после чего с помощью регулирующих клапанов устанавливают заданные расходы воды и сжатого воздуха по ротаметрам.

2. Шаровым клапаном, установленным на линии отработанной воды, задают уровень газожидкостной смеси в колонне таким образом, чтобы кондуктометрическая ячейка была полностью затоплена жидкостью.

3. Поддерживая расходы, выводят установку на стационарный режим путем визуального контроля за движением газожидкостной смеси (необходимо дождаться, пока внутренние потоки стабилизируются и не будут менять свой характер в зависимости от времени).

4. Вводят трассер в поток воды на входе в лабораторную колонну и запускают на персональном компьютере программу для снятия показаний с кондуктометрической ячейки.

5. Регистрацию показаний заканчивают при установлении постоянных параметров сигнала кондуктометрической ячейки, соответствующих фоновой концентрации индикатора в выходящем потоке. При этом останавливают работу микроконтроллера через программу и сохраняют полученную таблицу показаний на жестком диске персонального компьютера.

С помощью представленной методики получают таблицы с экспериментальными данными для каждой исследуемой точки, которые соответствуют определенным расходам жидкости и газа по ротаметрам. Полученные по итогам эксперимента результаты подлежат дальнейшей аналитической обработке.

2.2.3 Методика обработки экспериментальных данных

Как указывалось выше, по результатам проведения эксперимента получают таблицу значений, отражающую экспериментальную функцию

						BP-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			28

распределения частиц по времени пребывания в аппарате. В данной работе на лабораторной установке получают зависимость:

$$U = f(\tau), \quad (2.2.1)$$

где U – напряжение, измеряемое на аналоговом входе в микроконтроллере Arduino, В; τ – время, с.

Полученные значения напряжения прямо пропорциональны концентрации трассера $C_{тр}$ на выходе из аппарата. Данные величины связаны следующим выражением:

$$U = kC_{тр}, \quad (2.2.2)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Следует отметить, что обработка экспериментальных данных не сопровождается поиском значения коэффициента k , указанного в формуле (2.2.2), поскольку он сокращается при определении функции плотности распределения. На основании этого вводим величину $C_э$, характеризующую экспериментальное значение концентрации трассера:

$$U = kC_{тр} = C_э. \quad (2.2.3)$$

Размерность принятой величины $C_э$ представим в виде условных единиц (у.е.). Таким образом, получаем табличную экспериментальную зависимость $C_э = f(\tau)$, процедура обработки которой представлена ниже.

В первую очередь находят эффективный объем аппарата. Для лабораторной барботажной колонны

$$V_{эф} = 0,785D^2 H(1 - \varphi), \quad (2.2.4)$$

где D – внутренний диаметр колонны, м; H – высота уровня газожидкостной смеси, м; φ – объемная доля внутренних устройств.

Расчетное среднее время пребывания жидкости в колонне находят по следующей формуле:

$$\bar{\tau}_p = \frac{V_{эф}}{Q}, \quad (2.2.5)$$

где Q – объемный расход жидкости, м³/с.

Следующим шагом является определение нормированной функции:

$$C(\tau) = \frac{C_э(\tau)}{\int_0^{\infty} C_э(\tau) d\tau}. \quad (2.2.6)$$

Для этого, задавшись фиксированным интервалом времени $\Delta\tau$, вычисляют сумму значений $\sum_i C_i^3(\tau)\Delta\tau$:

$$\int_0^{\infty} C_3(\tau)d\tau \approx \sum_i C_i^3(\tau_i)\Delta\tau. \quad (2.2.7)$$

Затем по формуле (2.2.6) находят значения нормированной функции для каждого момента времени с шагом $\Delta\tau$. Данную функцию необходимо привести к безразмерным величинам. Для этого находят среднее время пребывания из уравнения:

$$\bar{\tau} = \frac{\int_0^{\infty} \tau C_3(\tau)d\tau}{\int_0^{\infty} C_3(\tau)d\tau}. \quad (2.2.8)$$

Полученное значение сравнивают с теоретическим средним временем пребывания, рассчитанным по формуле (2.2.5). Затем определяют безразмерное время:

$$\theta = \frac{\tau}{\bar{\tau}}. \quad (2.2.9)$$

В итоге получают опытную безразмерную плотность распределения:

$$C(\theta) = \bar{\tau} C(\tau). \quad (2.2.10)$$

Дисперсия распределения частиц по времени пребывания в аппарате рассчитывается по следующему уравнению:

$$\sigma^2(\tau) = \int_0^{\infty} (\tau - \bar{\tau})^2 C(\tau)d\tau. \quad (2.2.11)$$

Полученное значение приводят к безразмерному виду:

$$\sigma^2(\theta) = \frac{\sigma^2(\tau)}{\bar{\tau}^2}. \quad (2.2.12)$$

После проведенных расчетов в декартовой системе координат строят зависимость $C(\theta) = f(\theta)$, которая носит название *C*-кривой. Полученную функцию необходимо сравнить с кривыми, полученными на основе ячеечной и диффузионной моделей. Для этого определяют их основные параметры.

Параметром, характеризующим ячеечную модель, является число ячеек идеального перемешивания N , соответствующее количеству линейных дифференциальных уравнений первого порядка в уравнении (2.1.2). Путем последовательного решения данного уравнения для каждой секции и

дифференцирования полученных результатов можно вывести аналитическое выражение C -кривой для ячеечной модели:

$$C(\theta) = \frac{N}{(N-1)!} \theta^{(N-1)} e^{-(N\theta)}. \quad (2.2.13)$$

Дисперсия распределения и искомое количество ячеек связаны между собой следующим соотношением:

$$\sigma^2(\theta) = \frac{1}{N}. \quad (2.2.14)$$

Установив по формуле (2.2.12) экспериментальное значение дисперсии распределения, с помощью выражения (2.2.14) можно с легкостью определить число ячеек идеального перемешивания для исследуемого лабораторного аппарата.

Параметром, характеризующим диффузионную модель, является коэффициент продольной диффузии D_L (или коэффициент обратного перемешивания). Отметим, что большое влияние на перемешивание оказывают скорость потока w и высота аппарата L . В связи с этим, для математического описания процесса используют критерий подобия Пекле:

$$Pe = \frac{wL}{D_L}. \quad (2.2.15)$$

Путем решения уравнения (2.2.1) для бесконечно длинного аппарата можно вывести аналитическое выражение C -кривой для диффузионной модели:

$$C(\theta) = \sqrt{\frac{Pe}{4\pi\theta}} \exp\left[-\frac{Pe(\theta-1)^2}{4\theta}\right]. \quad (2.2.16)$$

Уравнение связи между статическим параметром функции отклика $\sigma^2(\theta)$ и параметром диффузионной модели Pe имеет вид:

$$\sigma^2(\theta) = \frac{2}{Pe^2} [Pe - 1 + e^{-Pe}]. \quad (2.2.17)$$

Критерий Пекле диффузионной модели для лабораторной колонны находят с помощью численного решения уравнения (2.2.17). После чего по формуле (2.2.15) определяют значение коэффициента продольной диффузии.

Получив нужные параметры математических моделей, на уже построенный график с опытной C -кривой наносят кривые безразмерной плотности распределения по ячеечной и диффузионной моделям. Путем аналитического анализа построенных графиков делается вывод о том, какая модель наиболее полно и адекватно описывает опытную C -кривую

В случае значительного отклонения полученных графических зависимостей рассматривается задача определения параметров моделей

					Лист
					31
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

путем аналитического решения уравнений (2.2.13) и (2.2.16). При этом подбираются такие значения параметров, которые удовлетворяют критерию:

$$\sum_i (C_i^{\text{э}} - C_i^{\text{р}})^2 = \min, \quad (2.2.18)$$

где $C_i^{\text{э}}$ и $C_i^{\text{р}}$ – соответственно экспериментальное и рассчитанное по уравнениям (2.2.13) и (2.2.16) значения безразмерных концентраций.

Итоговые численные значения параметров ячеечной и диффузионной моделей подлежат дальнейшему анализу для получения выводов о структуре потоков в лабораторной колонне.

2.3 Результаты экспериментов

На лабораторной установке было проведено две серии экспериментов. В первой серии экспериментов участвовала пустотелая барботажная колонна, во второй – барботажная колонна с одним блоком контактного устройства. В каждой серии проводилось по 6 опытов при расходных газосодержаниях: 50%, 60% и 70%. Исследуемые диапазоны нагрузок по жидкости и газу соответственно составляли $w_{\text{ж}} = 0,01 - 0,02$ м/с и $w_{\text{г}} = 0,01 - 0,03$ м/с, где $w_{\text{ж}}$, $w_{\text{г}}$ – фиктивные скорости жидкости и газа, приведенные к поперечному сечению колонны.

Полученные кривые отклика пустотелой барботажной колонны и ее модификации с одним блоком контактного устройства соответственно представлены в приложениях Е и Ж. Численные показатели, отражающие структуру потоков в пустотелой барботажной колонне и ее модификации с одним блоком контактного устройства, соответственно представлены в таблицах 2.3.1 и 2.3.2.

Таблица 2.3.1 - Численные показатели для пустотелой барботажной колонны

Номер опыта	$w_{\text{ж}}$, м/с	$w_{\text{г}}$, м/с	$w_{\text{см}}$, м/с	β , %	$\tau_{\text{ср}}$, с	$\sigma^2(\theta)$	N
№1	0,0116	0,0122	0,0238	50	152	0,570	1-2
№2	0,0159	0,0169	0,0329	50	125	0,555	1-2
№3	0,0116	0,0169	0,0285	60	148	0,562	1-2
№4	0,0142	0,0217	0,0359	60	128	0,682	1-2
№5	0,0098	0,0217	0,0315	70	148	0,565	1-2
№6	0,0116	0,0267	0,0383	70	142	0,558	1-2

Таблица 2.3.2 - Численные показатели для барботажной колонны с одним блоком контактного устройства

Номер опыта	$w_{ж}$, м/с	$w_{г}$, м/с	$w_{см}$, м/с	β , %	$\tau_{ср}$, с	$\sigma^2(\theta)$	N
№1	0,0116	0,0122	0,0238	50	148	0,490	2
№2	0,0159	0,0169	0,0329	50	108	0,474	2
№3	0,0116	0,0169	0,0285	60	144	0,482	2
№4	0,0142	0,0217	0,0359	60	112	0,545	2
№5	0,0098	0,0217	0,0315	70	142	0,486	2
№6	0,0116	0,0267	0,0383	70	130	0,478	2

В представленных таблицах приняты следующие сокращения $w_{ж}$, $w_{г}$, $w_{см}$ – фиктивные скорости жидкости, газа и газожидкостной смеси приведенные к поперечному сечению колонны; β – значение расходного газосодержания, округленное с точностью до 1,5%; $\tau_{ср}$ – среднее время пребывания частиц жидкости в колонне; $\sigma^2(\theta)$ – дисперсия распределения частиц жидкости по времени пребывания в колонне; N – число ячеек идеального перемешивания ячейной математической модели. Диффузионная математическая модель при обработке экспериментальных данных не использовалась, поскольку с помощью нее не удастся описать действительную структуру потоков в аппарате.

В первую очередь проанализируем результаты эксперимента с пустотелой барботажной колонной. Глядя на полученные численные показатели (таблица 2.3.1), следует отметить, что действительная структура потоков в аппарате находится в пределах между подобранными ячейными моделями с одной и двумя ячейками идеального перемешивания. При этом на кривых отклика пустотелой барботажной колонны, представленных на рисунке 2.3.1, можно заметить, как опытные точки занимают промежуточное положение между кривыми, построенными с помощью ячейных моделей с одной и двумя ячейками идеального перемешивания.

Таким образом, структура потоков в пустотелой барботажной колонне приближается к режиму идеального смешения и практически не изменяется в зависимости от нагрузок по жидкости и газу. Однако, анализируя полученные результаты, можно проследить следующие тенденции. С увеличением расходного газосодержания в барботажной колонне при постоянной фиктивной скорости жидкости снижается среднее время пребывания частиц жидкости (см. рисунок 2.3.2, кривая 1) и безразмерная дисперсия распределения (см. рисунок 2.3.3, кривая 1). Это приводит к тому, что структура потоков в колонне, хоть и незначительно, но приближается к ячейной математической модели с двумя ячейками идеального перемешивания (см. рисунок 2.3.1). Аналогичная ситуация проявляется и с

увеличением фиктивной скорости жидкости при постоянном газосодержании (см. рисунок 2.3.4).

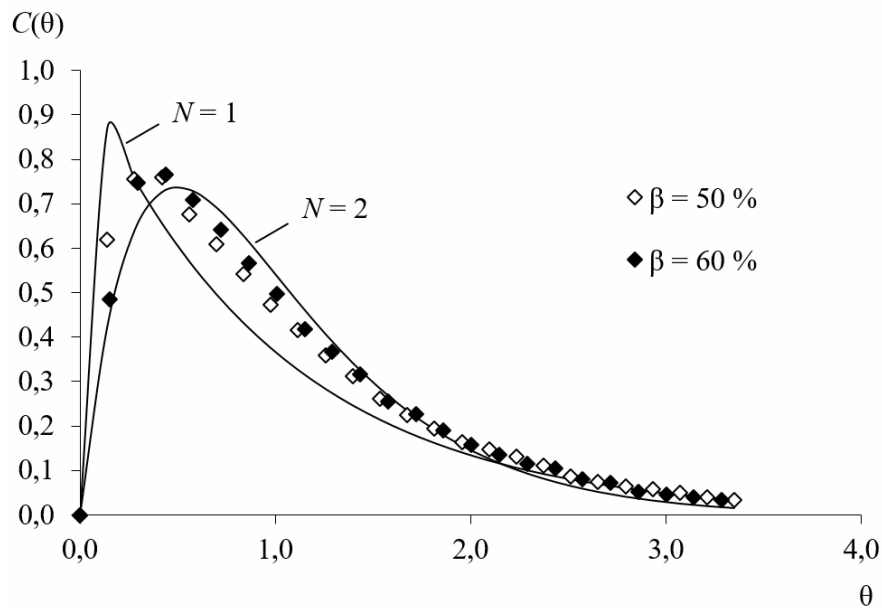


Рисунок 2.3.1 - Кривые отклика пустотелой барботажной колонны на импульсные возмущения при $w_{ж} = 0,012$ м/с

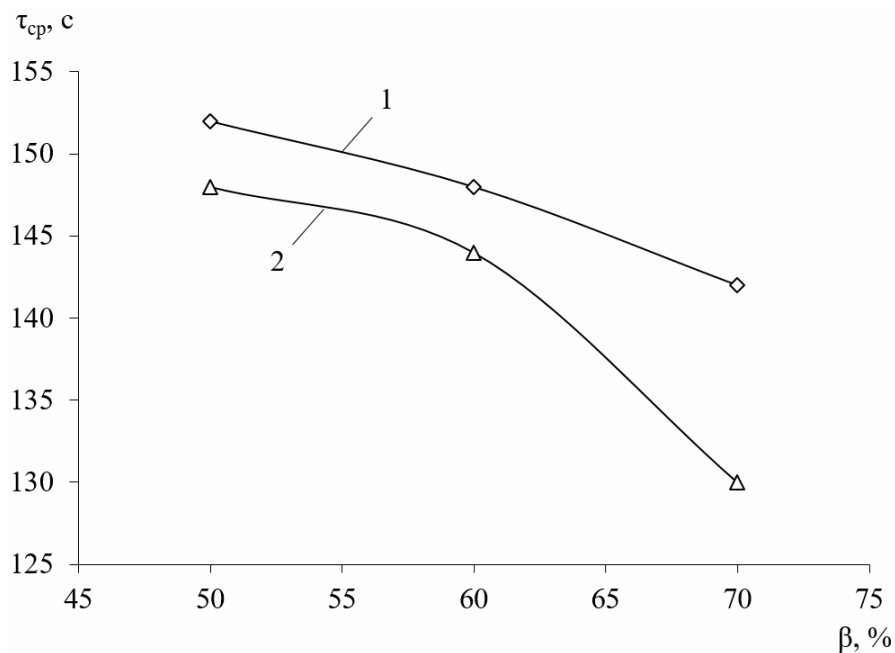


Рисунок 2.3.2 - Зависимость среднего времени пребывания частиц жидкости от расходного газосодержания при $w_{ж} = 0,012$ м/с:

1 – для пустотелой барботажной колонны; 2 – для барботажной колонны с одним блоком контактного устройства

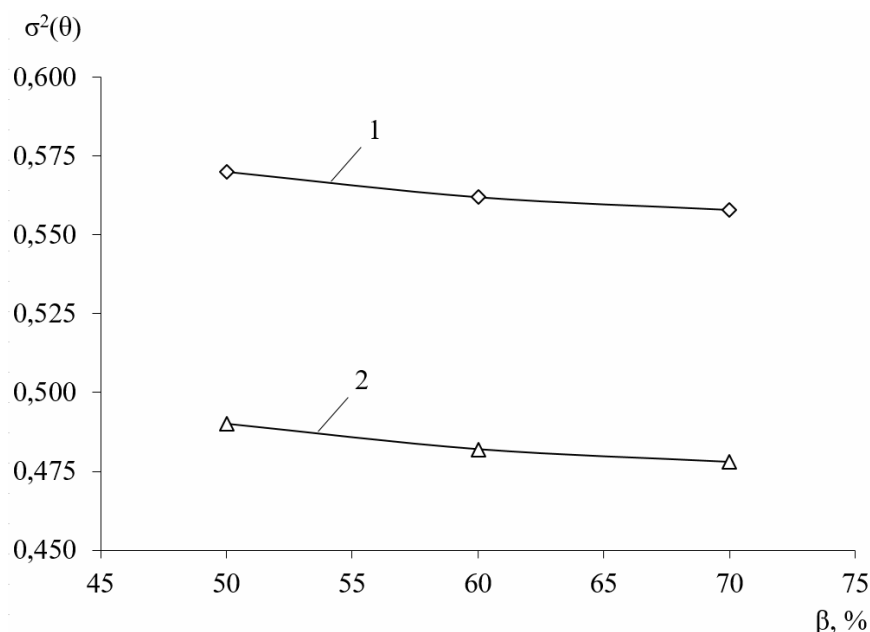


Рисунок 2.3.3 - Зависимость безразмерной дисперсии распределения частиц жидкости от расходного газосодержания при $w_{ж} = 0,012$ м/с:
1 – для пустотелой барботажной колонны; 2 – для барботажной колонны с одним блоком контактного устройства

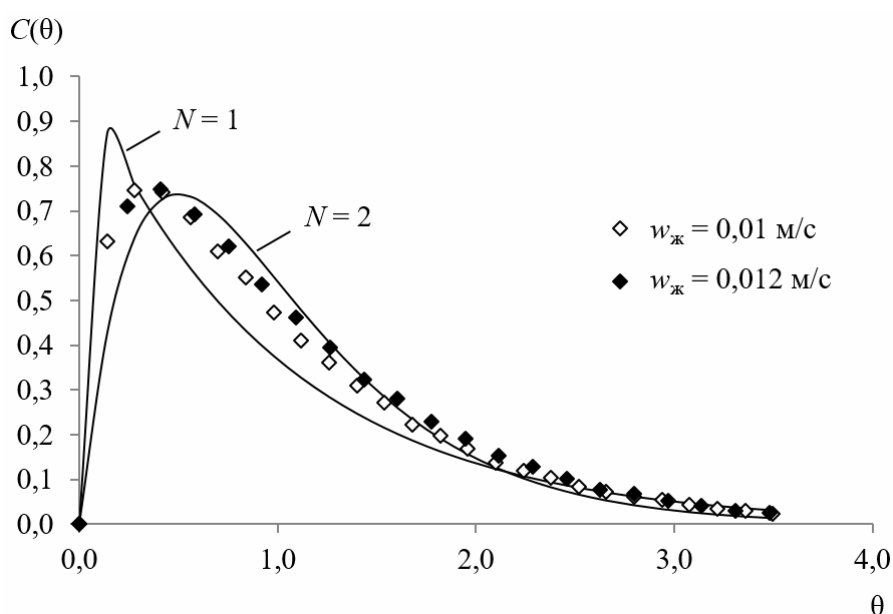


Рисунок 2.3.4 - Кривые отклика пустотелой барботажной колонны на импульсные возмущения при $\beta = 70\%$

После установки в барботажную колонну одного блока контактного устройства структура потоков в ней изменяется и соответствует ячеечной модели с двумя ячейками идеального перемешивания. Сравнение кривых отклика пустотелой барботажной колонны и ее модификации с одним блоком контактного устройства представлено на рисунках 2.3.5 и 2.3.6.

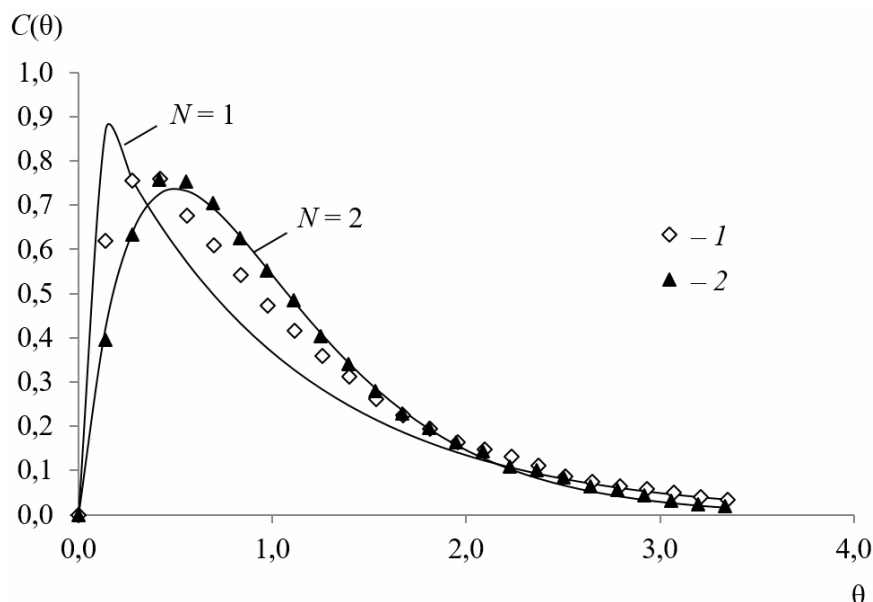


Рисунок 2.3.5 - Кривые отклика барботажной колонны на импульсные возмущения при $\beta = 50\%$ и $w_{см} = 0,024$ м/с:
 1 – опытные точки для пустотелой барботажной колонны; 2 – опытные точки для барботажной колонны с одним блоком контактного устройства

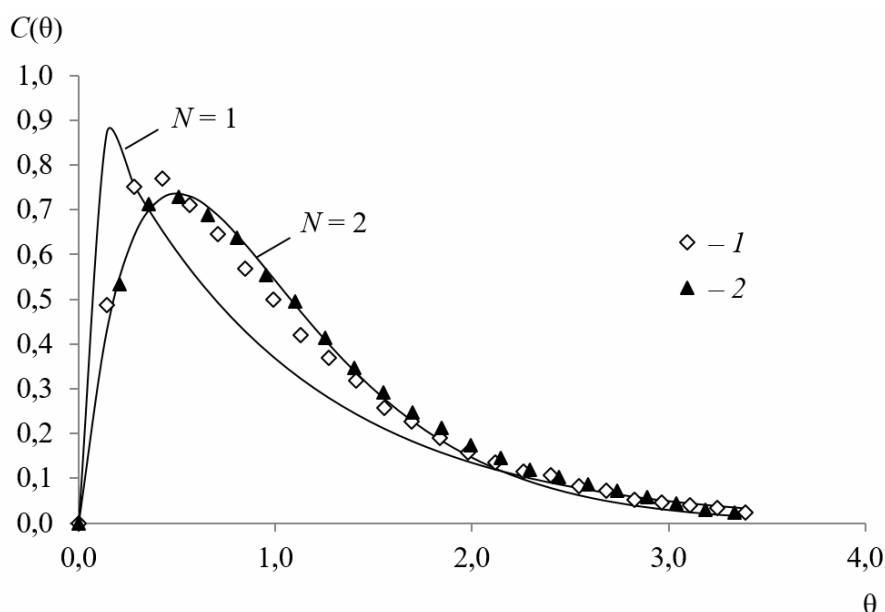


Рисунок 2.3.6 - Кривые отклика барботажной колонны на импульсные возмущения при $\beta = 60\%$ и $w_{см} = 0,0285$ м/с:
 1 – опытные точки для пустотелой барботажной колонны; 2 – опытные точки для барботажной колонны с одним блоком контактного устройства

Таким образом, наличие в барботажной колонне контактного устройства потенциально приводит к увеличению количества ячеек идеального перемешивания подбираемой ячеечной модели. Следовательно, с увеличением в колонне доли, занимаемой контактным устройством, будет наблюдаться изменение структуры потоков в аппарате в сторону режима идеального вытеснения.

Сравнивая таблицы численных показателей 2.3.1 и 2.3.2, можно заметить, что после установки в барботажную колонну контактного устройства уменьшается среднее время пребывания частиц и безразмерная дисперсия их распределения во всем диапазоне нагрузок по жидкости и газу. Также на рисунках 2.3.2 и 2.3.3 видно, что кривые 2 для барботажной колонны с контактным устройством лежат ниже кривых 1 для пустотелой колонны. При этом общий характер данных кривых практически не изменяется.

Дополнительно следует обратить внимание на опыт №4, поскольку для обеих серий экспериментов получаемые результаты данного опыта значительно отклоняются от результатов других опытов. Повтор опыта №4 не изменяет сложившуюся ситуацию. Судя по всему именно данные фиктивные скорости жидкости и газа ($w_{ж} = 0,014$ м/с и $w_{г} = 0,022$ м/с) создают такую структуру потоков в барботажной колонне, которая наиболее близко приближается к режиму идеального смешения. Наличие контактного устройства в колонне сглаживает структуру потоков в опыте №4, приближая ее к ячеечной модели с двумя ячейками идеального перемешивания. Однако, отклонения по численным показателям структуры потоков и виду кривой отклика все еще остаются заметными относительно других опытов.

При проведении экспериментов осуществлялась видеосъемка движения газожидкостной смеси внутри барботажной колонны, отдельные кадры которой представлены в приложении И. По результатам анализа видеозаписей, снятых при проведении серии экспериментов с пустотелой барботажной колонной, следует отметить, что движение газожидкостной смеси после распределительной части колонны сопровождается интенсивным перемешиванием как в горизонтальной, так и вертикальной плоскостях. Также замечается образование локальных циркуляционных зон, преимущественно у периферии корпуса колонны.

Видеосъемка движения газожидкостной смеси в барботажной колонне с контактным устройством показала, что газовые пузыри задерживаются перед входом в каналы устройства, где впоследствии образуются отдельные циркуляционные зоны (см. рисунок 2.3.7). При этом с увеличением значений расходного газосодержания масштаб данных циркуляций также увеличивается.

Внутри каналов устройства газожидкостная смесь движется более прямолинейно без образования застойных и циркуляционных зон. Выход газожидкостной смеси из данных каналов осуществляется в виде распыляющейся струи и на некотором расстоянии от верхнего края устройства снова наблюдается интенсивное перемешивание (см. рисунок 2.3.7.) С увеличением расходного газосодержания ширина факела распыла газожидкостной смеси на выходе из каналов устройства увеличивается, а расстояние от верхнего края устройства, на котором начинается перемешивание потоков, уменьшается.

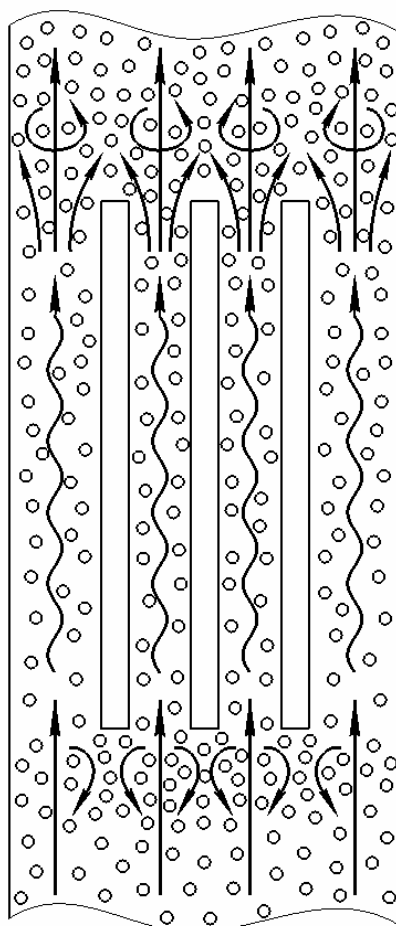


Рисунок 2.3.7 - Общий вид структуры потоков в барботажной колонне с одним блоком контактного устройства

2.4 Выводы по исследовательской части

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- получены кривые отклика пустотелой барботажной колонны и ее модификации с одним блоком контактного устройства на импульсные возмущения, а также определены численные показатели, отражающие структуру потоков;
- подобраны математические модели для описания структуры потоков в пустотелой барботажной колонне и в ее модификации с одним блоком контактного устройства;
- наглядно отражено изменение структуры потоков в барботажной колонне после установки в нее одного блока контактного устройства;
- представлены зависимости среднего времени пребывания частиц и безразмерные дисперсии их пребывания от расходного газосодержания при постоянной фиктивной скорости жидкости в барботажной колонне;
- описаны результаты видеосъемки движения газожидкостной смеси в барботажной колонне во время проведения экспериментов, а также представлена схема с общим видом структуры потоков в колонне с контактным устройством.

Исследование структуры потоков в барботажной колонне с контактными устройствами на данном этапе не заканчивается. Полученные в настоящей работе результаты открывают новые направления дальнейших исследований:

- исследование структуры потоков в барботажной колонне с двумя блоками контактных устройств, при конфигурации блоков тремя теплообменными модулями;
- исследование структуры потоков в барботажной колонне с одним и двумя блоками контактных устройств, при конфигурации блоков двумя и четырьмя теплообменными модулями;
- увеличение размеров колонны и исследование структуры потоков в ней с учетом установки большего количества блоков контактных устройств;

Основными целями данных исследований будут являться: приближение физической модели барботажной колонны к ее промышленному исполнению, определение коэффициентов масштабного перехода, оценка влияния конфигурации устройства и количества блоков на структуру потоков в барботажной колонне; а также поиск максимально достижимого количества ячеек идеального перемешивания подбираемой ячеечной модели.

Результаты данных исследований будут иметь большую важность при расчете промышленных барботажных колонн с контактными устройствами для проведения различных технологических процессов. Например, если колонна будет использоваться в качестве химического реактора, то ее можно будет представить как каскад реакторов идеального перемешивания. Тогда количество реакторов в каскаде будет соответствовать количеству ячеек идеального перемешивания ячеечной математической модели. Путем совместного рассмотрения уравнений материального баланса реактора и кинетического уравнения скорости реакции с учетом известного количества ячеек идеального перемешивания можно найти требуемый объем реактора или решить обратную задачу, т.е. произвести расчет основных технологических показателей процесса при заданном объеме реактора.

При расчете тепломассообменных процессов, протекающих в барботажной колонне с контактными устройствами, найденные параметры ячеечной математической модели позволят произвести расчет средней движущей силы для данных процессов. Например, с учетом имеющегося количества ячеек идеального перемешивания ячеечной модели для барботажной колонны с контактными устройствами средняя разность температур в ней (при использовании в качестве теплоносителя сухого насыщенного водяного пара) может быть найдена по следующей формуле:

$$\Delta T_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta T_i, \quad (2.4.1)$$

где N – количество ячеек; $\Delta T_i = T_{\Pi} - T_{ki}$ – разность температур в i -ячейке; T_{Π} – температура конденсации водяного пара; T_{ki} – конечная температура

газожидкостной смеси в в i -ячейке, рассчитываемая путем последовательного решения уравнений теплового баланса для каскада реакторов идеального перемешивания:

$$Gc(T_{ki} - T_{ni}) = \frac{KF}{N}(T_{ni} - T_{ki}); \quad (2.4.2)$$

$$T_{ki} = \frac{KFT_{ni} + NGcT_{ni}}{NG + KF}, \quad (2.4.3)$$

где G – массовый расход, кг/с; c – удельная теплоемкость, Дж/кг; T_{ni} – начальная температура в i -ячейке (для $i = 1$ принимается начальной температуре T_n , для последующих ячеек $T_{ni} = T_{ki-1}$); K – коэффициент теплопередачи, Вт/м²·К; F – поверхность теплопередачи.

После завершения исследования структуры потоков в барботажной колонне с контактными устройствами можно будет приступить к изучению тепло- и массообменных показателей ее работы. Тогда технологическая схема лабораторного стенда будет иметь вид, представленный на рисунке 2.4.1. Согласно представленной схеме потребуются установка дополнительного оборудования в виде буферной емкости и насоса для теплоносителя, а также внедрение новых средств КИПиА. Расчет лабораторной колонны для проведения тепломассообменного процесса абсорбции кислорода воздуха водой и подбор насосно-компрессорного и вспомогательного оборудования представлен в разделе 3 настоящей работы.

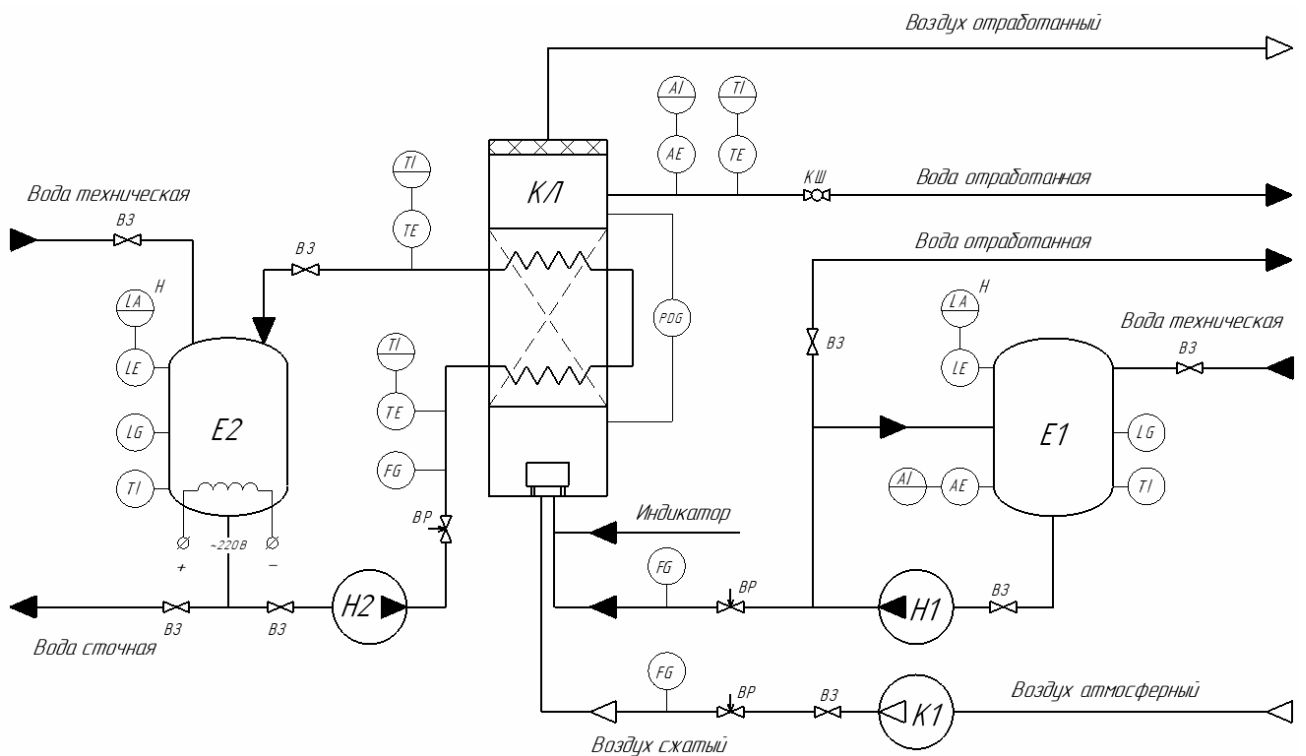


Рисунок 2.4.1 - Технологическая схема лабораторного стенда для изучения тепломассообменных параметров работы контактного устройства

2.5 Общие требования к безопасности проведения исследований

В отличие от крупных химических производств, работа в лаборатории является сравнительно безопасной, особенно при работе с безопасными средами. Однако это не исключает риски получения травм, ожогов и поражения электрическим током. Следовательно, задачами данного подраздела являются анализ вредных и опасных факторов, разработка мероприятий, направленных на снижение рисков ухудшения здоровья человека и состояния лабораторного помещения, описание организационных и технических средств для обеспечения пожарной и электрической безопасности лабораторного помещения, а также определение параметров микроклимата, вентиляции, отопления, освещения и т.д.

2.5.1 Вредные и опасные факторы, присущие научно-исследовательской лаборатории

Научно-исследовательская лаборатория представляет собой отапливаемое помещение объемом 165 м^3 и площадью 55 м^2 . В лаборатории размещены установки для проведения научных исследований, парты, стулья, раковина и встроенные в стены шкафы для хранения инструментов и необходимого оборудования. По согласованию с заведующим лаборатории, в зависимости от вида научных исследований, может быть организована работа сразу нескольких установок. При этом максимальное число людей, которые могут одновременно работать в лаборатории, составляет 8 человек. В соответствии с [24] для одного человека в лабораторном помещении высших учебных заведений должна быть предусмотрена площадь 6 м^2 . Тогда нормируемая площадь помещения составляет 48 м^2 , что меньше его фактической площади 55 м^2 . Таким образом, рассматриваемая лаборатория соответствует действующим нормативным документам.

Рассмотрим опасные и вредные факторы, которые могут иметь место в научно-исследовательской лаборатории, а также разделим их на группы в соответствии с [25]:

- физические: движущиеся и быстровращающиеся элементы машин и механизмов (валы электродвигателей насосов); наличие напряжения в линиях электросетей (силовые кабели оборудования и различных средств КИПиА); повышенная температура поверхностей (трубопровод горячего теплоносителя, корпус буферной емкости горячего теплоносителя); повышенный уровень шума (шум от работы насосно-компрессорного оборудования); наличие вибраций (вибрация от корпуса лабораторной колонны при большом расходе газовой фазы, вибрация от работы насосно-компрессорного оборудования); недостаточная освещенность рабочей зоны; действие сил тяжести, когда оно может вызвать падение людей (работа на площадке обслуживания).

- психофизические: умственное перенапряжение, перенапряжение анализаторов (повышенная информационная нагрузка), монотонность труда

										Лист
										41
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

и эмоциональные нагрузки (при долгосрочном проведении исследовательских работ).

Химические и биологические опасные и вредные факторы в научно-исследовательской лаборатории отсутствуют.

2.5.2 Санитарно-гигиенические мероприятия

Для работы на лабораторных стендах используются доступные и безопасные среды: вода и воздух. Следовательно не требуется организация методов контроля наличия вредных веществ в воздухе рабочей зоны, а также осуществление мероприятий по защите персонала от вредного воздействия рабочих веществ.

Средства индивидуальной защиты от воздействия рабочих веществ в лаборатории не предусмотрены. Наличие спецодежды и спецобуви не требуется, однако должен быть предусмотрен комплект халатов для персонала лаборатории с целью предотвращения контакта повседневной одежды с металлоконструкциями, стенами помещения и т.д.

Для лабораторного помещения предусмотрим общеобменную вентиляцию, кратность воздухообмена которой рассчитывается по формуле:

$$K = W/V, \quad (2.5.1)$$

где W – производительность вентиляционной установки в соответствии с правилами [26]; $V = 165 \text{ м}^3$ – объем помещения.

Из приложения И [26] находим минимальный расход воздуха на одного человека в количестве $30 \text{ м}^3/\text{ч}$ с учетом естественного проветривания. Как указывалось выше, максимальное число людей, работающих в лаборатории, составляет 8 человек. Тогда требуемая производительность вентиляционной установки имеет значение $W = 240 \text{ м}^3/\text{ч}$. Находим кратность воздухообмена:

$$K = 240/165 = 1,45 \text{ ч}^{-1}. \quad (2.5.2)$$

Принимаем кратность воздухообмена $K = 2 \text{ ч}^{-1}$.

Определим оптимальные и допустимые параметры микроклимата для лабораторного помещения. Согласно [27] научно-исследовательская лаборатория относится ко 2-ой категории помещений, в которой люди заняты умственным трудом. В соответствии с [28] имеем категорию работ в помещении Ib, связанную с интенсивностью энергозатрат 140-174 Вт и производимую сидя, стоя или связанную с ходьбой, а также сопровождающуюся некоторым физическим напряжением. Оптимальные и допустимые величины показателей микроклимата для помещения представлены в таблицах 2.5.1 и 2.5.2 соответственно.

В холодный период года научно-исследовательская лаборатория обогревается с помощью водяного отопления. В помещении предусмотрено 4

					ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

радиатора отопления, в которые подается горячая вода из городской теплоэлектростанции или с ближайшей котельной. Температура воды в зависимости от погодных условий регулируется поставщиком тепла.

Таблица 2.5.1 - Оптимальные величины показателей микроклимата

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

Таблица 2.5.2 - Допустимые величины показателей микроклимата

Период года	Температура воздуха, °С		Температура поверхностей, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с	
	Ниже*	Выше*			Ниже*	Выше*
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

* - Указание допустимых величин показателей микроклимата в диапазонах "Ниже" и "Выше" оптимальных величин.

В научно-исследовательской лаборатории источниками шума являются насосы и компрессор. По частотной характеристике имеем низкочастотный шум, по характеру спектра – широкополостный, по временным характеристикам – постоянный.

Величины параметров шума согласно паспорту санитарно-технического состояния лаборатории:

1. Среднегеометрическая частота (из стандартного ряда) – 63 Гц.
2. Уровень звука – 80 дБА.
3. Уровень звукового давления – 85 дБ.

Согласно [29] для высококвалифицированной работы, а также измерительных и аналитических работ в лаборатории имеем предельно допустимый уровень звукового давления (в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 63 Гц) 71 дБ и уровня звука 60 дБА.

Делаем вывод, что величины параметров шума в лаборатории превышают ранее принятые санитарные нормы, следовательно, при работе на лабораторной установке требуется применение индивидуальных средств защиты: противошумных наушников или берушей.

Источниками вибрации в лаборатории также являются насосы и компрессор. Согласно [30] все насосно-компрессорное оборудование лаборатории относится к машинам типа 2. Это машины, которые не находятся в контакте с телом человека, но могут передавать на него вибрацию через механическую связь и связь других видов.

По источнику возникновения рассматриваемая вибрация относится к общей вибрации 1 категории, по спектру – широкополостная, по частотному составу – среднечастотная, по временной характеристике – постоянная.

Согласно техническим паспортам насосно-компрессорного оборудования имеем следующие виброхарактеристики:

1. Среднеквадратическое значение виброскорости (в октавных полосах частот в диапазоне от 8 до 63 Гц) – $0,1 \text{ м/с} \cdot 10^{-2}$.

2. Логарифмический уровень вибрации – 90 дБ.

В соответствии с [31] находим предельно допустимые значения вибрации на рабочих местах: среднеквадратичное значение виброскорости – $0,22 \text{ м/с} \cdot 10^{-2}$; логарифмический уровень вибрации – 93 дБ.

Делаем вывод, что величины виброхарактеристик вспомогательного оборудования находятся в допустимых пределах. Не смотря на это, с целью снижения воздействия вибрации на людей в лаборатории предусмотрены виброизолирующие изделия типа 2 [30]: упругие опоры для оборудования и гибкие вставки для трубопроводов.

Дадим характеристику зрительной работы в научно-исследовательской лаборатории:

1. Характеристика зрительных работ – средняя точность.

2. Наименьший размер объекта различения (деления лабораторного термометра) – от 0,5 до 1 мм.

3. Разряд зрительной работы – в.

4. Контраст объекта с фоном – средний.

5. Характеристика фона – светлый.

Освещение в лаборатории совмещенное, причем естественное освещение – одностороннее боковое. Нижегородская область относится к 1 группе административных районов по ресурсам светового климата, при этом коэффициент светового климата равен единице. Нормированное значение КЕО согласно [32, 33] для лабораторных помещений составляет $e_n = 1,2\%$.

Согласно паспорту санитарно-технического состояния лаборатории фактическая освещенность в рабочей точке помещения составляет $E_B = 300 \text{ лк}$. Освещенность на улице в преимущественно солнечную погоду составляет $E_n = 15000 \text{ лк}$. Тогда коэффициент естественной освещенности в рабочей точке найдем по формуле:

$$e = \frac{E_B}{E_H} \cdot 100\% = \frac{300}{15000} \cdot 100\% = 2\%. \quad (2.5.3)$$

Коэффициент естественной освещенности в рабочей точке превышает нормируемую величину КЕО, то есть $e > e_H$. Следовательно, рассматриваемое боковое естественное освещение соответствует поставленным нормам.

Для рассматриваемого помещения предусмотрим рабочее и эвакуационное виды искусственного освещения. Общая система рабочего освещения будет состоять из светильников на потолке, которые, в свою очередь, должны освещать не только рабочие поверхности, но и все помещение в целом. Для организации искусственного рабочего освещения будем использовать светильники типа ЛСП02 с люминесцентными лампами ЛБ40 [34] для нормальных условий среды. В одном светильнике устанавливается по 2 люминесцентных лампы мощностью 40Вт.

Эвакуационное освещение в соответствии с рекомендациями [34, стр. 13] разместим над выходным проемом из лаборатории, питание его осуществляется через общую электрическую сеть, однако на случай чрезвычайной ситуации предусмотрено наличие аккумуляторного блока питания.

Расчет количества светильников, необходимого для обеспечения освещенности, произведем с помощью графиков Гурова и Прохорова [34, стр. 151]. Согласно [32] принимаем освещенность $E = 200$ лк, высота расположения светильников $h = 2 - 3$ м, коэффициенты отражения $\rho_{\text{п}} = 70\%$, $\rho_{\text{с}} = 50\%$, $\rho_{\text{р}} = 10\%$ [34]. График для определения числа светильников с люминесцентными лампами ЛБ40 представлен на рисунке 2.5.1.

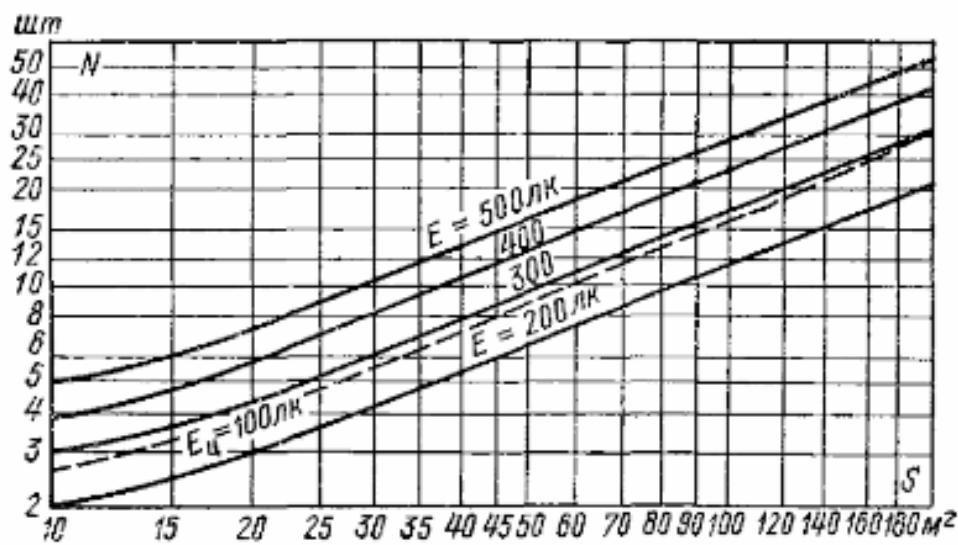


Рисунок 2.5.1 - График для определения числа светильников с люминесцентными лампами ЛБ40

По рисунку 2.5.1 при площади помещения 55 м² принимаем к работе 8 светильников с люминесцентными лампами ЛБ40.

2.5.3 Техника безопасности

Согласно [35] лаборатория относится к помещениям без повышенной опасности, так как в ней отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность (токопроводящая пыль, сырость, высокая температура, токопроводящие полы). Все электрическое оборудование работает под напряжением 380/220 В переменного тока.

Для защиты персонала от поражения электрическим током необходимо провести ряд мероприятий:

- заизолировать токоведущие части электрооборудования;
- заземлить все электрооборудование, при этом сопротивление заземления не должно превышать 4 Ом при линейных напряжениях 220В источника однофазного тока, согласно [35];

- проинструктировать персонал с целью его ознакомления с правилами электробезопасности и особенностями работы с электрооборудованием;

- допускать к ремонту и монтажу устройств, связанных с электрическим током, только квалифицированных специалистов, например, электромонтеров.

В лабораторном помещении отсутствуют источники образования статического электричества, следовательно, не требуется внедрение методов защиты от его воздействия.

Согласно [36], здание, в котором располагается рассматриваемая лаборатория, является обычным объектом, поскольку оно имеет высоту менее 60 метров и не представляет опасность для непосредственного окружения. Здание имеет III категорию по молниезащите и его необходимо защищать только от прямых ударов молнии. Молниезащитная система состоит из молниеприемников (соединенная между собой стальная арматура), токоотводов и заземлителей, сопротивление которых не должно превышать 10 Ом.

Далее разработаем мероприятия по обеспечению безопасных условий эксплуатации экспериментальных установок и оборудования. В первую очередь представим техническую характеристику лабораторной колонны (таблица 2.5.3). Колонна регистрации в органах Ростехнадзора не подлежит. Она имеет малый диаметр (200 мм) и разборную конструкцию из царг, в соответствии с этим для осмотра, очистки и ремонта аппарата установка люков, лазов и смотровых лючков не требуется.

Для герметизации фланцевых соединений между царгами используются прокладки из резины. Конструкционные материалы колонны: стекло органическое СО-95-К, сталь 12Х18Н10Т, сталь 20. Крепежные изделия (болты, гайки) изготовлены из стали 45.

					ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ	Лист
						46
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Аппарат имеет подводящие и отводящие коммуникации (трубопроводы), регулиующую арматуру, контрольно-измерительные приборы (ротаметры, термометры, дифманометр). Наличие предохранительных устройств в лабораторной колонне не требуется.

Гидроиспытания аппарата проводятся под наливом воды в течение нескольких минут. После проведения испытаний колонну необходимо высушить воздухом. Гидроиспытания аппарата производятся только под контролем преподавателя или заведующего лабораторией.

Таблица 2.5.3. Техническая характеристика лабораторного аппарата

Наименование		Корпус	
Давление, МПа	Рабочее	Атмосферное	
	Расчетное	0,006	
	Пробное	0,0132	
Расчетная температура стенки, °С		30	
Характеристика рабочей среды	Состав		
	Температура, °С	минимальная	20
		максимальная	30
Внутренний объем, м ³		0,047	
Масса, кг	в рабочем состоянии	59,7	
	при гидроиспытаниях	75,3	
Габаритные размеры, мм		320×300×1558	

При работе на лабораторной установке должны быть соблюдаться следующие правила безопасности и меры предосторожности:

- персонал, представленный к работе на установке, должен изучить правила безопасности и пройти инструктаж у преподавателя или заведующего лабораторией;
- запрещено приступать к исследованиям без получения разрешения на проведение работ от научного руководителя;
- проводить исследования на лабораторной установке можно только в составе от 3 человек;
- все исследования должны проводиться под контролем преподавателя или любого другого научного сотрудника;

- при работе на установке необходимо следовать инструкции по технике безопасности в лабораторном помещении;
- при получении травм или поражении электрическим током лабораторных рабочих необходимо оказать пострадавшим первую медицинскую помощь и вызвать врача из ближайшего медицинского пункта;
- при обнаружении технических неисправностей трубопровода или электрооборудования необходимо немедленно доложить о ней преподавателю или заведующему лабораторией;
- запрещено лично устранять неисправности, связанные с работами, требующими высокого уровня квалификации;
- по окончании работ необходимо освободить аппараты и вспомогательное оборудование от рабочих сред, отключить электрооборудование и привести рабочее помещение в порядок.

2.5.4 Пожарная безопасность

Как уже обговаривалось ранее, рабочими средами в лаборатории являются вода и воздух. Данные вещества не несут в себе какую-либо угрозу с точки зрения пожароопасности. Единственными склонными к горению материалами в лаборатории являются: органическое стекло, входящее в состав корпусов различного оборудования; дерево, из которого изготовлены столы, стулья, плинтуса, подоконники; резина, в виде материала амортизаторов для вспомогательного оборудования.

Какие-либо самовоспламеняющиеся вещества и материалы в лаборатории не применяются, также в ней отсутствуют взрывоопасные смеси. Следовательно, взрывозащитное исполнение электрооборудования не требуется. Для электрооборудования предусмотрена защита только от пыли и влаги.

Пожары в помещении могут возникнуть из-за неисправности электросетей и электрооборудования, прямого удара молнии, а также из-за человеческого фактора, например, при сварочных работах.

В соответствии с паспортом санитарно-технического состояния лаборатории, а также документами [35] и [37] имеем, что рассматриваемое помещение относится к категории В4 по взрывопожарной и пожарной опасности. Класс зоны по пожароопасности П–Па.

Стены сооружены из оштукатуренной и окрашенной кирпичной кладки, плиты перекрытий изготовлены из бетона. Их пределы огнестойкости устанавливаются по времени (в минутах) наступления одного из признаков предельных состояний:

- потери несущей способности (R);
- потери целостности (E);
- потери теплоизолирующей способности (I).

Имеем пределы огнестойкости стен REI 150 и перекрытий REI 60.

						Лист
					ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ	48
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Здание, в котором находится лаборатория, имеет 4 этажа и 3 эвакуационных выхода. Расстояние от наиболее удаленного рабочего места до эвакуационного выхода составляет 15 метров.

В лаборатории установлена противопожарная сигнализация, автоматически срабатывающая при появлении пожара. Из первичных средств пожаротушения в лаборатории имеется ручной огнетушитель, ведро и короб с песком.

2.5.5 Заключение подраздела, связанного с безопасностью проведения исследований

Таким образом, в данном подразделе были предусмотрены следующие мероприятия для обеспечения оптимальных условий труда и безопасности при проведении научных исследований:

- предусмотрена вентиляция с кратностью воздухообмена $K = 2 \text{ ч}^{-1}$;
- определена категория работ в лабораторном помещении (Iб) и указаны оптимальные и допустимые параметры микроклимата;
- для снижения вредного воздействия шума и вибрации на работающих предусмотрены средства индивидуальной защиты в виде противошумных наушников и берушей, а также виброизолирующие изделия типа 2 в виде упругих опор для оборудования и гибких вставок для трубопроводов;
- рассчитаны рабочее и эвакуационное виды искусственного освещения, для лаборатории принято 8 светильников с люминесцентными лампами ЛБ40;
- описаны организационные и технические средства для обеспечения пожарной и электрической безопасности лабораторного помещения;
- указаны общие правила безопасности при работе в научно-исследовательской лаборатории.

					ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49

3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ

3.1 Технологический расчет лабораторной колонны

3.1.1 Цель расчета и исходные данные

Целями технологического расчета являются: определение основных геометрических размеров лабораторной колонны, а также конструирование и расчет требуемого количества блоков контактных теплообменных устройств на основании существующих методик.

Исходные данные к расчету:

- место установки колонны: отопляемое лабораторное помещение;
- рабочие среды: вода и воздух;
- объемный расход воздуха $V = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$;
- массовый расход воды $\bar{L} = 0,25 \text{ кг/с}$;
- требуемая степень насыщения воды кислородом $\chi = 0,5 = 50\%$;
- начальная концентрация растворенного кислорода в воде (относительная объемная массовая доля) $\bar{C}_H = 1,5 \text{ мг/л} = 0,0015 \text{ кг/м}^3$;
- начальная концентрация кислорода в воздухе (молярная доля) $y_H = 0,21 \text{ кмоль/кмоль}$;
- давление в колонне: атмосферное ($P = 760 \text{ мм рт. ст.}$);
- начальная температура газожидкостной смеси $t_1 = 15^\circ\text{C}$;
- требуемая температура газожидкостной смеси в колонне $t_2 = 30^\circ\text{C}$.

3.1.2 Геометрические параметры колонны и контактных устройств

При исследовании барботажных колонн в лабораторных условиях скорость жидкости обычно варьируют в пределах от 0 до 0,03 м/с [38]. Принимаем ориентировочную скорость жидкости $w_{\text{ж}}^{\text{ор}} = 0,01 \text{ м/с}$ и находим диаметр лабораторной колонны по формуле:

$$d_{\text{ор}} = \sqrt{\frac{4L}{\rho_{\text{ж}} \pi w_{\text{ж}}^{\text{ор}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,25}{996 \cdot 3,14 \cdot 0,01}} = 0,179 \text{ м}, \quad (3.1.1)$$

где $\rho_{\text{ж}} = 996 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды при рабочей температуре 30°C .

Принимаем диаметр лабораторной колонны $d = 0,2 \text{ м}$. Полученный диаметр позволяет изготовить корпус колонны из стандартных цапг высотой $H_{\text{ц}} = 300 \text{ мм}$. В соответствии с принятыми данными спроектируем блоки контактных теплообменных устройств, которые будут устанавливаться на опорные конструкции (газораспределительные решетки, уголки) с общей высотой 30 мм. При диаметре колонны $d = 0,2 \text{ м}$ в каждом блоке может уместиться до 4 теплообменных модулей. Независимо от конфигурации устройства в него будут входить только два типа теплообменных модулей, которые в дальнейшем будем называть большим и малым. Ширину большого

					ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		50

модуля принимаем равной 180 мм, малого – 140 мм. Полную высоту контактного устройства принимаем равной 270 мм для того, чтобы оно полностью умещалось в одной царге.

Для подачи теплоносителя во внутреннее пространство теплообменных модулей предусмотрим штуцера с наружным диаметром 20 мм. В качестве теплоносителя будем использовать очищенную воду. Необходимость в разработке разборных теплообменных модулей отсутствует, поскольку в их внутренних пространствах протекают неагрессивные среды, не откладывающие солей и твердых включений. Также следует отметить, что изготовление разборного теплообменного модуля приведет к тому, что его боковые грани, образованные резиновой прокладкой, не будут участвовать должным образом в процессе теплообмена. Для лабораторной колонны диаметром 200 мм данный факт оказывает большое влияние на получаемую величину теплообменной поверхности одного блока контактного устройства и, соответственно, на его максимальную тепловую нагрузку. На основании вышесказанного принимаем цельносварную конструкцию теплообменных модулей контактного устройства. Общий вид сконструированных теплообменных модулей представлен на рисунке 3.1.1.

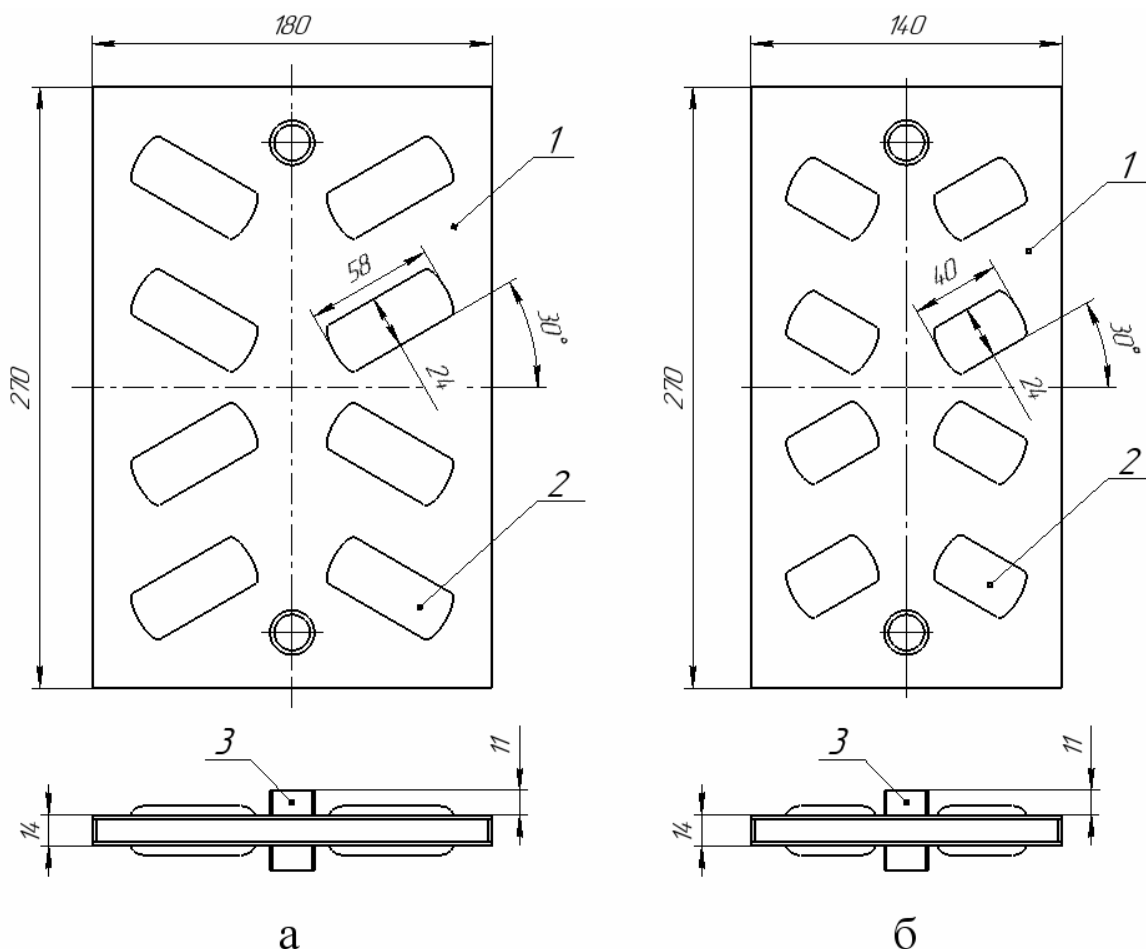


Рисунок 3.1.1 - Общий вид сконструированных теплообменных модулей:
 а – большой модуль; б – малый модуль; 1 – стенки модулей; 2 – гофры;
 3 – штуцеры

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

Имеем следующие габаритные размеры сконструированных теплообменных модулей (B – ширина; L – длина; H – высота):

- для большого модуля: $B_б = 0,014\text{ м}$; $L_б = 0,18\text{ м}$; $H_б = 0,27\text{ м}$;

- для малого модуля: $B_м = 0,014\text{ м}$; $L_м = 0,14\text{ м}$; $H_м = 0,27\text{ м}$.

Также выпишем параметры внутренних каналов теплообменных модулей (b – ширина; l – длина; S – проходное сечение; $d_э$ – эквивалентный диаметр):

- для большого модуля: $b_б = 0,01\text{ м}$; $l_б = 0,176\text{ м}$; $S_б = 1,76 \cdot 10^{-3}\text{ м}^2$;
 $d_{э1} = 18,9 \cdot 10^{-3}\text{ м}$;

- для малого модуля: $b_м = 0,01\text{ м}$; $l_м = 0,136\text{ м}$; $S_м = 1,36 \cdot 10^{-3}\text{ м}^2$;
 $d_{э2} = 18,6 \cdot 10^{-3}\text{ м}$.

Тогда средние значения проходного сечения и эквивалентного диаметра для внутреннего пространства тепломассообменного устройства имеют следующие значения:

$$S = \frac{S_б + S_м}{2} = \frac{1,76 \cdot 10^{-3} + 1,36 \cdot 10^{-3}}{2} = 1,56 \cdot 10^{-3}\text{ м}^2; \quad (3.1.2)$$

$$d_э = \frac{d_{э1} + d_{э2}}{2} = \frac{18,92 \cdot 10^{-3} + 18,63 \cdot 10^{-3}}{2} = 18,78 \cdot 10^{-3}\text{ м}. \quad (3.1.3)$$

Находим поверхность теплообмена гофрированных пластин теплообменных модулей (без учета гофра):

- пластина большого модуля $F_б = H_б L_б = 0,27 \cdot 0,18 = 0,0486\text{ м}^2$;

- пластина малого модуля $F_м = H_м L_м = 0,27 \cdot 0,14 = 0,0378\text{ м}^2$.

Поперечное сечение гофра на пластинах представлено на рисунке 3.1.2.

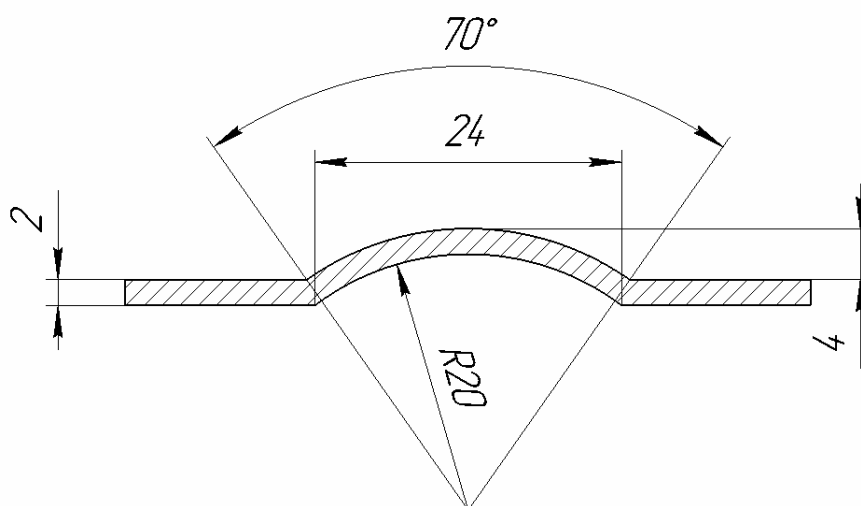


Рисунок 3.1.2 - Поперечное сечение гофра на пластинах

Выпишем геометрические параметры гофра на пластинах теплообменных модулей: $\alpha = 70^\circ$ – центральный угол дуги для всех гофр;

						Лист
						52
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$\delta = 0,002$ м – толщина стенки пластин; $c = 0,024$ м – ширина участков пластин под гофрами; $L_{ГБ} = 0,058$ м – длина гофр на пластинах большого модуля; $L_{ГМ} = 0,04$ м – длина гофр на пластинах малого модуля. На каждой пластине располагается 8 гофр.

Поверхность одной гофры:

- на пластине большого модуля

$$F_{ГБ} = \frac{\pi(R + \delta)\alpha}{180} L_{ГБ} = \frac{3,14 \cdot (0,02 + 0,002) \cdot 70}{180} \cdot 0,058 = 1,56 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2, \quad (3.1.4)$$

- на пластине малого модуля

$$F_{ГМ} = \frac{\pi(R + \delta)\alpha}{180} L_{ГМ} = \frac{3,14 \cdot (0,02 + 0,002) \cdot 70}{180} \cdot 0,04 = 1,08 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \quad (3.1.5)$$

Коэффициенты гофрирования:

- пластины большого модуля

$$K_{ГБ} = \frac{F_{\sigma} - 8cL_{ГБ} + 8F_{ГБ}}{F_{\sigma}}; \quad (3.1.6)$$

$$K_{ГБ} = \frac{0,0486 - 8 \cdot 0,024 \cdot 0,058 + 8 \cdot 1,56 \cdot 10^{-3}}{0,0486} = 1,027, \quad (3.1.7)$$

- пластины большого модуля

$$K_{ГМ} = \frac{F_{\sigma} - 8cL_{ГМ} + 8F_{ГМ}}{F_{\sigma}}; \quad (3.1.8)$$

$$K_{ГМ} = \frac{0,0378 - 8 \cdot 0,024 \cdot 0,04 + 8 \cdot 1,08 \cdot 10^{-3}}{0,0378} = 1,024. \quad (3.1.9)$$

Поверхность боковых граней:

- большого модуля

$$F_{\sigma}^{\text{бок}} = 2(b_{\sigma}L_{\sigma} + b_{\sigma}H_{\sigma}) = 2 \cdot (0,01 \cdot 0,18 + 0,01 \cdot 0,27) = 0,009 \text{ м}^2, \quad (3.1.10)$$

- малого модуля

$$F_{\sigma}^{\text{бок}} = 2(b_{\sigma}L_{\sigma} + b_{\sigma}H_{\sigma}) = 2 \cdot (0,01 \cdot 0,14 + 0,01 \cdot 0,27) = 0,0082 \text{ м}^2. \quad (3.1.11)$$

Тогда полная поверхность теплообмена одного блока будет равна

- для блока с тремя модулями

$$F_{\text{бл}} = 2F_{\sigma}K_{ГБ} + F_{\sigma}^{\text{бок}} + 4F_{\sigma}K_{ГМ} + 2F_{\sigma}^{\text{бок}}; \quad (3.1.12)$$

$$F_{\text{бл}} = 2 \cdot 0,0486 \cdot 1,027 + 0,009 + 4 \cdot 0,0378 \cdot 1,024 + 2 \cdot 0,0082 = 0,280 \text{ м}^2 \quad (3.1.13)$$

									Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ				53

- для блока с четырьмя модулями

$$F_{\text{бл}} = 4F_{\text{б}}K_{\text{гб}} + 2F_{\text{б}}^{\text{бок}} + 4F_{\text{м}}K_{\text{гм}} + 2F_{\text{м}}^{\text{бок}}; \quad (3.1.14)$$

$$F_{\text{бл}} = 4 \cdot 0,0486 \cdot 1,027 + 2 \cdot 0,009 + 4 \cdot 0,0378 \cdot 1,024 + 2 \cdot 0,0082 = 0,389 \text{ м}^2 \quad (3.1.15)$$

Варианты компоновок теплообменных модулей в поперечном сечении колонны из условия равенства площадей образуемых каналов для движения газожидкостной смеси представлены на рисунке 3.1.3.

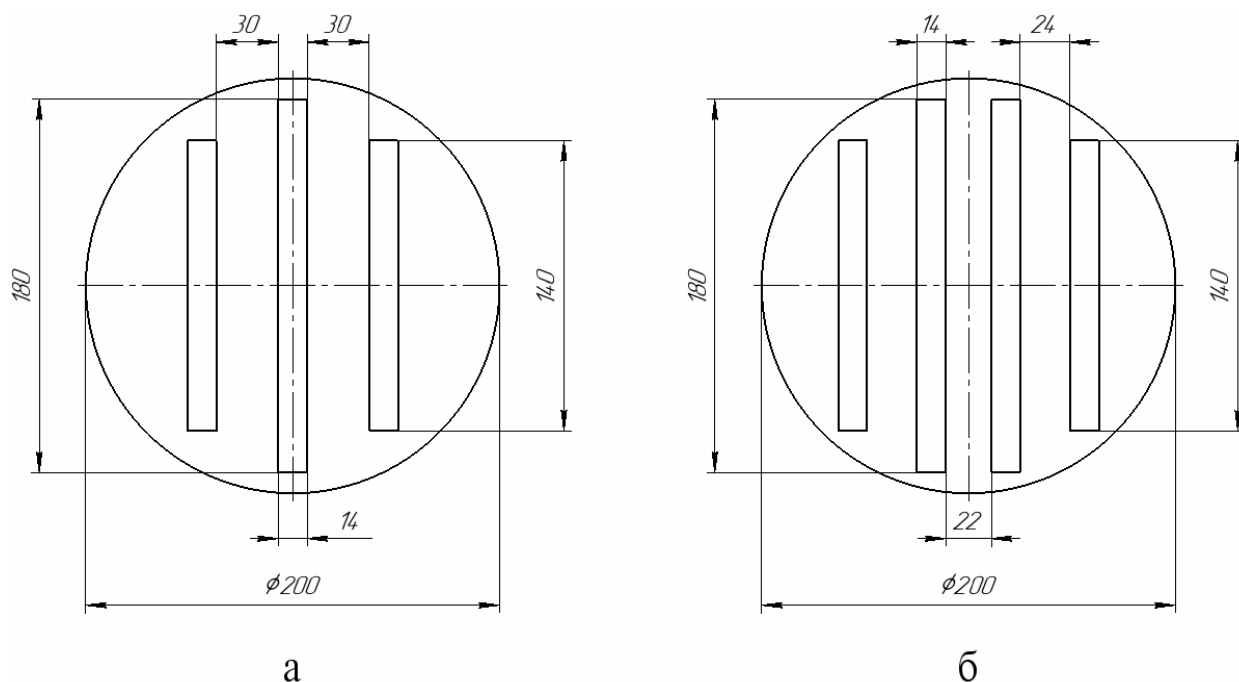


Рисунок 3.1.3 - Варианты компоновок теплообменных модулей:
а – компоновка с тремя модулями; б – компоновка с четырьмя модулями

Дальнейший расчет лабораторной колонны будем производить, приняв максимальную конфигурацию контактного теплообменного устройства (с четырьмя модулями).

Рассчитаем общую площадь образуемых каналов для движения газожидкостной смеси в блоке контактного устройства (без учета насадки):

$$S'_{\text{сеч}} = \frac{\pi d^2}{4} - 2(B_{\text{б}}L_{\text{б}} + B_{\text{м}}L_{\text{м}}); \quad (3.1.16)$$

$$S'_{\text{сеч}} = \frac{\pi d^2}{4} - 2(0,014 \cdot 0,18 + 0,014 \cdot 0,14) = 0,0224 \text{ м}^2. \quad (3.1.17)$$

Согласно [39] имеем следующие параметры контактного устройства: удельная поверхность массообмена $a_{\text{н}} = 240 \text{ м}^2/\text{м}^3$; свободный объем сетчатой насадки $\varepsilon_{\text{н}} = 0,98$.

Находим общую площадь образуемых каналов с учетом насадки:

$$S_{\text{сеч}} = S'_{\text{сеч}} \varepsilon_{\text{н}} = 0,0224 \cdot 0,98 = 0,022 \text{ м}^2. \quad (3.1.18)$$

Таким образом, имеем долю сечения, занимаемую контактным устройством

$$\psi = 1 - \frac{4S_{\text{сеч}}}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,022}{3,14 \cdot 0,2^2} \cong 0,3 = 30\%. \quad (3.1.19)$$

3.1.3 Материальный баланс процесса

Плотность воздуха при рабочих условиях

$$\rho_{\text{г}} = \frac{M_{\text{г}}}{22,4} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{P}{P_0} = \frac{28,98}{22,4} \cdot \frac{273}{(273 + 30)} \cdot \frac{760}{760} = 1,166 \text{ кг/м}^3, \quad (3.1.20)$$

где $M_{\text{г}} = 28,98 \text{ кг/кмоль}$ – молярная масса воздуха.

Массовый расход воздуха и инертного газа в колонне

$$\bar{G}_{\text{г}} = V \rho_{\text{г}} = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1,166 = 1,166 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}; \quad (3.1.21)$$

$$\bar{G} = \bar{G}_{\text{в}} (1 - y_{\text{н}}) = 1,166 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 0,21) = 0,92 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}. \quad (3.1.22)$$

Под инертным газом понимается только азот без учета других компонентов, содержащихся в атмосферном воздухе (аргона, углекислого газа и т.д.). Молярная масса азота составляет $M_{\text{ин}} = 28 \text{ кг/кмоль}$, тогда мольный расход инертного газа

$$G = \frac{\bar{G}}{M_{\text{ин}}} = \frac{0,92 \cdot 10^{-3}}{28} = 3,289 \cdot 10^{-5} \text{ кмоль/с}. \quad (3.1.23)$$

Далее определим мольный расход поглотителя (воды). Молярная масса воды составляет $M_{\text{ж}} = 18 \text{ кг/кмоль}$, тогда имеем

$$L = \frac{\bar{L}}{M_{\text{ж}}} = \frac{0,25}{18} = 0,0139 \text{ кмоль/с}. \quad (3.1.24)$$

Представим имеющуюся мольную долю кислорода в воздухе в виде относительной мольной концентрации:

$$Y_{\text{н}} = \frac{y_{\text{н}}}{1 - y_{\text{н}}} = \frac{0,21}{1 - 0,21} = 0,2658 \text{ кмоль/кмоль}. \quad (3.1.25)$$

По справочной литературе [40, табл. 2.5] находим предельное содержание кислорода в воде при рабочих условиях $\bar{C}'_{\text{к}} = 0,0076 \text{ кг/м}^3$. Переведем начальную и конечную концентрации кислорода в воде в относительные мольные с помощью следующих формул:

						Лист
					ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ	55
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\bar{X}_H = \frac{\bar{C}_H}{\rho_B} = \frac{0,0015}{996} = 1,506 \cdot 10^{-6} \text{ кг/кг}; \quad (3.1.26)$$

$$X_H = \frac{M_{ж} \bar{X}}{M_K} = \frac{18 \cdot 1,506 \cdot 10^{-6}}{32} = 0,847 \cdot 10^{-6} \text{ кмоль/кмоль}; \quad (3.1.27)$$

$$\bar{X}'_K = \frac{\bar{C}'_K}{\rho_B} = \frac{0,0076}{996} = 7,631 \cdot 10^{-6} \text{ кг/кг}; \quad (3.1.28)$$

$$X'_K = \frac{M_{ж} \bar{X}}{M_K} = \frac{18 \cdot 7,63 \cdot 10^{-6}}{32} = 4,292 \cdot 10^{-6} \text{ кмоль/кмоль}, \quad (3.1.29)$$

где $\rho_{ж} = 996 \text{ кг/м}^3$ – и плотность воды при 30°C [41, табл. XXXIX];
 $M_K = 32 \text{ кг/кмоль}$ – молярная масса кислорода.

С учетом требуемой степени насыщения воды кислородом имеем

$$X_K = \chi X'_K = 0,5 \cdot 4,292 \cdot 10^{-6} = 2,146 \cdot 10^{-6} \text{ кмоль/кмоль}. \quad (3.1.30)$$

Уравнение материального баланса для лабораторной колонны имеет следующий вид:

$$M = G(Y_H - Y_K) = L(X_K - X_H). \quad (3.1.31)$$

Из уравнения (3.1.31) находим конечное содержание кислорода в отходящем воздухе:

$$Y_K = Y_H - \frac{L}{G}(X_K - X_H) \quad (3.1.32)$$

$$Y_K = 0,2658 - \frac{0,0139}{4,02 \cdot 10^{-5}} \cdot (2,146 \cdot 10^{-6} - 0,847 \cdot 10^{-6}) =$$

$$= 0,2653 \text{ кмоль/кмоль}; \quad (3.1.33)$$

Рассчитаем массовый и мольный расходы компонента

$$M = 3,289 \cdot 10^{-5} (0,2658 - 0,2653) = 1,8 \cdot 10^{-8} \text{ кмоль/с}. \quad (3.1.34)$$

Массовый расход компонента

$$\bar{M} = MM_K = 1,8 \cdot 10^{-8} \cdot 32 = 0,577 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с}. \quad (3.1.35)$$

3.1.4 Средняя движущая сила процесса

Рабочая линия массообменного процесса описывается уравнением (3.1.33) и строится на графике $Y = f(X)$ в виде прямой линии, проходящей через две точки с координатами $(X_H; Y_H)$ и $(X_K; Y_K)$. Равновесную линию для сильно разбавленного раствора с малой концентрацией компонента можно представить с помощью закона Генри [42, стр. 438]

$$Y^* = \frac{E}{P} X = mX, \quad (3.1.36)$$

										Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						56

где E – константа Генри; P – общее давление в системе; $m = E/P$ – константа фазового равновесия (коэффициент распределения).

Зависимость (3.1.36) выражается прямой линией, проходящей через начало координат и имеющей угол наклона, тангенс которого равен m [42]. Для определения величины коэффициента m воспользуемся конечной точкой равновесной линии (X_k^* ; Y_n) в соответствии с имеющимися данными по растворимости кислорода в воде [40]. Таким образом, получив исходные данные для графических построений, изобразим рабочую и равновесную линии массообменного процесса на диаграмме $X - Y$ (см. рисунок 3.1.4).

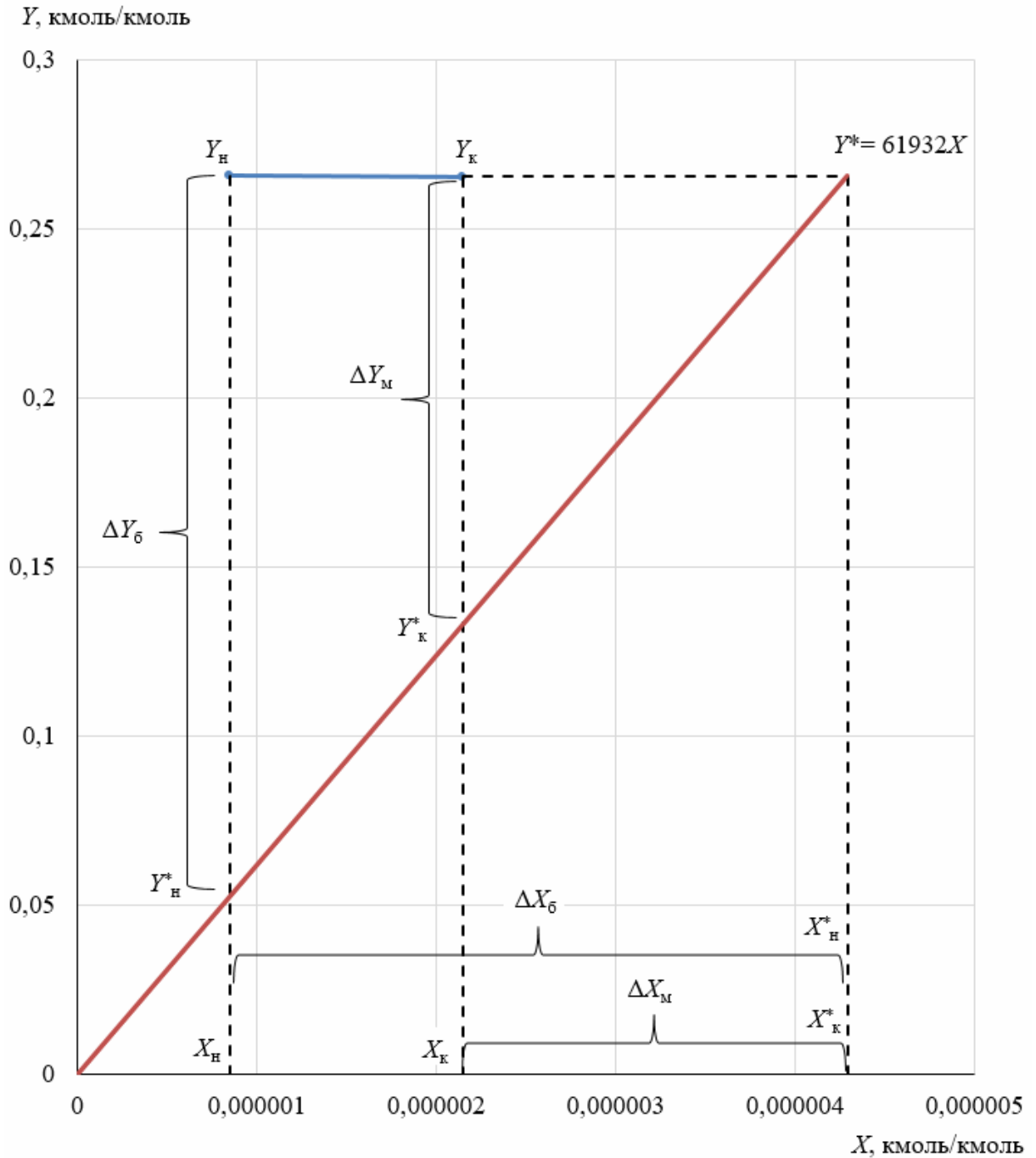


Рисунок 3.1.4 - Рабочая и равновесная линии массообменного процесса

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Согласно рисунку 3.1.4 имеем значение константы фазового равновесия $m = 61932$. С помощью константы m определим равновесные концентрации кислорода в воде и воздухе:

$$Y_{\text{H}}^* = mX_{\text{H}} = 61932 \cdot 0,847 \cdot 10^{-6} = 0,0525 \text{ кмоль/кмоль}; \quad (3.1.37)$$

$$Y_{\text{K}}^* = mX_{\text{K}} = 61932 \cdot 2,146 \cdot 10^{-6} = 0,1329 \text{ кмоль/кмоль}; \quad (3.1.38)$$

$$X_{\text{H}}^* = \frac{Y_{\text{H}}^*}{m} = \frac{0,2658}{61932} = 4,292 \cdot 10^{-6} \text{ кмоль/кмоль}; \quad (3.1.39)$$

$$X_{\text{K}}^* = \frac{Y_{\text{K}}^*}{m} = \frac{0,2653}{61932} = 4,283 \cdot 10^{-6} \text{ кмоль/кмоль}. \quad (3.1.40)$$

Среднюю движущую силу процесса абсорбции рассчитаем через концентрации кислорода в жидкой фазе. Для этого предварительно находим большую и меньшую движущие силы:

$$\begin{aligned} \Delta X_{\text{M}} &= X_{\text{K}}^* - X_{\text{K}} = 4,283 \cdot 10^{-6} - 2,146 \cdot 10^{-6} = \\ &= 2,137 \cdot 10^{-6} \text{ кмоль/кмоль}; \end{aligned} \quad (3.1.41)$$

$$\begin{aligned} \Delta X_{\text{б}} &= X_{\text{H}}^* - X_{\text{H}} = 4,292 \cdot 10^{-6} - 0,847 \cdot 10^{-6} = \\ &= 3,445 \cdot 10^{-6} \text{ кмоль/кмоль}; \end{aligned} \quad (3.1.42)$$

$$\Delta X_{\text{б}} / \Delta X_{\text{M}} = 3,445 \cdot 10^{-6} / 2,137 \cdot 10^{-6} = 1,612 \quad (3.1.43)$$

Согласно уравнению (3.1.43) отношение $\Delta X_{\text{б}} / \Delta X_{\text{M}} < 2$. На основании этого можем рассчитать среднюю движущую силу процесса по формуле:

$$\Delta X_{\text{ср}} = \frac{\Delta X_{\text{б}} + \Delta X_{\text{M}}}{2}. \quad (3.1.44)$$

$$\Delta X_{\text{ср}} = \frac{3,445 \cdot 10^{-6} + 2,137 \cdot 10^{-6}}{2} = 2,791 \cdot 10^{-6} \text{ кмоль/кмоль}. \quad (3.1.45)$$

3.1.5 Требуемая поверхность массообмена

Рассчитаем действительную скорость жидкости и приведенную скорость газа в каналах между теплообменными модулями по формуле:

$$w_{\text{ж}} = \frac{4L}{\rho_{\text{ж}} \pi d^2 (1 - \psi)} = \frac{4 \cdot 0,25}{996 \cdot 3,14 \cdot 0,2^2 \cdot (1 - 0,3)} = 0,0114 \text{ м/с}. \quad (3.1.46)$$

$$w_{\text{г}} = \frac{4V}{\pi d^2 (1 - \psi)} = \frac{4 \cdot 0,001}{3,14 \cdot 0,2^2 \cdot (1 - 0,3)} = 0,0455 \text{ м/с}. \quad (3.1.47)$$

Перед расчетом коэффициента массопередачи необходимо определить величину удельной поверхности контакта фаз a , которая образуется на поверхности пузырей воздуха, движущихся в слое жидкости. Согласно литературным данным [43, стр. 156] удельную поверхность контакта фаз в барботажном слое можно найти по следующей формуле:

										Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						58

$$a = \frac{6\varphi_{\Gamma}}{d_{\Pi}}, \quad (3.1.48)$$

где φ_{Γ} – истинное газосодержание;
 d_{Π} – средний размер газовых пузырей.

Газосодержание при вертикальном прямоочном движении газожидкостной смеси в системе вода – воздух можно рассчитать по следующей формуле [44, стр. 92]:

$$\varphi_{\Gamma} = 0,26\beta \left(\frac{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma}} \right)^{0,125}, \quad (3.1.49)$$

где β – расходное газосодержание, определяемое по формуле:

$$\beta = \frac{w_{\Gamma}}{w_{\Gamma} + w_{\text{ж}}} = \frac{0,0455}{0,0455 + 0,0114} = 0,799, \quad (3.1.50)$$

тогда имеем

$$\varphi_{\Gamma} = 0,26 \cdot 0,799 \left(\frac{996 - 1,166}{1,166} \right)^{0,125} = 0,483. \quad (3.1.51)$$

Средний диаметр газовых пузырей можно найти по формуле [43, 442]:

$$d_{\Pi} = \sqrt[3]{\frac{6d_{\circ}\sigma}{g\Delta\rho}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 0,008 \cdot 0,0712}{9,81 \cdot (996 - 1,166)}} = 0,007 \text{ м}, \quad (3.1.52)$$

где $d_{\circ} = 8$ мм – диаметр отверстий барботера; $\sigma = 0,0712$ н/м – коэффициент поверхностного натяжения воды при 30°C [41, табл. XXIV]; $\Delta\rho = \rho_{\text{ж}} - \rho_{\Gamma}$ – разность плотностей взаимодействующих фаз.

Подставляя численные значения, находим удельную поверхность контакта фаз:

$$a = \frac{6 \cdot 0,483}{0,007} = 411 \text{ м}^2/\text{м}^3. \quad (3.1.53)$$

В области пузырькового режима барботажа ($w_{\Gamma} \leq 0,14$ м/с) можем рассчитать с достаточной для инженерных расчетов точностью коэффициент массоотдачи в жидкой фазе $\beta_{\text{ж}}$ с помощью уравнения [44, стр. 74]:

$$\text{Sh}_{\text{об}} = 0,085 \text{Re}_{\Gamma}^{0,5} \text{Re}_{\text{ж}}^{0,5} \text{Sc}_{\text{ж}}^{0,5}. \quad (3.1.54)$$

Критериями подобия в уравнении (3.1.51) являются

$$\text{Sh}_{\text{об}} = \frac{\beta_{\text{ж}} a d_{\text{экв}}^2}{D_{\text{ж}}}; \quad \text{Re}_{\Gamma} = \frac{w_{\Gamma} d_{\text{экв}} \rho_{\text{ж}}}{\mu_{\text{ж}}}; \quad \text{Re}_{\text{ж}} = \frac{w_{\text{ж}} d_{\text{экв}} \rho_{\text{ж}}}{\mu_{\text{ж}}}; \quad \text{Sc}_{\text{ж}} = \frac{\mu_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} D_{\text{ж}}}, \quad (3.1.55)$$

									Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					59

где $D_{ж}$ – коэффициент диффузии кислорода в воде; $d_{э}$ – эквивалентный диаметр контактного устройства; $\mu_{ж} = 0,804 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ – коэффициент динамической вязкости воды при 30°C [41, табл. XXXIX]; $Sh_{об}$ – критерий Шервуда с объемным коэффициентом массопереноса; $Re_{ж}$, $Re_{г}$ – критерии Рейнольдса, рассчитанные по скорости жидкости и газа; $Sc_{ж}$ – критерий Шмидта.

Коэффициент диффузии кислорода в воде при температуре 30°C определим по формуле [41, стр. 540]:

$$D_{ж} = D_{20}^{ж} [1 + 0,02(t - 20)]; \quad (3.1.56)$$

$$D_{ж} = 2,1 \cdot 10^{-9} \cdot [1 + 0,02 \cdot (30 - 20)] = 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}. \quad (3.1.57)$$

где $D_{ж} = 2,1 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ – коэффициент диффузии кислорода в воде при температуре 20°C .

Эквивалентный диаметр каналов контактного устройства найдем по формуле:

$$d_{э} = \frac{4(1-\psi)}{a_H} = \frac{4 \cdot 0,3}{240} = 0,0117 \text{ м}. \quad (3.1.58)$$

Критерии подобия

$$Re_{г} = \frac{0,0455 \cdot 0,0117 \cdot 996}{0,804 \cdot 10^{-3}} = 658; \quad (3.1.59)$$

$$Re_{ж} = \frac{0,0114 \cdot 0,0117 \cdot 996}{0,804 \cdot 10^{-3}} = 165; \quad (3.1.60)$$

$$Sc = \frac{0,804 \cdot 10^{-3}}{996 \cdot 2,5 \cdot 10^{-9}} = 320. \quad (3.1.61)$$

Подставляя численные значения, находим критерий Шервуда:

$$Sh_{об} = 0,085 \cdot 658^{0,5} \cdot 165^{0,5} \cdot 320^{0,5} = 501. \quad (3.1.62)$$

Тогда коэффициент массоотдачи кислорода от границы раздела фаз в ядро потока жидкости будет иметь значение:

$$\beta_{ж} = \frac{Sh_{об} D_{ж}}{a d_{э}^2} = \frac{501 \cdot 2,5 \cdot 10^{-9}}{411 \cdot 0,0117^2} = 2,254 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}. \quad (3.1.63)$$

Выразим полученный коэффициент $\beta_{ж}$ с учетом ранее выбранных единиц для массы распределяемого вещества и движущей силы процесса:

$$\beta_{ж} = 2,254 \cdot 10^{-5} \rho_{ж} = 0,143 \cdot 10^{-3} \cdot 996 = 0,0224 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}); \quad (3.1.64)$$

$$\beta_{ж} = 0,0224 / M_{вод} = 0,0224 / 18 = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ кмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}). \quad (3.1.65)$$

					Лист
					60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ

При больших значениях константы фазового перехода m , иначе говоря, для плохо растворимых газов допускается пренебречь диффузионным сопротивлением в газовой фазе. Тогда коэффициент массопередачи кислорода из воздуха в воду принимается равным коэффициенту массоотдачи кислорода от границы раздела фаз в ядро потока жидкости, т.е. $K_x = \beta_{ж} = 1,25 \cdot 10^{-3}$ кмоль/(м² · с).

Зная значение коэффициента массопередачи, находим требуемую поверхность контакта фаз по формуле:

$$F = \frac{M}{K_x \Delta X_{cp}} = \frac{1,8 \cdot 10^{-8}}{1,25 \cdot 10^{-3} \cdot 2,791 \cdot 10^{-6}} = 5,2 \text{ м}^2. \quad (3.1.66)$$

Тогда имеем требуемую высоту контактного устройства

$$H_{сл} = \frac{F}{aS_{сеч}} = \frac{5,2}{411 \cdot 0,022} = 0,57 \text{ м}, \quad (3.1.67)$$

где $S_{сеч} = 0,022 \text{ м}^2$ – площадь каналов контактного устройства для движения газожидкостной смеси.

Для обеспечения заданной степени насыщения воды кислородом принимаем в работу 2 царги с блоками контактных устройств. В таком случае общая рабочая высота контактных устройств в лабораторной колонне будет составлять $H_{сл} = 0,6 \text{ м}$.

3.1.6 Тепловой расчет лабораторной колонны

Перед началом теплового расчета примем следующие допущения:

1. В лабораторной колонне производится нагрев всей газожидкостной смеси от поверхности теплообменных модулей контактного устройства. Теплообмен между жидкостью и газом в барботажном слое не учитывается.

2. Тепловые потери через стенки корпуса лабораторной колонны и тепло, необходимое для нагрева воздуха в газожидкостной смеси, пренебрежимо малы и в расчете тепловой нагрузки теплообменных модулей контактного устройства не учитываются.

В соответствии с исходными данными рассчитаем среднюю температуру газожидкостной смеси в лабораторной колонне:

$$t_{cp} = (t_1 + t_2)/2 = (15 + 30)/2 = 22,5^\circ\text{C}. \quad (3.1.68)$$

Далее находим тепловую нагрузку теплообменных модулей контактного устройства

$$Q = Lc(t_2 - t_1) = 0,25 \cdot 4188 \cdot (30 - 15) = 15705 \text{ Вт}, \quad (3.1.69)$$

где $c = 4188 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$ – теплоемкость воды при температуре $22,5^\circ\text{C}$ [41].

										Лист
										61
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

В качестве горячего теплоносителя принимаем подогретую воду, которая подается во внутреннее пространство теплообменных модулей контактного устройства и последовательно движется в них по схеме, представленной на рисунке 3.1.5.

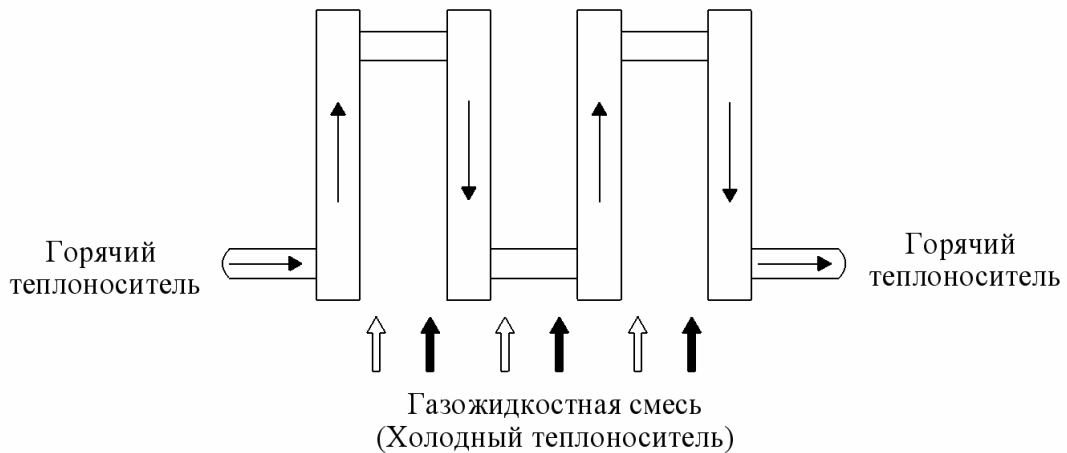


Рисунок 3.1.5 - Схема движения теплоносителей в контактном устройстве

На рисунке 3.1.5 видно, что в контактном устройстве организован смешанный ток движения теплоносителей. Среднюю движущую силу процесса рассчитаем в условиях противотока с учетом поправочного коэффициента $\varepsilon_{\Delta t}$.

Принимаем начальную и конечную температуры горячего теплоносителя: $\theta_1 = 50^\circ\text{C}$, $\theta_2 = 40^\circ\text{C}$. Тогда диаграмма для определения средней движущей силы процесса будет иметь вид, представленный на рисунке 3.1.6.

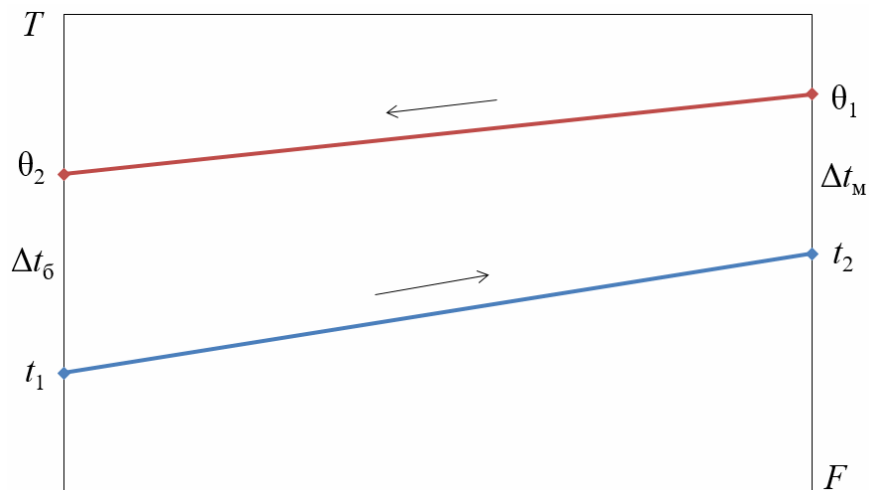


Рисунок 3.1.6 - Диаграмма для определения средней движущей силы процесса

Большая и меньшая разницы температур:

$$\Delta t_{\text{м}} = \theta_1 - t_2 = 50 - 30 = 20^\circ\text{C}; \quad (3.1.70)$$

$$\Delta t_{\text{б}} = \theta_2 - t_1 = 40 - 15 = 25^\circ\text{C}. \quad (3.1.71)$$

Средняя разность температур в условиях противотока теплоносителей

$$\Delta t_{\text{ср.прот}} = \frac{\Delta t_{\text{Г}} + \Delta t_{\text{М}}}{2} = \frac{25 + 20}{2} = 22,5^{\circ}\text{C}. \quad (3.1.72)$$

Параметры для условий смешанного тока теплоносителей

$$P = \frac{t_2 - t_1}{\theta_1 - t_1} = \frac{30 - 15}{50 - 15} = 0,43; \quad (3.1.73)$$

$$R = \frac{\theta_1 - \theta_2}{t_2 - t_1} = \frac{50 - 40}{30 - 15} = 0,66. \quad (3.1.74)$$

В соответствии со справочной литературой [45, рис. 6.9] имеем значение поправочного коэффициента $\varepsilon_{\Delta t} = 0,95$. Тогда средняя разность температур при смешанном токе теплоносителей будет иметь значение:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \varepsilon_{\Delta t} \Delta t_{\text{ср.прот}} = 0,95 \cdot 22,5 = 21,4^{\circ}\text{C}. \quad (3.1.75)$$

Средняя температура горячего теплоносителя

$$\theta_{\text{ср}} = \Delta t_{\text{ср}} + t_{\text{ср}} = 21,4 + 22,5 = 43,9^{\circ}\text{C}. \quad (3.1.76)$$

По справочной литературе [41] находим теплофизические свойства теплоносителей:

- холодный теплоноситель (вода в колонне) при $t_{\text{ср}} = 22,5^{\circ}\text{C}$

$$\rho = 997,5 \text{ кг/м}^3, \quad \lambda = 0,604 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}, \quad \mu = 0,951 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

- горячий теплоноситель (вода внутри модулей) при $\theta_{\text{ср}} = 43,9^{\circ}\text{C}$.

$$c_{\text{T}} = 4180 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}, \quad \rho_{\text{T}} = 990 \text{ кг/м}^3, \quad \lambda_{\text{T}} = 0,64 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}, \quad \mu_{\text{T}} = 0,614 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Находим расход горячего теплоносителя по формуле:

$$G_{\text{T}} = \frac{Q}{c_{\text{T}}(\theta_1 - \theta_2)} = \frac{15705}{4180 \cdot (50 - 40)} = 0,376 \text{ кг/с}. \quad (3.1.77)$$

Рассчитаем критерий Рейнольдса для горячего теплоносителя (во внутреннем пространстве теплообменных модулей контактного устройства):

$$\text{Re}_{\text{T}} = \frac{w_{\text{T}} d_{\text{э}} \rho_{\text{T}}}{\mu_{\text{T}}} = \frac{G_{\text{T}} d_{\text{э}}}{S_{\text{ср}} \mu_{\text{T}}} = \frac{0,376 \cdot 18,8 \cdot 10^{-3}}{1,56 \cdot 10^{-3} \cdot 0,614 \cdot 10^{-3}} = 7366. \quad (3.1.78)$$

Коэффициент теплоотдачи со стороны горячего теплоносителя при турбулентном режиме его движения ($50 < \text{Re} < 20000$) будем рассчитывать с помощью следующего критериального уравнения [46, стр. 178]:

$$\text{Nu}_{\text{T}} = 0,135 \cdot \text{Re}_{\text{T}}^{0,73} \text{Pr}_{\text{T}}^{0,43}, \quad (3.1.79)$$

										Лист
										63
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ					

где Pr_T – критерий Прандтля для горячего теплоносителя, определяемый по следующей формуле:

$$Pr_T = \frac{c_T \mu_T}{\lambda_T} = \frac{4180 \cdot 0,614 \cdot 10^{-3}}{0,64} = 4,01. \quad (3.1.80)$$

Подставляя численные значения, получим:

$$Nu_T = 0,135 \cdot 7366^{0,73} \cdot 4,01^{0,43} = 163,2; \quad (3.1.81)$$

$$\alpha_1 = \frac{Nu_T \lambda_T}{d_3} = \frac{163,2 \cdot 0,64}{18,8 \cdot 10^{-3}} = 5563 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (3.1.82)$$

Принимаем по [46, стр. 377] термические сопротивления загрязнений со стороны горячего и холодного теплоносителей: $r_1 = r_2 = 2 \cdot 10^{-4} (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$.

Тогда сумма термических сопротивлений:

$$\sum r_3 = r_1 + \frac{\delta}{\lambda_{ст}} + r_2; \quad (3.1.83)$$

$$\sum r_3 = 2 \cdot 10^{-4} + \frac{0,002}{46,5} + 2 \cdot 10^{-4} = 4,43 \cdot 10^{-4} (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт} \quad (3.1.84)$$

Коэффициент теплоотдачи от поверхности теплообменных элементов к восходящей газожидкостной смеси будем рассчитывать с помощью следующего критериального уравнения [44, стр. 69]:

$$Nu = \chi(1 - \phi)^{1/2} K_6^{1/4} \frac{Pr}{\bar{\psi}}, \quad (3.1.85)$$

где $Nu = \alpha l_{сл} / \lambda$ – критерий Нуссельта; $\chi = 2,2$ – константа; $l_{сл} = (v^2/g)^{1/3}$ – масштаб толщины пристенного слоя; $K_6 = w_T / (vg)^{1/3}$ – критерий режима барботажа; Pr – критерий Прандтля; $\bar{\psi}$ – средняя безразмерная разность температур; $v = 9,53 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ – коэффициент кинематической вязкости воды при температуре $21,4^\circ\text{C}$.

Имеем

$$l_{сл} = \left((9,53 \cdot 10^{-7})^2 / 9,81 \right)^{1/3} = 4,05 \cdot 10^{-5} \text{ м}; \quad (3.1.86)$$

$$K_6 = 0,045 / (9,53 \cdot 10^{-7} \cdot 9,81)^{1/3} = 2,28. \quad (3.1.87)$$

С целью определения значения $Pr/\bar{\psi}$ в уравнении (3.1.85) необходимо рассчитать максимальное безразмерное расстояние от турбулентного ядра потока до теплообменной поверхности по формуле [44, стр. 69]:

$$\eta_{\max} = \chi(1 - \phi)^{1/2} K_6^{1/4} \frac{y}{l_{сл}}, \quad (3.1.87)$$

где y – расстояние от теплообменной поверхности, на котором температура газожидкостной смеси претерпевает основное изменение.

Указанную величину y в применении к контактному устройству рассчитаем по формуле:

$$y = 0,5(A_{\max} - B) = 0,5 \cdot (0,024 - 0,014) = 0,005 \text{ м}, \quad (3.1.88)$$

где $A_{\max} = 0,024 \text{ м}$ – максимальное расстояние между теплообменными модулями контактного устройства; $B = 0,014 \text{ м}$ – ширина теплообменных модулей.

Находим искомую величину

$$\eta_{\max} = 2,2 \cdot (1 - 0,483)^{1/2} \cdot 2,28^{1/4} \cdot \frac{0,005}{4,05 \cdot 10^{-5}} = 240. \quad (3.1.89)$$

С учетом полученного значения имеем $Pr/\bar{\psi} = 0,13$ [44, рис. 14]. Подставим все необходимые данные в формулу (3.1.85) и получим

$$Nu = 2,2 \cdot (1 - 0,483)^{1/2} \cdot 2,28^{1/4} \cdot 0,13 = 0,253. \quad (3.1.90)$$

$$\alpha_2 = \frac{Nu\lambda}{l_{сл}} = \frac{0,253 \cdot 0,604}{4,05 \cdot 10^{-5}} = 3768 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (3.1.91)$$

Рассчитаем коэффициент теплопередачи с помощью уравнения аддитивности термических сопротивлений:

$$K = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1}\right) + \sum r_3 + \left(\frac{1}{\alpha_2}\right)}; \quad (3.1.92)$$

$$K = \frac{1}{\left(\frac{1}{5563}\right) + 4,43 \cdot 10^{-4} + \left(\frac{1}{3768}\right)} = 1126 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (3.1.93)$$

Требуемую поверхность теплообмена рассчитаем по основному уравнению теплопередачи:

$$F_{\text{тр}} = \frac{Q}{K\Delta t_{\text{ср}}} = \frac{15705}{1126 \cdot 21,4} = 0,653 \text{ м}^2. \quad (3.1.94)$$

Для обеспечения требуемой поверхности теплообмена будет достаточным наличие ранее принятой конфигурации лабораторной колонны с двумя блоками контактных теплообменными устройствами (см. подраздел 3.1.5). Общая поверхность теплообмена в таком случае будет составлять

$$F_{\text{уст}} = 2F_{\text{бл}} = 2 \cdot 0,389 = 0,778 \text{ м}^2. \quad (3.1.95)$$

Запас по теплообменной поверхности

$$\Delta = \frac{F_{\text{уст}} - F_{\text{тр}}}{F_{\text{тр}}} \cdot 100\% = \frac{0,778 - 0,653}{0,653} \cdot 100\% = 19,2\%. \quad (3.1.96)$$

3.1.7 Полная высота лабораторной колонны

По результатам технологических расчетов было получено, что для обеспечения заданной степени насыщения воды кислородом и для нагрева газожидкостной смеси до требуемой температуры необходима установка двух блоков контактных теплообменных устройств. С учетом ранее принятой высоты одного блока $H_{\text{бл}} = 0,3\text{ м}$ будем иметь высоту рабочей части лабораторной колонны $H_{\text{раб}} = 2H_{\text{бл}} = 2 \cdot 0,3 = 0,6\text{ м}$.

Далее зададим и распишем функциональные зоны лабораторной колонны по отдельным царгам. В первую очередь предусмотрим барботер для диспергирования газа в жидкости. Барботер устанавливается в самой нижней царге колонны, а высота этой царги служит для равномерного распределения газа по поперечному сечению аппарата, т.е. имеем $H_{\text{расп}} = 0,3\text{ м}$. В следующих двух царгах располагаются блоки контактных теплообменных устройств с рабочей высотой $H_{\text{раб}} = 0,6\text{ м}$. Отвод рабочей жидкости из колонны осуществляется из четвертой царги, а по ее высоте поддерживается необходимый уровень газожидкостной смеси, т.е. имеем $H_{\text{ур}} = 0,3\text{ м}$. Пятая царга является сепарационной и служит для отделения капель жидкости от отходящего газового потока. Высота сепарационной части $H_{\text{сеп}} = 0,3\text{ м}$.

Таким образом сборка корпуса лабораторной колонны будет осуществляться из пяти царг, тогда ее общая высота будет составлять

$$H_{\text{к}} = H_{\text{расп}} + H_{\text{раб}} + H_{\text{ур}} + H_{\text{сеп}} = 0,3 + 0,6 + 0,3 + 0,3 = 1,5\text{ м}.$$

3.2 Прочностной расчет лабораторной колонны

3.2.1 Цель подраздела и исходные данные к прочностному расчету

Целями данного подраздела являются

- проверка условия прочности корпуса лабораторной колонны и прочностной расчет плоского днища, находящихся под действием внутреннего избыточного давления столба газожидкостной смеси (в рабочих условиях) и столба жидкости (в условиях гидроиспытаний);

- проверка условия устойчивости нижней царги лабораторной колонны, находящейся под действием осевого сжимающего усилия.

Исходные данные к прочностному расчету:

- внутренний диаметр лабораторной колонны $D = d = 0,2\text{ м}$;

- высота отдельных царг корпуса колонны $H_{\text{ц}} = 0,3\text{ м}$;

- полная высота лабораторной колонны $H_{\text{к}} = 1,5\text{ м}$;

										Лист
										66
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

- высота рабочей части лабораторной колонны $H_{\text{раб}} = 0,6 \text{ м}$;
- высота сепарационной части лабораторной колонны $H_{\text{сеп}} = 0,3 \text{ м}$;
- свободный объем контактного устройства $\varepsilon = 0,7$;
- высота теплообменных модулей $H_{\text{м}} = 0,27 \text{ м}$;
- площадь поперечного сечения большого и малого модулей соответственно $S_1 = 0,0176 \text{ м}^2$; $S_2 = 0,0136 \text{ м}^2$;
- масса блока контактного устройства $M_{\text{бл}} = 9 \text{ кг}$;
- материал царг – органическое стекло марки СО-95-К;
- толщина стенки царг $S = 10 \text{ мм}$;
- толщина и диаметр фланцев соответственно: $S_{\text{ф}} = 0,02 \text{ м}$, $D_{\text{ф}} = 0,3 \text{ м}$;
- толщина прокладок между царгами $S_{\text{пр}} = 0,003 \text{ м}$;
- плотность воды при температуре 20°C $\rho_{\text{в}} = 998 \text{ кг/м}^3$;
- плотность газожидкостной смеси $\rho_{\text{гж}} = 515,3 \text{ кг/м}^3$.

3.2.2 Расчетные параметры

Определим расчетные параметры для корпуса и днища лабораторной колонны. В качестве расчетной температуры принимаем максимальную температуру газожидкостной смеси внутри колонны, т.е. $t_{\text{р}} = 30^\circ\text{C}$. За расчетное давление принимаем гидростатическое давление столба газожидкостной смеси, рассчитываемое по формуле:

$$p_{\text{р}} = \rho_{\text{гж}} g H_{\text{гж}} = 515,3 \cdot 9,81 \cdot 1,2 = 6066 \text{ Па}, \quad (3.2.1)$$

где $H_{\text{гж}} = 1,2 \text{ м}$ – рабочая высота газожидкостного слоя.

Определим пробное давление и температуру для корпуса и днища лабораторной колонны в условиях гидроиспытаний под наливом воды. Принимаем температуру воды в условиях гидроиспытаний $t_{\text{пр}} = 20^\circ\text{C}$. Пробное давление рассчитаем по формуле:

$$p_{\text{пр}} = \rho_{\text{в}} g H_{\text{в}} = 998 \cdot 9,81 \cdot 1,35 = 13217 \text{ Па}, \quad (3.2.2)$$

где $H_{\text{в}} = 1,35 \text{ м}$ – высота уровня воды в условиях гидроиспытаний.

3.2.3 Проверка условия прочности корпуса лабораторной колонны

Условия прочности для лабораторной колонны имеют вид

$$p_{\text{р}} < [p];$$

$$p_{\text{пр}} < [p],$$

где $[p]$ – допускаемое внутреннее избыточное давление, рассчитываемое по формуле:

					Лист
					67
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi_{\text{кл}}(S-c)}{D+(S-c)}, \quad (3.2.3)$$

где $[\sigma] = 66 \text{ МПа}$ – допускаемые напряжения органического стекла марки СО-95-К согласно [47]; c – суммарная прибавка к толщине стенки, принимаемая равной нулю ввиду отсутствия коррозии и эрозии; $\varphi_{\text{кл}}$ – коэффициент прочности клеевого шва, определяемый по формуле:

$$\varphi_{\text{кл}} = \frac{[\sigma]_{\text{см}}}{[\sigma]} = \frac{45}{66} = 0,68, \quad (3.2.4)$$

где $[\sigma]_{\text{см}} = 45 \text{ МПа}$ – допускаемые напряжения растяжения эпоксидно-диановой неотвержденной смолы [48, 49], с помощью которой осуществляется склейка царг.

Подставляя численные значения в формулу (3.2.3), получим:

$$[p] = \frac{2 \cdot 66 \cdot 0,68 \cdot 0,01}{0,2 + 0,01} = 4,3 \text{ МПа}. \quad (3.2.5)$$

Проверим условия прочности:

$$\begin{aligned} p_p &< [p]; \\ 6,066 \cdot 10^{-3} \text{ МПа} &< 4,3 \text{ МПа}; \\ p_{\text{пр}} &< [p]; \\ 13,217 \cdot 10^{-3} \text{ МПа} &< 4,3 \text{ МПа}, \end{aligned}$$

т.е. условия прочности выполняются.

3.2.4 Расчет плоского днища на прочность

Прочностной расчет плоского днища лабораторной колонны будем проводить в условиях гидроиспытаний, так как при их проведении будет иметь место максимальное избыточное давление, оказываемое на днище.

Толщина плоского днища принимается по формуле [50]:

$$S_1 \geq S_{1p} + c, \quad (3.2.6)$$

где $c = 1 \text{ мм}$ – суммарная прибавка к толщине стенки; S_{1p} – расчетная толщина стенки днища, которая определяется по формуле [50]:

$$S_{1p} = KK_o D_p \sqrt{\frac{P_{\text{пр}}}{\varphi[\sigma]}}, \quad (3.2.7)$$

где $K = 0,4$ – коэффициент конструкции днища по 11 типу [50]; K_o – коэффициент ослабления днища; $D_p = 0,26 \text{ м}$ – расчетный диаметр днища, соответствующий диаметру болтов фланцевых соединений; $\varphi = 1$ –

					Лист
					68
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

коэффициент прочности сварного шва; $[\sigma]=184\text{ МПа}$ – допускаемые напряжения при 20°С [51, табл. А.3] для стали 12Х18Н10Т.

Коэффициент K_o определим для наиболее ослабленного сечения днища А – А (см. рис. 3.2.1). Представленные на рисунке 3.2.1 диаметры отверстий в днище имеют следующие значения: $d_1 = d_2 = 20\text{ мм}$, наружный диаметр днища составляет 300 мм.

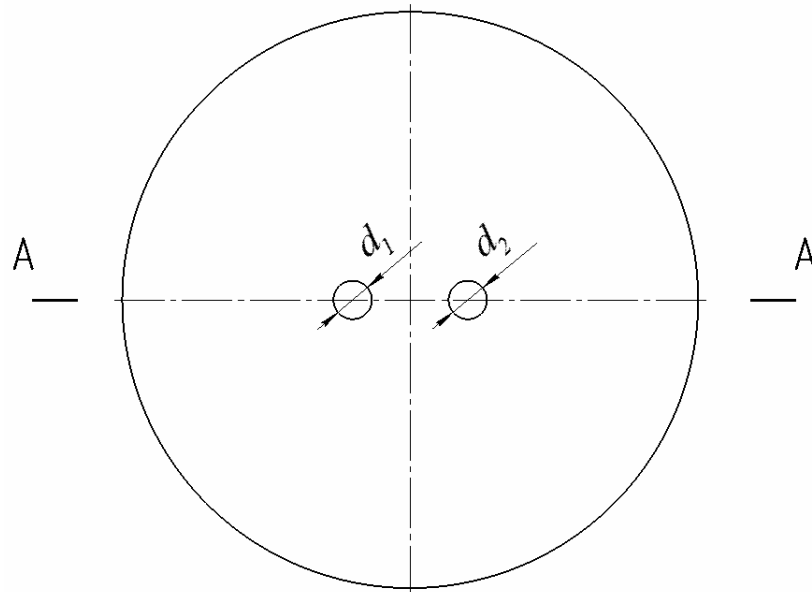


Рисунок 3.2.1- Схема наиболее ослабленного сечения плоского днища

Коэффициент ослабления днища рассчитаем по формуле:

$$K_o = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{\sum d_i}{D_p}\right)^3}{1 - \left(\frac{\sum d_i}{D_p}\right)}} = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{0,02 + 0,02}{0,26}\right)^3}{1 - \left(\frac{0,02 + 0,02}{0,26}\right)}} = 1,085. \quad (3.2.8)$$

Находим расчетную толщину стенки днища:

$$S_{1p} = 0,4 \cdot 1,085 \cdot 0,26 \cdot \sqrt{\frac{0,0132}{1 \cdot 184}} = 1\text{ мм}; \quad (3.2.9)$$

$$S_1 \geq 1 + 1 = 2\text{ мм}. \quad (3.2.10)$$

С учетом формулы (3.2.6) принимаем исполнительную толщину стенки плоского днища $S_1 = 3\text{ мм}$ и находим допускаемое давление по формуле [50]:

$$[p] = \left(\frac{S_1 - c}{KK_o D_p}\right)^2 [\sigma] \varphi = \left(\frac{0,003 - 0,001}{0,4 \cdot 1,085 \cdot 0,26}\right)^2 \cdot 184 \cdot 1 = 0,058\text{ МПа}. \quad (3.2.11)$$

Проверим условие прочности

$$p < [p];$$

$$0,015 \text{ МПа} < 0,058 \text{ МПа},$$

то есть условие прочности выполняется.

3.2.5 Масса лабораторной колонны

В первую очередь определим объем свободного пространства лабораторной колонны, который будет заполнен либо газожидкостной смесью (в рабочих условиях), либо водой (в условиях гидроиспытаний).

Полный объем внутреннего пространства

$$V_{\text{полн}} = \frac{\pi D^2}{4} H_{\text{к}} = \frac{3,14 \cdot 0,2^2}{4} \cdot 1,5 = 0,0471 \text{ м}^3. \quad (3.2.12)$$

Объем занимаемый контактными устройствами

$$V_{\text{ку}} = \frac{\pi D^2}{4} H_{\text{раб}} (1 - \varepsilon) = \frac{3,14 \cdot 0,2^2}{4} \cdot 0,6 \cdot (1 - 0,7) = 5,65 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3. \quad (3.2.13)$$

Объем оставшихся внутренних устройств принимаем в количестве 5% от полного объема внутреннего пространства колонны, т.е. имеем:

$$V_{\text{устр}} = 0,05 V_{\text{полн}} = 0,05 \cdot 0,0471 = 2,35 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3. \quad (3.2.14)$$

Объем, занимаемый газожидкостной смесью в рабочих условиях

$$V_{\text{раб}}^{\text{ГЖ}} = V_{\text{полн}} - V_{\text{устр}} - V_{\text{конт}} - \frac{\pi D^2}{4} H_{\text{сеп}}; \quad (3.2.15)$$

$$V_{\text{раб}}^{\text{ГЖ}} = 0,0471 - 2,35 \cdot 10^{-3} - 5,65 \cdot 10^{-3} - \frac{3,14 \cdot 0,2^2}{4} \cdot 0,3 = 0,0297 \text{ м}^3. \quad (3.2.16)$$

Объем, занимаемый водой в условиях гидроиспытаний

$$V_{\text{исп}}^{\text{В}} = V_{\text{полн}} - V_{\text{устр}} - V_{\text{конт}} - \frac{\pi D^2}{4} (H_{\text{полн}} - H_{\text{в}}); \quad (3.2.17)$$

$$V_{\text{исп}}^{\text{В}} = 0,0471 - 2,35 \cdot 10^{-3} - 5,65 \cdot 10^{-3} - \frac{3,14 \cdot 0,2^2}{4} \cdot (1,5 - 1,35) = 0,0343 \text{ м}^3 \quad (3.2.18)$$

где $H_{\text{в}} = 1,35$ – высота уровня воды в условиях гидроиспытаний.

Масса колонны рассчитывается по формуле:

$$M_{\text{к}} = 1,1 \sum_{i=1}^5 M_{\text{ш}i} + 2M_{\text{ку}}, \quad (3.2.19)$$

										Лист
										70
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

где значение 1,1 принимается в качестве поправочного коэффициента, учитывающего массу внутренних устройств.

Масса одной царги

$$M_{ц} = \left(\pi(D+S)SH_{ц} + 2S_{ф} \frac{\pi(D_{ф}^2 - D^2)}{4} \right) \rho_{со}, \quad (3.2.20)$$

$$M_{ц} = \left(3,14 \cdot (0,2 + 0,01) \cdot 0,01 \cdot 0,3 + 2 \cdot 0,02 \cdot \frac{3,14 \cdot (0,3^2 - 0,2^2)}{4} \right) \cdot 1180 = 4,2 \text{ кг}. \quad (3.2.21)$$

где $\rho_{со} = 1180 \text{ кг/м}^3$ – плотность органического стекла марки СО-95-К [47].

По формуле (3.2.19) находим:

$$M_{к} = 1,1 \cdot (5 \cdot 4,2) + 2 \cdot 9 = 41 \text{ кг}. \quad (3.2.22)$$

Масса газожидкостной смеси в аппарате в рабочих условиях

$$M_{гж} = V_{раб}^{гж} \rho_{гж} = 0,0297 \cdot 515,3 = 15,3 \text{ кг}. \quad (3.2.23)$$

Масса воды в условиях гидроиспытаний

$$M_{ж} = V_{исп}^{ж} \rho_{в} = 0,0343 \cdot 998 = 34,3 \text{ кг}. \quad (3.2.24)$$

Масса теплоносителя в каналах теплообменных модулей:

$$M_{т} = 2(S_1 H_{м}) + 2(S_2 H_{м}) \rho_{т}; \quad (3.2.25)$$

$$M_{т} = 2 \left(2 \left(1,76 \cdot 10^{-3} \cdot 0,27 \right) + 2 \left(1,36 \cdot 10^{-3} \cdot 0,27 \right) \right) \cdot 990 = 3,3 \text{ кг}. \quad (3.2.26)$$

Масса колонны при рабочих условиях:

$$M_{раб} = M_{к} + M_{гж} + M_{т} = 41 + 15,3 + 3,3 = 59,7 \text{ кг}. \quad (3.2.27)$$

Масса колонны при гидроиспытаниях:

$$M_{исп} = M_{к} + M_{ж} = 41 + 34,3 = 75,3 \text{ кг}. \quad (3.2.28)$$

3.2.6 Проверка условия устойчивости нижней царги

Проверим самую нижнюю царгу корпуса лабораторной колонны на устойчивость от осевого сжимающего усилия, образуемого от веса остальных царг корпуса, контактных устройств и теплоносителя в их внутренних каналах.

Определим величину осевого сжимающего усилия:

$$M_{сж} = M_{к} + M_{т} = 41 + 3,3 = 44,3 \text{ кг}. \quad (3.2.29)$$

$$F = M_{сж} g = 44,3 \cdot 9,81 = 435 \text{ Н} = 4,35 \cdot 10^{-4} \text{ МН}. \quad (3.2.30)$$

										Лист
										71
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ					

Допускаемое осевое сжимающее усилие рассчитаем по формуле [50]:

$$[F] = \frac{[F]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\text{п}}}{[F]_E}\right)^2}}, \quad (3.2.31)$$

где допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности

$$[F]_{\text{п}} = \pi(D + S)S[\sigma] = 3,14 \cdot (0,2 + 0,01) \cdot 0,01 \cdot 66 = 0,435 \text{ МН}, \quad (3.2.32)$$

а допускаемое осевое сжимающее усилие в пределах упругости из условия устойчивости при $H/D < 10$:

$$[F]_E = \frac{31,0 \cdot 10^{-5} E}{n_y} D^2 \left[\frac{100S}{D} \right]^{2,5}; \quad (3.2.33)$$

$$[F]_E = \frac{31,0 \cdot 10^{-5} \cdot 2900}{2,4} \cdot 0,2^2 \left[\frac{100 \cdot 0,01}{0,2} \right]^{2,5} = 0,838 \text{ МН}, \quad (3.2.34)$$

где $E = 2900 \text{ МПа}$ – модуль продольной упругости органического стекла при рабочей температуре [47]; $n_y = 2,4$ – коэффициент запаса устойчивости.

По формуле (3.2.31) получим

$$[F] = \frac{0,435}{\sqrt{1 + \left(\frac{0,435}{0,838}\right)^2}} = 0,386 \text{ МН}. \quad (3.2.35)$$

Проверим условие устойчивости:

$$\frac{F}{[F]} = \frac{4,35 \cdot 10^{-4}}{0,386} = 0,0011 < 1,$$

т.е. условие устойчивости выполняется.

3.3 Подбор насосно-компрессорного и вспомогательного оборудования

К лабораторному стенду необходимо подобрать следующее насосно-компрессорное и вспомогательное оборудование в соответствии с разработанной технологической схемой (см. рисунок 2.4.1):

- насос для подачи рабочей жидкости в колонну;
- насос для подачи горячего теплоносителя во внутреннее пространство теплообменных модулей контактных устройств;
- компрессор для подачи сжатого воздуха в колонну;
- буферная емкость для рабочей жидкости;

- буферная емкость с трубчатым электронагревателем для горячего теплоносителя.

3.3.1 Подбор насосно-компрессорного оборудования

В первую очередь подберем насосы для рабочей жидкости и теплоносителя. Массовый расход рабочей жидкости в соответствии с исходными данными составляет 0,25 кг/с (0,9 м³/ч). Массовый расход теплоносителя в соответствии с тепловыми расчетами (см. подраздел 3.1.6) составляет 0,376 кг/с (1,4 м³/ч). Принимаем с запасом максимальный объемный расход для данных потоков в количестве $Q_{\max} = 1,8 \text{ м}^3/\text{ч}$. Тогда диаметр трубопроводов с учетом экономически выгодной скорости жидкости $w_{\text{опт}} = 1,5 \text{ м/с}$ составляет

$$d = \sqrt{\frac{Q_{\max}}{0,785 w_{\text{опт}} \cdot 3600}} = \sqrt{\frac{1,8}{0,785 \cdot 1,5 \cdot 3600}} = 0,0206 \text{ м.} \quad (3.3.1)$$

Из сортамента [52] принимаем стандартную трубу $\text{Ø}25 \times 2,5 \text{ мм}$ с внутренним диаметром

$$d = d_{\text{н}} - 2\delta = 25 - 2 \cdot 2,5 = 20 \text{ мм.} \quad (3.3.2)$$

Тогда действительная скорость жидкости в трубопроводах будет составлять:

$$w = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 1,8}{3,14 \cdot 0,02^2 \cdot 3600} = 1,59 \text{ м/с.} \quad (3.3.3)$$

Требуемый напор насоса для подачи рабочей жидкости в колонну (в соответствии с рисунком 3.3.1) определим по следующей формуле:

$$H_{\text{треб}} = z + H_{\text{ур}} + \Delta h_{\text{пот}}, \quad (3.3.4)$$

где $z = 0,7 \text{ м}$ – высота отметки уровня колонны от выходящего патрубка насоса; $H_{\text{ур}} = 1,2 \text{ м}$ – высота уровня жидкости в колонне; $\Delta h_{\text{пот}}$ – потери напора на трение и местные сопротивления в трубопроводе, определяемые по формуле Дарси - Вейсбаха [53]:

$$\Delta h_{\text{пот}} = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \xi \right) \frac{w^2}{2g}, \quad (3.3.5)$$

где λ – безразмерный коэффициент трения; $l = 4 \text{ м}$ – полная длина трубопровода рабочей жидкости; $\sum \xi = 16,4$ – суммарный коэффициент местных сопротивлений.

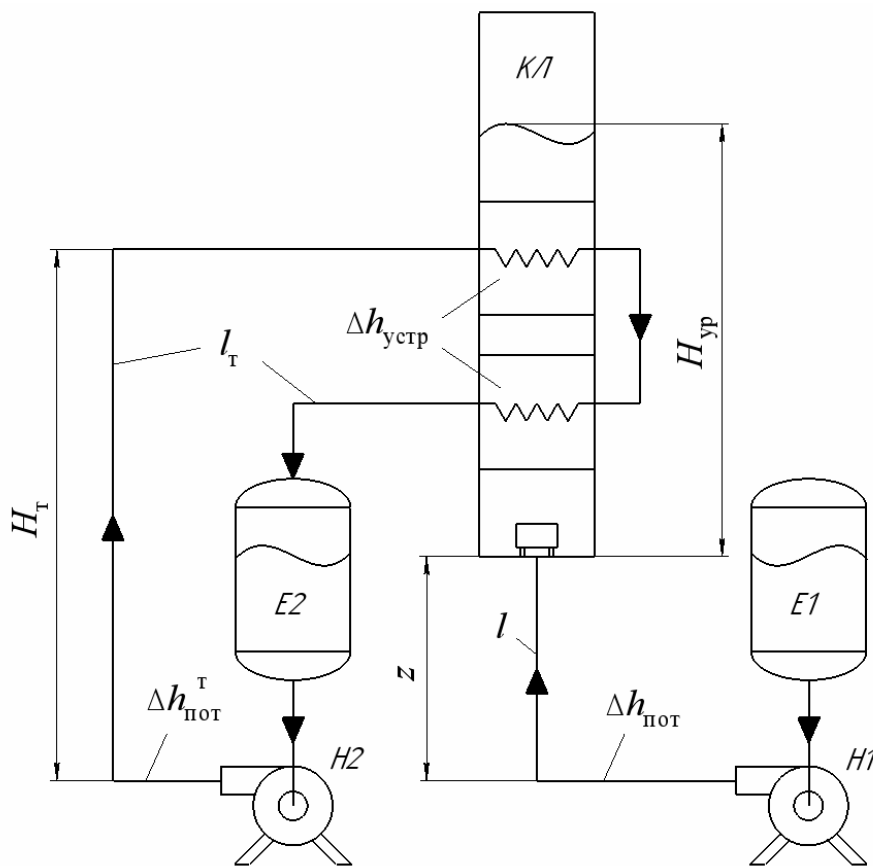


Рисунок 3.3.1 – К расчету требуемых напоров насосов лабораторного стенда

Рабочая жидкость, подаваемая в колонну, имеет следующие физические параметры при температуре 15°C: $\rho = 999 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 1,14 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ [41, стр. 537], тогда критерий Рейнольдса будет иметь величину:

$$\text{Re} = \frac{wd\rho}{\mu} = \frac{1,59 \cdot 0,02 \cdot 999}{1,14 \cdot 10^{-3}} \cong 27900 . \quad (3.3.6)$$

Безразмерный коэффициент трения рассчитаем с помощью формулы А.Д. Альтшуля [53]:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} ; \quad (3.3.7)$$

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{0,02} + \frac{68}{27900} \right)^{0,25} = 0,032 . \quad (3.3.8)$$

где $\Delta = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – средняя высота выступов для новой стальной трубы [53].

Имеем

$$\Delta h_{\text{пот}} = \left(0,032 \cdot \frac{4}{0,02} + 16,4 \right) \cdot \frac{1,59^2}{2 \cdot 9,81} = 2,95 \text{ м} . \quad (3.3.9)$$

Потери напора на трение непосредственно в лабораторной колонне пренебрежительно малы и в расчетах не учитываются. Так, по формуле (3.3.4) находим:

$$H_{\text{трѐб}} = 0,7 + 1,2 + 2,95 = 4,85 \text{ м.} \quad (3.3.10)$$

Таким образом имеем требуемые параметры для насоса подачи рабочей жидкости в колонну: $Q_{\text{трѐб}} = 1,8 \text{ м}^3/\text{ч}$, $H_{\text{трѐб}} = 4,85 \text{ м}$. Находим в каталоге компании «ГМС Ливгидромаш» [54] подходящий вихревой насос марки ВК 1/16 со следующими параметрами: $Q = 3,4 \text{ м}^3/\text{ч}$, $H = 16 \text{ м}$, $N = 1,2 \text{ кВт}$.

Требуемый напор для транспортировки горячего теплоносителя

$$H_{\text{трѐб}}^{\text{T}} = z + H_{\text{T}} + \Delta h_{\text{пот}}^{\text{T}} + 2\Delta h_{\text{устр}}, \quad (3.3.11)$$

$H_{\text{T}} = 0,9 \text{ м}$ – высота подъема теплоносителя; $\Delta h_{\text{устр}}$ – потери напора во внутренних каналах теплообменных модулей контактных устройств; $\Delta h_{\text{пот}}^{\text{T}}$ – потери напора на трение и местные сопротивления в трубопроводе для теплоносителя, определяемые по формуле:

$$\Delta h_{\text{пот}}^{\text{T}} = \left(\lambda_{\text{T}} \frac{l_{\text{T}}}{d} + \sum \xi_{\text{T}} \right) \frac{w^2}{2g} + \Delta h_{\text{устр}}, \quad (3.3.12)$$

где λ_{T} – безразмерный коэффициент трения для горячего теплоносителя; $l_{\text{T}} = 6 \text{ м}$ – полная длина трубопровода теплоносителя; $\sum \xi = 29$ – суммарный коэффициент местных сопротивлений.

Коэффициент трения для горячего трения также определим по формуле А.Д. Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{\text{Re}_{\text{T}}} \right)^{0,25}, \quad (3.3.13)$$

где Re_{T} – критерий Рейнольдса для теплоносителя, определяемый по формуле

$$\text{Re} = \frac{wd\rho_{\text{T}}}{\mu_{\text{T}}} = \frac{1,59 \cdot 0,02 \cdot 990}{0,614 \cdot 10^{-3}} \cong 51350, \quad (3.3.14)$$

где $\rho_{\text{T}} = 990 \text{ кг/м}^3$ – плотность теплоносителя при температуре 44°C ;

$\mu_{\text{T}} = 0,614 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ – вязкость теплоносителя при температуре 44°C .

Коэффициент трения

$$\lambda_{\text{T}} = 0,11 \left(\frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{0,02} + \frac{68}{51350} \right)^{0,25} = 0,031. \quad (3.3.15)$$

						Лист
					ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ	75
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Потери напора на трение и местные сопротивления

$$\Delta h_{\text{пот}}^T = \left(0,031 \cdot \frac{6}{0,02} + 29 \right) \cdot \frac{1,59^2}{2 \cdot 9,81} = 4,95 \text{ м.} \quad (3.3.16)$$

Гидравлическое сопротивление внутреннего пространства теплообменных модулей контактного устройства найдем по формуле:

$$\Delta h_{\text{устр}} = \left(\lambda_B \frac{l_B}{d_{\text{экв}}} + \sum \xi_B \right) \frac{w_B^2}{2g}, \quad (3.3.17)$$

где $l_B = 1,2 \text{ м}$ – общая длина пути теплоносителя; $d_{\text{экв}} = 18,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – эквивалентный диаметр; $\sum \xi_{\text{устр}} = 47$ – суммарный коэффициент местных сопротивлений; $w_B = 0,32 \text{ м/с}$ – средняя скорость теплоносителя внутри модулей; λ_B – коэффициент трения, рассчитываемый по формуле Альтшуля:

$$\lambda_B = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d_{\text{экв}}} + \frac{68}{\text{Re}_B} \right)^{0,25} = 0,11 \left(\frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{18,8 \cdot 10^{-3}} + \frac{68}{9700} \right)^{0,25} = 0,0367, \quad (3.3.18)$$

$\text{Re}_B = 9700$ – критерий Рейнольдса для теплоносителя во внутреннем пространстве теплообменных модулей контактного устройства.

По формуле (3.3.17) находим

$$\Delta h_{\text{устр}} = \left(0,0367 \cdot \frac{1,2}{18,8 \cdot 10^{-3}} + 47 \right) \cdot \frac{0,32^2}{2 \cdot 9,81} = 0,194 \text{ м.} \quad (3.3.19)$$

Тогда требуемый напор для транспортировки горячего теплоносителя

$$H_{\text{треб}}^T = 0,7 + 0,9 + 4,95 + 2 \cdot 0,194 \cong 6,94 \text{ м.} \quad (3.3.20)$$

По полученным параметрам подбираем вихревой насос марки ВК 1/16, аналогичный ранее принятому насосу для подачи рабочей жидкости в колонну.

Подачу сжатого воздуха в лабораторную колонну будем осуществлять с помощью компрессора. Требуемое давление для него будет соответствовать максимальному гидростатическому давлению столба жидкости в колонне, которое, в свою очередь, составляет 12 кПа. Потерями давления за счет трения в трубопроводах можно пренебречь (ввиду их малости). Таким образом имеем $P = 12 \text{ кПа}$.

Максимальный объемный расход сжатого воздуха в соответствии с исходными данными составляет $V = 0,001 \text{ м}^3/\text{с}$ или $3,6 \text{ м}^3/\text{ч}$, что также будет являться требуемым параметром для подбора компрессора.

По полученным параметрам подбираем из каталога компании «REMEZA» [55] поршневой компрессор модели СБ4/С-50.LB24 с прямым

					Лист
					76
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ

приводом и ресивером объемом 24 литра. Характеристики выбранного компрессора: $V = 12 \text{ м}^3/\text{ч}$, $P = 8 \text{ бар}$, $N = 1,5 \text{ кВт}$.

3.3.2 Подбор вспомогательного оборудования

Рассчитаем требуемый объем емкостей для буферного хранения рабочей жидкости и теплоносителя, исходя из минимального времени, необходимого для проведения экспериментов. Минимальное время, необходимое для снятия кривых отклика лабораторной колонны на импульсное возмущение, составляет 400 секунд. С учетом максимального объемного расхода рабочей жидкости и теплоносителя в количестве $V_{\text{max}} = 1,8 \text{ м}^3/\text{ч}$ будем иметь следующий требуемый объем емкостей

$$V_{\text{тр}} = \frac{V_{\text{max}} \tau}{3600} = \frac{1,8 \cdot 400}{3600} = 0,2 \text{ м}^3. \quad (3.3.21)$$

Принимаем степень заполнения сосуда $\phi = 85\%$ с учетом внутренних устройств и средств КИПиА. Тогда полный объем емкости будет составлять

$$V = \frac{V_{\text{тр}}}{0,85} = \frac{0,2}{0,85} = 0,235 \text{ м}^3. \quad (3.3.22)$$

Таким образом, в соответствии с [56] подбираем две емкости объемом $0,25 \text{ м}^3$ типа ВЭП исполнение 2 как для рабочей жидкости, так и для горячего теплоносителя.

4 ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

4.1 Организационная часть

В организационной части раздела требуется составить полный график работ по проектированию, монтажу и проведению научных исследований на лабораторном стенде. В результате должен быть получен сетевой график всех работ, связанных с лабораторным стендом, найден поздний срок завершения данных работ и резерв времени на их проведение.

График планово-предупредительных ремонтов лабораторной колонны представлен в таблице 4.1.1. В таблице 4.1.1 приняты следующие сокращения: ТО – техническое обслуживание, ТР – текущий ремонт.

Таблица 4.1.1 - График планово-предупредительных ремонтов лабораторной колонны

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
ТО, ТР	ТО	-	ТО	-	ТО	-	ТР	-	ТО	-	ТО	-

Приведем список всех событий и проводимых между ними работ (таблица 4.1.2), для которых рассчитаем ожидаемую продолжительность по формуле [57]:

$$t_{\text{ож}} = \frac{3t_{\text{min}} + 2t_{\text{max}}}{5}, \quad (4.1.1)$$

где t_{min} – наименьшее время исполнения;

t_{max} – наибольшее время исполнения.

Таблица 4.1.2 - Расчет ожидаемой продолжительности работ

№	Событие	Работа между событиями	t_{min} , дней	t_{max} , дней	$t_{\text{ож}}$, дней
1	Задание получено	Изучение задания	1	2	1,4
2	Задание изучено	Обоснование конструкции, подбор материалов	2	3	2,4
3	Конструкция обоснована, материалы подобраны	Проектировочный расчет	12	15	13,2

Продолжение таблицы 4.1.2.

4	Проектировочный расчет выполнен	Разработка чертежей	10	12	10,8
5	Чертежи разработаны	Проведение консультаций	10	10	10
6	Консультации проведены	Согласование установки стенда	1	1	1
7	Установка согласована	Завершение проектирования	1	1	1
8	Проектирование завершено	Заготовка материалов и оборудования	3	4	3,4
9	Оборудование и материалы заготовлены	Изготовление внутренних устройств	1	2	1,4
10	Внутренние устройства изготовлены	Монтаж опоры и площадки обслуживания	2	3	2,4
11	Монтаж опоры и площадки выполнен	Монтаж лабораторной колонны	1	2	1,4
12	Монтаж колонны выполнен	Установка вспомогательного оборудования	2	2	2
13	Вспомогательное оборудование установлено	Подключение коммуникаций и монтаж трубопроводов	3	4	3,4
14	Коммуникации подключены	Монтаж средств КИПиА	1	2	1,4
15	Средства КИПиА смонтированы	Подключение оборудования к электрической сети	1	1	1
16	Оборудование подключено к электрической сети	Установка щита управления	1	1	1
17	Щит управления установлен	Проведение пуска и наладки стенда	1	1	1
18	Пуск и наладка проведены	Проведение исследований	7	8	7,4
19	Исследования проведены	Обработка экспериментальных данных	5	7	5,8

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

Продолжение таблицы 4.1.2.

20	Данные обработаны	Проведение консультаций	6	6	6
21	Консультации проведены	Оформление результатов	2	4	2,8
22	Результаты оформлены	Завершение исследований	1	1	1
23	Исследования завершены	Сумма всех работ	74	92	81,2

Построим сетевой график и представим его на рисунке 4.1.1. На графике видно, что некоторые работы могут проводиться параллельно.

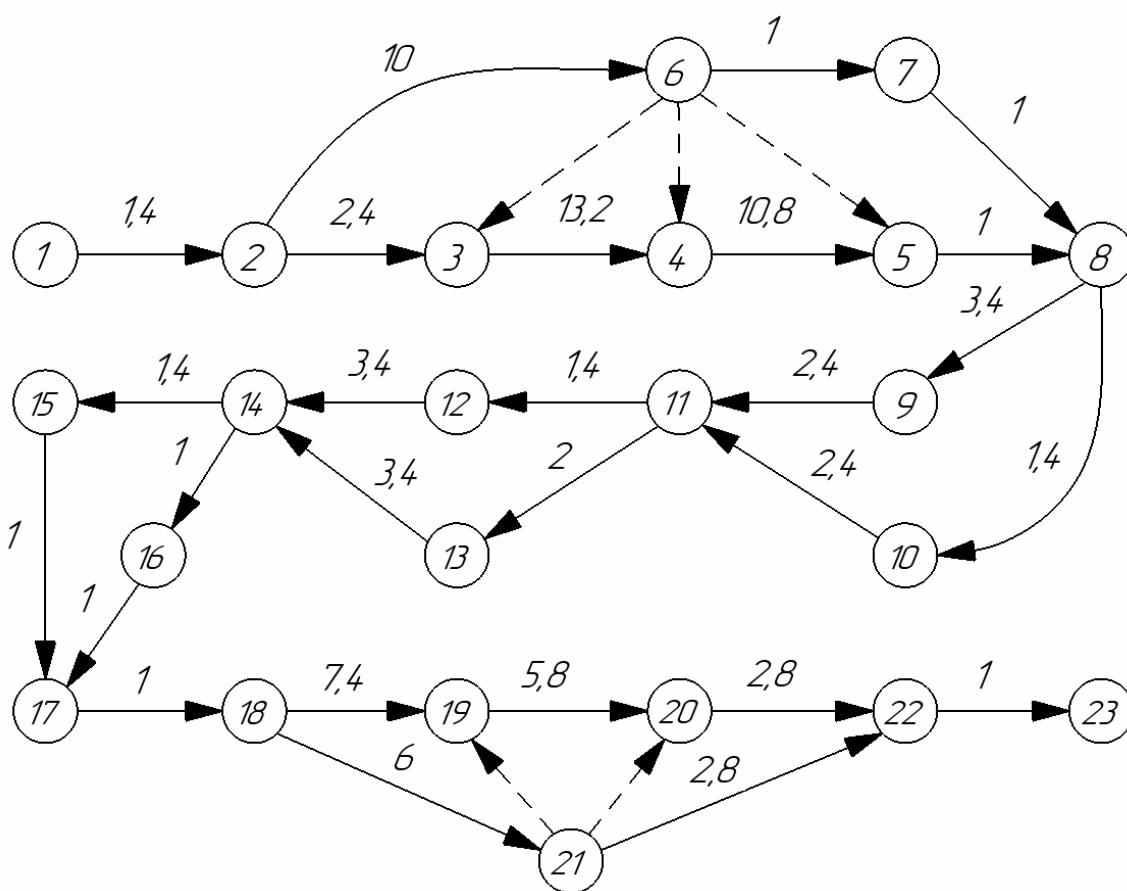


Рисунок 4.1.1 - Сетевой график работ, связанных с лабораторным стендом

Исходя из рисунка 4.1.1, находим критический путь, состоящий из следующих событий: 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 8 - 9 - 11 - 13 - 14 - 15 - 17 - 18 - 19 - 20 - 22 - 23. Общая продолжительность критического пути $t(L_{кр}) = 60,4$ дней. Далее определим ранний и поздний сроки окончания работ, а также полный резерв времени работ.

Ранний и поздний сроки свершения события рассчитываются по формулам [57]:

$$T_i^p = t[L(j+i)_{\max}]; \quad (4.1.2)$$

$$T_i^п = t(L_{кр}) - t[L(i+C)_{\max}], \quad (4.1.3)$$

где $t[L(j+i)_{\max}]$ – продолжительность максимального из путей от исходного события до данного события i ; $t[L(i+C)_{\max}]$ – длительность максимального из путей от события i до завершающего события C .

Ранний срок начала работы $T_{ij}^{пн}$ равен T_i^p . Ранний срок окончания работы определяется по формуле [57]:

$$T_{ij}^{по} = T_i^p + t_{ij}^{ож}. \quad (4.1.4)$$

Поздний срок окончания работы $T_{ij}^{по}$ равен $T_i^п$. Поздний срок начала работы определяется по формуле [57]:

$$T_{ij}^{пн} = T_i^п - t_{ij}^{ож}. \quad (4.1.5)$$

Расчет сетевого графика осуществим табличным методом. Результаты расчета представим в таблице 4.1.3. Полный резерв времени по каждой работе обозначается символом $T_{ij}^{рп}$.

Таблица 4.1.3 - Расчет сетевого графика работ

Событие		Параметр сети, дни						
Предшест - вующее i	Последую - щее j	$T_{ij}^{пн}$	$t_{ij}^{ож}$	$T_{ij}^{по}$	$T_{ij}^{пн}$	$t_{ij}^{ож}$	$T_{ij}^{по}$	$T_{ij}^{рп}$
1	2	0	1,4	1,4	0	1,4	1,4	0
2	3	1,4	2,4	3,8	1,4	2,4	3,8	0
2	6	1,4	10	11,4	16,8	10	26,8	15,4
3	4	3,8	13,2	17	3,8	13,2	17	0
4	5	17	10,8	27,8	17	10,8	27,8	0
5	8	27,8	1	28,8	27,8	1	28,8	0
6	7	11,4	1	12,4	26,8	1	27,8	15,4
7	8	12,4	1	13,4	27,8	1	28,8	15,4

Продолжение таблицы 4.1.3.

8	9	28,8	3,4	32,2	28,8	3,4	32,2	0
8	10	28,8	1,4	30,2	30,8	1,4	32,2	2
9	11	32,2	2,4	34,6	32,2	2,4	34,6	0
10	11	30,2	2,4	32,6	32,2	2,4	34,6	2
11	12	34,6	1,4	36	35,2	1,4	36,6	0,6
11	13	34,6	2	36,6	34,6	2	36,6	0
12	14	36	3,4	39,4	36,6	3,4	40	0,6
13	14	36,6	3,4	40	36,6	3,4	40	0
14	15	40	1,4	41,4	40	1,4	41,4	0
14	16	39,4	1	40,4	40,4	1	41,4	1
15	17	41,4	1	42,4	41,4	1	42,4	0
16	17	40,4	1	41,4	41,4	1	42,4	1
17	18	42,4	1	43,4	42,4	1	43,4	0
18	19	43,4	7,4	50,8	43,4	7,4	50,8	0
18	21	43,4	6	49,4	50,6	6	56,6	7,2
19	20	50,8	5,8	56,6	50,8	5,8	56,6	0
20	22	56,6	2,8	59,4	56,6	2,8	59,4	0
21	22	49,4	2,8	52,2	56,6	2,8	59,4	7,2
22	23	59,4	1	60,4	59,4	1	60,4	0

Всего на проведение работ, связанных с лабораторным стендом, закладывается 3 календарных месяца. Так, с учетом пятидневной рабочей недели заданный срок свершения работ будет составлять 60 дней. Рассчитаем вероятность того, что все работы завершатся в пределах поставленного срока. Из опыта сетевого планирования и управления для характеристики качества составленного плана реализации проекта рекомендован интервал значений вероятностей $0,35 \leq P_k \leq 0,65$ [57].

Для расчета вероятности определим аргумент нормальной функции распределения вероятностей:

$$Z = \frac{T_3 - T_k}{\sqrt{\sum_{ij} \sigma_{ij}^2}}, \quad (4.1.6)$$

где $T_3 = 60$ дней – заданный срок свершения работ; $T_k = 60,4$ дней – срок свершения завершающего события по расчету; σ_{ij} – дисперсия работы, лежащей на критическом пути.

Величина дисперсии для каждой работы определяется по формуле:

$$\sigma^2 = 0,04(t_{\min} - t_{\max})^2. \quad (4.1.7)$$

По результатам расчетов будем иметь следующую сумму дисперсий работ, лежащих на критическом пути:

$$\sum_{ij} \sigma^2 = 1,12. \quad (4.1.8)$$

Рассчитаем аргумент:

$$Z = \frac{60 - 60,4}{\sqrt{1,12}} = -0,38. \quad (4.1.9)$$

Для рассчитанного аргумента находим значение вероятности свершения конечного события $P_k = 0,35$ согласно [57, табл. 4.6]. Это значение входит в рекомендуемые пределы ($0,35 \leq P_k \leq 0,65$) и указывает на то, что при составлении сетевой модели комплекса работ в достаточной степени учтены факторы, влияющие на правильную оценку временных параметров сети в распределение ресурсов. Таким образом, сетевой график может быть принят для работы без изменения, а комплекс работ должен уложиться в установленный срок.

4.2 Экономическая часть

Рассчитаем полную стоимость проектирования и монтажа лабораторного стенда, а также себестоимость проводимых научных исследований.

Расчет начнем с проектировочных затрат, которые включают в себя: закупку различных канцелярских и технических принадлежностей, затраты на электроэнергию, зарплату преподавателя и заведующего лабораторией, а также отчисления на социальные нужды.

Для проектирования лабораторной колонны, которым будет заниматься инженер с еженедельными консультациями преподавателя, потребуется 1 месяц. Для проектирования необходима закупка следующих принадлежностей:

					Лист
					83
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ

- канцелярские товары (бумага, ручки, линейки, карандаши и др.);
- технические средства (измерительная рулетка, устройства для хранения и передачи информации).

Принимаем затраты на закупку канцелярских товаров и технических средств в размере 1000 рублей.

Проектирование чертежей осуществляется с помощью персонального компьютера. В течение месяца в целях разработки лабораторной колонны будет затрачено 90 часов рабочего времени на компьютере. При его мощности в 500 Вт и тарифной ставке за электроэнергию в 7 рублей/кВт·ч получим затраты на проектирование чертежей в размере 315 рублей.

По мере разработки лабораторной колонны инженер консультируется с преподавателем. В месяц получаем 20 часов консультаций. Также потребуется согласование установки аппарата с заведующим лабораторией, при этом будет затрачено 0,5 его рабочего дня. Отчисления на социальные нужды принимаем в размере 30,2% от заработной платы работника. Итоги расчетов представлены в таблице 4.2.1.

Таблица 4.2.1 - Расчеты заработной платы специалистов с учетом социальных отчислений (при проектировании лабораторного стенда)

Работник	Тарифная ставка руб/ч	Затраченное время, час	Затраты на з/п, руб.	Социальные отчисления, руб.
Инженер	45	114	5130	1549
Преподаватель	110	20	2200	664
Заведующий Лабораторией	85	4	340	103
Итого			7670	2316

Итого имеем затраты на заработную плату и социальные отчисления работников на проекторочном этапе 9986 рублей.

При монтаже лабораторного стенда будут иметь место следующие расходы: затраты на материалы корпуса колонны, внутренние устройства, крепежные устройства, средства КИПиА, трубопроводные узлы и арматуру. Также потребуется закупка насосно-компрессорного и вспомогательного оборудования.

Расчет стоимости материалов для лабораторного стенда, с учетом затрат на насосно-компрессорное и вспомогательное оборудование, представлен в таблице 4.2.2. Расчет стоимости материалов для лабораторной колонны представлен в таблице 4.2.3. Расчет стоимости средств КИПиА с учетом затрат на установку персонального компьютера представлен в таблице 4.2.4.

Таблица 4.2.2 - Стоимость материалов и оборудования для лабораторного стенда

№	Наименование	Кол-во	Единица измерения	Цена единицы, руб	Сумма, руб
1	Насос вихревой ВК 1/16А	2	шт	27700	55400
2	Компрессор поршневой REMEZA СБ 4/С - 50.LB24	1	шт	27430	27430
3	Буферная емкость	2	шт	16600	33200
4	ТЭН	2	шт	2000	4000
5	Опора колонная	1	шт	1400	1400
6	Площадка обслуживания	1	шт	2430	2430
7	Стальная труба Ду50	3	м	400	1200
8	Стальная труба Ду25	2	м	200	400
9	Стальная труба Ду20	15	м	150	2250
10	Стальной отвод Ду50	1	шт	180	180
11	Стальной отвод Ду25	1	шт	80	80
12	Стальной отвод Ду20	12	шт	60	400
13	Вентиль запорный Ду50	1	шт	1500	1500
14	Шаровой кран Ду25	1	шт	500	500
15	Вентиль запорный Ду20	10	шт	300	3000
16	Щит управления установкой	1	шт	500	500
17	Автомат электрический	1	шт	900	900
Итого					135090
18	Транспортно-заготовительные расходы			5%	6755
Итого					141845

Таблица 4.2.3 - Стоимость материалов для лабораторной колонны

№	Наименование	Материал	Масса, кг	Затраты, руб
1	Корпус колонны	Стекло органическое	26	8000
2	Контактные устройства	Сталь 20, ABS-пластик	18	2800
3	Внутренние устройства	Сталь 12X18Н10Т	5	1500
4	Крепежные изделия	Сталь 40	4	450
5	Монтажные принадлежности (прокладки, герметик)			800
Итого				13550
6	Транспортно-заготовительные расходы		5%	6775
Итого				20325

Таблица 4.2.4 - Расчет стоимости средств КИПиА

№	Наименование	Кол-во	Цена единицы, руб	Сумма, руб
1	Ротаметр	3	10400	31200
2	Датчик температуры	5	1000	5000
3	Оксиметр	1	40000	40000
4	Сигнализатор уровня	2	500	4000
5	Уровнемерная колонка	2	1000	1000
6	Дифманометр	1	38500	38500
7	Персональный компьютер	1	25000	25000
Итого				142700

Монтажом лабораторной колонны занимается группа инженеров. Также потребуется помощь следующих специалистов:

- слесарь 4-ого разряда – изготовление внутренних и контактных устройств лабораторной колонны; монтаж линий и узлов трубопровода от вспомогательного оборудования к главному аппарату; установка опоры и площадки обслуживания.

					Лист
					86
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ

- электромонтер 4-ого разряда – подключение силовых кабелей к насосно-компрессорному и вспомогательному оборудованию, установка электрических контрольно-измерительных приборов и монтаж щита управления лабораторным стендом.

- лаборант – проведение монтажа корпуса лабораторной колонны и собранных внутренних устройств с помощью команды инженеров.

- заведующий лабораторией – контроль за ходом монтажа, пуска и наладки лабораторного стенда.

Расчет заработанных плат персонала и отчислений на социальные нужды (в размере 30,2% от з/п) представлен в таблице 4.2.5.

Таблица 4.2.5 - Расчет заработной платы специалистов с учетом социальных отчислений (при монтаже лабораторного стенда)

Работник	Тарифная ставка, руб/ч	Затраченное время, час	Затраты на з/п, руб	Социальные отчисления, руб
Слесарь	100	24	2400	725
Электромонтер	100	16	1600	483
Инженер × 2	45 × 2	24	2160	652
Лаборант	45	16	720	217
Заведующий лабораторией	85	8	680	205
Итого			7560	2282

Так, имеем затраты на заработанную плату специалистов и отчисления на социальные нужды при монтаже лабораторного стенда в размере 9842 рубля.

На проведение исследований заложено 3 недели, при этом будут иметь место следующие расходы: затраты на электроэнергию, воду и заработанную плату инженера, лаборанта и преподавателя при проведении экспериментов, а также затраты на консультации преподавателя в период исследований.

Эксперименты и консультации преподавателя проводятся 2 раза в неделю с продолжительностью в 2 часа. Инженер занимается исследованиями, консультируется с преподавателем и занимается обработкой экспериментальных данных по 3 часа в день в течение трех недель. Расчет заработных плат специалистов и отчислений на социальные нужды в период исследований представлен в таблице 4.2.6.

Таблица 4.2.6 - Расчет заработной платы специалистов с учетом социальных отчислений (в период исследований)

Работник	Тарифная ставка, руб/ч	Затраченное время, час	Затраты на з/п, руб	Социальные отчисления, руб
Инженер	45	70	3150	951
Преподаватель	110	24	2640	797
Лаборант	45	12	540	163
Итого			6330	1911

Так, имеем затраты на заработанную плату специалистов и отчисления на социальные нужды в период научных исследований в размере 8241 рубля.

Расчет стоимости энергетических ресурсов в период исследований представлен в таблице 4.2.7. Эти затраты складываются из работы насосно-компрессорного оборудования, тэнов для подогрева теплоносителя и стоимости коммунальных услуг по холодному водоснабжению.

Таблица 4.2.7 - Расчет стоимости энергетических ресурсов в период исследований

№	Наименование затрат	Мощность, расход	Время работы, час	Тарифная ставка	Затраты, руб
1	Работа насоса	2×1,6 кВт	12	7 руб/кВт·ч	269
2	Работа компрессора	2,2 кВт	12	7 руб/кВт·ч	185
3	Работа тэнов	2×4 кВт	24	7 руб/кВт·ч	1344
4	Подача воды	1,5 м ³ /ч	12	42 руб/м ³	756
5	Подача теплоносителя	1,5 м ³ /ч	12	42 руб/м ³	756
Итого					3310

На любой из описанных выше стадий могут возникнуть непредвиденные затраты, связанные с закупкой дополнительных материалов, оборудования и инструментов. Кроме того, при проведении планового технического обслуживания и ремонта могут иметь место расходы на крепежные детали, прокладки, герметики и дополнительные инструменты. Сумму этих затрат принимаем в размере 5% от общей стоимости материалов и оборудования лабораторного стенда, то есть имеем величину прочих расходов денежных средств 7000 рублей.

Занесем все затраты, связанные с проектированием, монтажом и проведением научных исследований на лабораторном стенде в одну общую смету и представим ее в таблице 4.2.8.

Таблица 4.2.8 - Смета затрат на лабораторный стенд

№	Наименование затрат	Материалы, руб	Энергия, руб	Зарплата, руб	Сумма, руб
1	Проектирование	1000	315	9986	11301
2	Монтаж	304870	-	9842	314712
3	Исследования	-	3310	8241	11551
4	Прочие затраты	7000	-	-	6500
Итого		312370	3625	28069	344065

Таким образом, по результатам проведенных расчетов было выявлено, что общая сумма затрат, связанных с лабораторным стендом и научными исследованиями, составляет 344065 рублей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги, обобщим основные результаты и выводы, полученные в данной выпускной квалификационной работе. Так, в первом разделе был проведен обзор конструкций газлифтных и барботажных аппаратов. Их последующее сравнение показало, что перспективной конструкцией для проведения технологических процессов в системах «газ – жидкость» является барботажный аппарат с контактными теплообменными устройствами, поскольку он наиболее полно отвечает основным требованиям, предъявляемым к подобным конструкциям. На основании этого, барботажный аппарат с контактными теплообменными устройствами был выбран в качестве объекта исследования.

Поскольку выбранный объект до этого не исследовался в затопленных условиях, в первую очередь было принято решение об изучении структуры проходящего через него потока с помощью трассерного метода. Для этого была спроектирована технологическая схема лабораторного стенда, рассчитаны основные геометрические размеры барботажной колонны, сконструировано контактное теплообменное устройство. Таким образом, в ходе проектно-конструкторской части настоящей работы были получены следующие данные по лабораторному стенду:

- внутренний диаметр барботажной колонны $d = 0,2$ м;
- высота колонны $H_k = 1,5$ м;
- количество блоков контактных устройств – 2 шт.;
- высота одного блока $H_{бл} = 0,3$ м;
- количество теплообменных модулей в одном блоке – 4 шт.;
- полная поверхность теплообмена в колонне $F_{уст} = 0,778$ м²;
- объем буферных емкостей для рабочей жидкости и горячего теплоносителя $V = 0,25$ м³.

Также было подобрано насосно-компрессорное и вспомогательное оборудование. Для рабочей жидкости и горячего теплоносителя приняты вихревые насосы марки ВК 1/16 производства компании «ГМС Ливгидромаш», для сжатого воздуха – поршневой компрессор модели СБ4/С-50.LB24 производства компании «REMEZA».

Во втором разделе данной работы, с учетом спроектированного лабораторного стенда, были разработаны методики проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных. Затем были проведены эксперименты по изучению структуры потоков в пустотелой барботажной колонне и ее модификации с одним блоком контактного устройства. По результатам проведенных исследований было сделано следующее:

- получены кривые отклика пустотелой барботажной колонны и ее модификации с одним блоком контактного устройства на импульсные возмущения, а также определены численные показатели, отражающие структуру потоков;

										Лист
										90
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ					

- подобраны математические модели для описания структуры потоков в пустотелой барботажной колонне и в ее модификации с одним блоком контактного устройства;

- наглядно отражено изменение структуры потоков в барботажной колонне после установки в нее одного блока контактного устройства;

- представлены зависимости среднего времени пребывания частиц и безразмерные дисперсии их пребывания от расходного газосодержания при постоянной фиктивной скорости жидкости в барботажной колонне;

- описаны результаты видеосъемки движения газожидкостной смеси в барботажной колонне во время проведения экспериментов, а также представлена схема с общим видом структуры потоков в колонне с контактным устройством.

Также были выделены возможные направления будущих исследований, целями которых в общей сложности являются: приближение физической модели барботажной колонны к ее промышленному исполнению, определение коэффициентов масштабного перехода, оценка влияния конфигурации устройства и количества блоков на структуру потоков в барботажной колонне; а также поиск максимально достижимого количества ячеек идеального перемешивания подбираемой ячеечной модели.

В дополнение были представлены примеры использования результатов настоящих и последующих исследований в промышленной практике.

В подразделе, связанном с безопасностью проведения исследований, были предусмотрены следующие мероприятия для обеспечения оптимальных условий труда и безопасности при работе на лабораторной установке:

- предусмотрена вентиляция с кратностью воздухообмена $K = 2 \text{ ч}^{-1}$;

- определена категория работ в лабораторном помещении (Iб) и указаны оптимальные и допустимые параметры микроклимата;

- для снижения вредного воздействия шума и вибрации на работающих предусмотрены средства индивидуальной защиты в виде противοшумных наушников и берушей, а также виброизолирующие изделия типа 2 в виде упругих опор для оборудования и гибких вставок для трубопроводов;

- рассчитаны рабочее и эвакуационное виды искусственного освещения, для лаборатории принято 8 светильников с люминесцентными лампами ЛБ40;

- описаны организационные и технические средства для обеспечения пожарной и электрической безопасности лабораторного помещения;

- указаны общие правила безопасности при работе в научно-исследовательской лаборатории.

В разделе, связанном с организацией и экономикой научных исследований, был построен сетевой график работ с учетом проектирования, монтажа и проведения исследований на лабораторной установке. Расчет вероятности свершения конечного события по данному проекту показал, что

комплекс всех должен уложиться в установленный срок (3 календарных месяца). Также в данном разделе было просчитано, общая сумма затрат, связанных с лабораторным стендом и научными исследованиями, составляет 344065 рублей.

Таким образом, делаем вывод, что сформулированная цель настоящей работы достигнута, а все поставленные задачи выполнены в полном объеме. В заключение отметим, что исследование контактного теплообменного устройства на данной работе не заканчивается и имеет дальнейшие перспективы. Результаты будущих исследований контактного устройства позволят в полной мере судить о справедливости теоретических доводов в плане его достоинств. Если теоретические доводы будут достоверны, то барботажные аппараты с контактными устройствами значительно повысят эффективность протекания технологических процессов в системах «газ – жидкость», что будет являться большим шагом в развитии науки и производства.

					ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		92

СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пат. 2425089 Российская федерация, мпк С 10 G 2/00, С 10 G 47/00. Система синтеза жидкого топлива / Ониси Ясухиро, Вакамура Осаму, Фудзимото Кенитиро; заявитель и патентообладатель Ниппон Стил инжиниринг КО., ЛТД. – №2008141287/04; заявл. 29.03.2007; опубл. 27.07.2011, Бюл. № 21.

2. Гарабаджиу А.В. Технология комплексной переработки нефтешламов и кислых гудронов / А.В. Гарабаджиу, А.М. Сыроежко, О.М. Флисюк и др. // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2017. – № 39. – С. 69 – 79.

3. Пат. 2363514 Российская федерация, мпк В 01 D 19/00, С 02 F 1/20. Десорбер очистки нефти от вредных газов / Зимин Б.А., Маликов Н.Г.; заявитель и патентообладатель Зимин Б.А., Маликов Н.Г. – №2007143389/15; заявл. 26.11.2007; опубл. 10.08.2009, Бюл. № 22.

4. Пат. 2398735 Российская федерация, мпк С 01 В 17/05, В 01 D 53/52. Способ очистки газовых потоков от сероводорода / Тарханова И.Г., Смирнов В.В., Тюрин А.А. – №2009120383/05; заявл. 29.05.2009; опубл. 10.09.2010, Бюл. № 25.

5. Пат. 122088 Российская федерация, мпк С 02 F 11/04. Анаэробный биореактор / Куликов Н.И., Зубов М.Г., Ножевникова А.Н. и др.; заявитель и патентообладатель ЗАО «Компания "ЭКОС"». – №2012119750/05; заявл. 14.05.2012; опубл. 20.11.2012, Бюл. № 32.

6. Кущев Л.А. Физико-химические и технологические основы процесса получения биогаза в биореакторах с барботажным перемешиванием субстрата / Л.А. Кущев, Д.Ю. Суслов // Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого российским фондом фундаментальных исследований и правительством белгородской области. – Белгород, 2015. – С. 205 – 217.

7. Суслов Д.Ю. Разработка высокоэффективной технологии утилизации органических отходов в барботажных биореакторах / Д.Ю. Суслов // Молодежь и научно-технический прогресс: Сборник докладов VII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Старый Оскол, 2014. – С. 385 – 387.

8. Титова М.В. Выращивание суспензионной культуры клеток *Stephania Glabra* (Roxb.) Miers в различных системах: особенности роста и накопления алкалоида стефарина / М.В. Титова, О.В. Решетняк, Е.А. Осипова и др. // Биотехнология. – 2011. – № 4. – С. 40 – 46.

9. Титова М.В. Оптимизация выращивания суспензионных культур клеток *Dioscorea Deltoidea* Wall и *Polyscias Filicifolia* Bailey в полупроточном режиме в биореактрах различного объема / М.В. Титова, Н.А. Шумило, И.Е. Куличенко и др. // Сборник научных трудов государственного Никитского ботанического сада. – 2009. – Т. 131. – С. 68 – 73.

					ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		93

10. Тимонин А.С. Машины и аппараты химических производств: учебник для вузов / А.С. Тимонин, Б.Г. Балдин, В.Я. Борщев, Ю.И. Гусев и др. / под общей редакцией А.С. Тимониной. – Калуга: Ноосфера, 2014. – 856 с.

11. Васильев П.Д. Тенденции развития барботажных аппаратов со встроенными теплообменными элементами / П.Д. Васильев, А.В. Степыкин, А.А. Сидягин, С.Р. Рузанов // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. – Бийск, 2019. – С. 16 – 19.

12. Пат. 2388743 Российская федерация, мпк С 07 С 51/265. Оптимизированное жидкофазное окисление / Уандерз А.Д., Де Вредэ М., Партин Л.Р. и др.; заявитель и патентообладатель Истман Кемикал Компани – №2007111905/02; заявл. 29.08.2005; опубл. 10.05.2010, Бюл. № 13.

13. Пат. 2240861 Российская федерация, мпк В 01 J 19/00. Реактор прямого хлорирования этилена / Маталинова Э.Г., Дмитриев Ю.К., Ермилов Ю.А. и др.; заявитель и патентообладатель ЗАО «Каустик». – №2003125103/15; заявл. 13.08.2003; опубл. 27.11.2004, Бюл. № 33.

14. Пат. 91888 Российская федерация, мпк В 01 D 53/18. Абсорбер барботажный для очистки газов / Селиванов Е.Н., Кляйн С.Э., Воронов В.В.; заявитель и патентообладатель Учреждение Российской академии наук Институт металлургии Уральского отделения РАН (ИМЕТ УрО РАН). – №2009144068/22; заявл. 27.11.2009; опубл. 10.03.2010.

15. Тур А.А. Барботажный аппарат газоочистки для биотехнологических производств / А.А. Тур, И.И. Киселева, Л.А. Тур // Экология и промышленность России. – 2008. – № 8. – С. 10 – 12.

16. Пат. 2586534 Российская Федерация, мпк С 12 М 1/04, С 12 N 1/12, С 12 N 1/20. Аппарат для культивирования автотрофных микроорганизмов / Шевцов А.А., Дранников А.В., Шабунина Е.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (ФГБОУ ВО «ВГУИТ»). – №2014153346/10; заявл. 29.12.2014; опубл. 10.06.2016.

17. Пат. 2268086 Российская Федерация, мпк В 01 J 10/00, В 01 J 19/24. Противоточный секционированный газлифтный реактор для газожидкостных процессов / Назимок В.Ф., Федяев В.И., Назимок Е.Н., Тарханов Г.А.; заявитель и патентообладатель ООО «Научно-исследовательский центр "ВНИПИМ-ТОС"». – № 2003110932/15; заявл. 17.04.2003; опубл. 20.01.2006, Бюл. № 2.

18. Пат. 141498 Российская Федерация, мпк В 01 D 3/28. Теплообменное устройство / Степыкин А.В., Сидягин А.А.; заявитель и патентообладатель НГТУ им. Р.Е. Алексева. – № 2013154833/05; заявл. 10.12.2013; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16.

19. Кафаров В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств: Учеб. пособие для вузов / В.В. Кафаров, М.Б. Глебов. – М.: Высш. шк., 1991. – 400 с.: ил.

											Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата							94

20. Гельперин Н.И. Структура потоков и эффективность колонных аппаратов в химической промышленности / Н.И. Гельперин, В.Л. Пебалк, А.Е. Костанян. – М.: Химия, 1977. – 264 с.

21. Кононюк А. Е. Обобщенная теория моделирования. Начала. К.1. Ч.1. – Киев: Освіта України, 2012. – 602 с.

22. Лаптев А.Г. Основы расчета и модернизации тепломассообменных установок в нефтехимии: монография / А.Г. Лаптев, М.И. Фарахов, Н.Г. Минеев. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010. – 574 с.

23. Рубинштейн Ю.Б. Пенная сепарация и колонная флотация / Ю.Б. Рубинштейн, В.И. Мелик-Гайказян, Н.В. Матвеев, С.Б. Леонов. – М.: Недра, 1989. – 304 с.: ил.

24. СП 118.13330.2012. Общественные здания и сооружения. – М.: Минстрой России, 2014. – 76 с.

25. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2019. – 17 с.

26. СП 60.13330.2016. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. – М.: Стандартинформ, 2017. – 66 с.

27. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях (Переиздание с поправкой). – М.: Стандартинформ, 2019. – 16 с.

28. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. – 20 с.

29. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. – 21 с.

30. ГОСТ 12.1.012-2004. Система стандартов безопасности труда. Вибрационная безопасность. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2010. – 20 с.

31. СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. Санитарные нормы. – М.: Информационно-издательский центр, 1997. – 18 с.

32. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* (с Изменением N 1). – М.: Стандартинформ, 2019. – 122 с.

33. СП 23-102-2003. Естественное освещение жилых и общественных зданий. – М.: ФГУП ЦПП, 2005. – 88 с.

34. Кнорринг Г.М. Справочная книга для проектирования электрического освещения / Г.М. Кнорринг, И.М. Фадин, В.Н. Сидоров – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отд-ние, 1992. – 448 с.: ил.

35. Правила устройства электроустановок. – 7-е издание (по состоянию на 01.03.2007 г.). – М.: Издательство НИЦ ЭНАС, 2007. – 504 с.

										Лист
										95
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ

36. СО 153-34.21.122-2003. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. – М.: ОАО "НТЦ "Промышленная безопасность", 2006. – 59 с.

37. НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной опасности. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2003. – 48 с.

38. Загидуллин С.Х. Изучение газосодержания и перепада давления в секционированной барботажной колонне непрерывного действия / С.Х. Загидуллин, А.А. Абишев, В.Л. Долганов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13. – № 4. – С. 1160 – 1163.

39. Степыкин А.В. Массообменные характеристики регулярной насадки с внедренными теплообменными модулями / А.В. Степыкин, А.А. Сидягин, В.М. Ульянов // Вестник ТГТУ. – 2015. – Том 21. – № 3. – С. 445 – 452.

40. Хаммер М. Технология обработки природных и сточных вод: Пер. с англ.- М.: Стройиздат, 1979. – 400 с.: ил.

41. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: Учебное пособие для вузов / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков; под ред. чл.-корр. АН России П.Г. Романкова. – М.: ООО ИД «Альянс», 2007. – 567 с.

42. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. – М.: ООО ТИД «Альянс», 2005. – 753 с.

43. Рамм В.М. Абсорбция газов. – Изд. 2-е, переработ. и доп. – М.: Химия, 1976. – 655 с.

44. Соколов В.Н. Газожидкостные реакторы / В.Н. Соколов, И.В. Доманский. – Л., Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1976. – 216 с.

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

46. Соколов В.Н. Машины и аппараты химических производств. Примеры и задачи: учеб. пособие для вузов / И.В. Доманский, В.П. Исаков, Г.М. Островский и др.; под общ. ред. В.Н. Соколова. – Л.: Машиностроение, 1982. – 384 с.

47. ГОСТ 10667-90. Стекло органическое листовое. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 35 с.

48. ГОСТ 10587-84. Смолы эпоксидно-диановые неотвержденные. Технические условия (с Изменением N 1, с Поправкой). – М.: Издательство стандартов, 1989. – 20 с.

49. Химекс Лимитед. Эпоксидно-диановые смолы [Электронный ресурс] // Режим доступа: www.chimexltd.com.

50. ГОСТ 34233.2-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек. – М.: Стандартиформ, 2018. – 58 с.

											Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ						96

51. ГОСТ 34233.1-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. – М.: Стандартиформ, 2019. – 36 с.

52. ГОСТ 8732-78. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент (с Изменениями N 1, 2). – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 11 с.

53. Чугаев Р.Р. Гидравлика: Учебник для вузов. – 4-е изд., доп. и перераб. – Л.: Энергоиздат (Ленингр. отд-ние), 1982. – 672 с.: ил.

54. Каталог насосов компании АО «ГМС Ливгидромаш». Режим доступа: <http://www.hms-livgidromash.ru>.

55. Каталог компрессоров компании «Remeza». Режим доступа: <https://www.remeza.org>.

56. ГОСТ 9931-85. Корпуса цилиндрические стальных сварных сосудов и аппаратов. Типы, основные параметры и размеры. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 23 с.

57. Шах А.Д. Организация, планирование и управление предприятием химической промышленности / А.Д. Шах, С.З. Погостин, П.А. Альман. / Под ред. Н.П. Федоренко. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1981. – 432 с.: ил.

					ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		97

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
				<u>Документация</u>		
A1			BP-НГТУ-М19ТО-000-21 СБ	Колонна лабораторная. Сборочный чертеж	4	
A2			BP-НГТУ-М19ТО-001-21 ТЗ	Стенд лабораторный. Технологическая схема	1	
A1			BP-НГТУ-М19ТО-002-21 ОЭП	Организационно- экономические показатели проекта	1	
A2			BP-НГТУ-М19ТО-003-21 СБ	Блок теплообменный. Сборочный чертеж	1	
A2			BP-НГТУ-М19ТО-004-21 СБ	Большой теплообменный модуль. Сборочный чертеж	1	
A2			BP-НГТУ-М19ТО-005-21 СБ	Малый теплообменный модуль. Сборочный чертеж	1	
A2			BP-НГТУ-М19ТО-006-21	Насадка гофрированная	1	
A1			BP-НГТУ-М19ТО-007-21	Результаты исследований	3	
BP-НГТУ-М19ТО-000-21						
Изм. Лист			№ докум.	Подп.	Дата	
Разраб.			Васильев П.Д.			
Проб.			Сидягин А.А.			
Н.контр.			Балахнин И.А.			
Утв.			Диков В.А.			
Опись чертежей					Лит.	Лист
						Листов
						1
					ДПИ НГТУ М19-ТМО	
Копировал					Формат А4	

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание																																			
<i>Документация</i>																																									
A1			ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 СБ	Сборочный чертеж																																					
<i>Сборочные единицы</i>																																									
A2	1		ВР-НГТУ-М19ТО-003-21 СБ	Блок теплообменник	2																																				
Б4	2			Царга	5	H=300мм																																			
Б4	3			Барботер	1																																				
Б4	4			Решетка	2																																				
<i>Детали</i>																																									
Б4	5			Днище	1																																				
Б4	6			Кольцо	1																																				
Б4	7			Уголок	8																																				
Б4	8			Карман секторный	1																																				
Б4	9			Патрубок внешний	2	Dy=15мм																																			
Б4	10			Патрубок внутренний	2	Dy=10мм																																			
Б4	11			Штуцер	1	Dy=25мм																																			
Б4	12			Штуцер	5	Dy=20мм																																			
Б4	13			Сгон	1	Dy=20мм																																			
Б4	14			Сгон	5	Dy=15мм																																			
Б4	15			Прокладка	5	Dв=200мм																																			
Б4	16			Прокладка	4	Dв=20мм																																			
Б4	17			Прокладка	4	Dв=3мм																																			
ВР-НГТУ-М19ТО-000-21																																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%;">Изм.</td> <td style="width: 10%;">Лист</td> <td style="width: 15%;">№ докум.</td> <td style="width: 10%;">Подп.</td> <td style="width: 10%;">Дата</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Разраб.</td> <td></td> <td>Васильев П.Д.</td> <td></td> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Проб.</td> <td></td> <td>Сидягин А.А.</td> <td></td> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Н.контр.</td> <td></td> <td>Балахнин И.А.</td> <td></td> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Утв.</td> <td></td> <td>Диков В.А.</td> <td></td> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> </table>							Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			Разраб.		Васильев П.Д.					Проб.		Сидягин А.А.					Н.контр.		Балахнин И.А.					Утв.		Диков В.А.				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата																																					
Разраб.		Васильев П.Д.																																							
Проб.		Сидягин А.А.																																							
Н.контр.		Балахнин И.А.																																							
Утв.		Диков В.А.																																							
Колонна лабораторная					Лит.	Лист	Листов																																		
					1	2																																			
ДПИ НГТУ																																									
М19-ТМО																																									

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание	
<i>Документация</i>							
A2			ВР-НГТУ-М19ТО-003-21 СБ	Сборочный чертеж			
<i>Сборочные единицы</i>							
A2	1		ВР-НГТУ-М19ТО-004-21 СБ	Большой теплообменный модуль	2	L=180мм	
A2	2		ВР-НГТУ-М19ТО-005-21 СБ	Малый теплообменный модуль	2	L=140мм	
<i>Детали</i>							
A2	4		ВР-НГТУ-М19ТО-006-21	Насадка гофрированная	1	L=190мм	
Б4	4			Насадка гофрированная	2	L=175мм	
Б4	5			Насадка гофрированная	2	L=120мм	
Б4	6			Насадка гофрированная	2	L=65мм	
Б4	7			Хомут стяжной	2		
<i>Стандартные изделия</i>							
	8			Рукав ВГ (III)-6,3-20-27-У ТУ 38-1051731-86	5		
	9			Хомут 1/1 20-32-6 ГОСТ 28191-89	8		
ВР-НГТУ-М19ТО-003-21							
Изм. Лист		№ докум.		Подп.		Дата	
Разраб.		Васильев П.Д.					
Проб.		Сидягин А.А.					
Н.контр.		Балахнин И.А.					
Утв.		Диков В.А.					
Блок теплообменник				Лит.			Лист
				1			
ДПИ НГТУ М19-ТМО							

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание	Перв. примен.		Справ. №		Подп. и дата		Инв. № дубл.		Взам. инв. №		Подп. и дата		Инв. № подл.					
				<u>Документация</u>																				
A2			ВР-НГТУ-М19Т0-004-21 СБ	Сборочный чертеж																				
				<u>Детали</u>																				
Б4		1		Короб	2																			
Б4		2		Патрубок	2																			
			ВР-НГТУ-М19Т0-004-21																					
			Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Большой теплообменный модуль				Лит.	Лист	Листов										
			Разраб.		Васильев П.Д.													1						
			Проб.		Сидягин А.А.																			
			Н.контр.		Балахнин И.А.												ДПИ НГТУ М19-ТМО							
			Утв.		Диков В.А.																			
Копировал																							Формат А4	

ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Кривые отклика пустотелой колонны

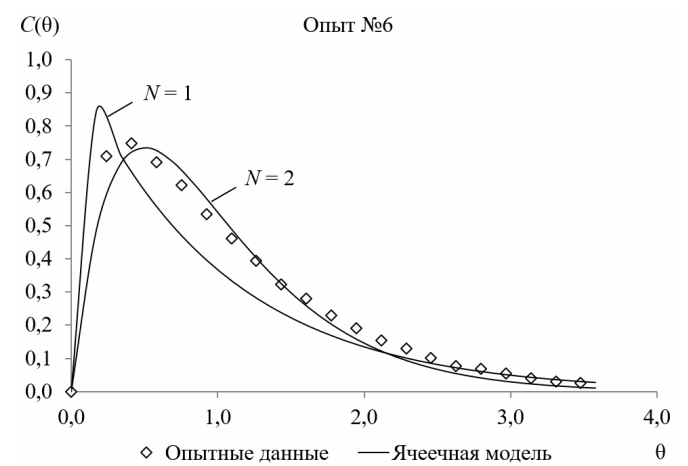
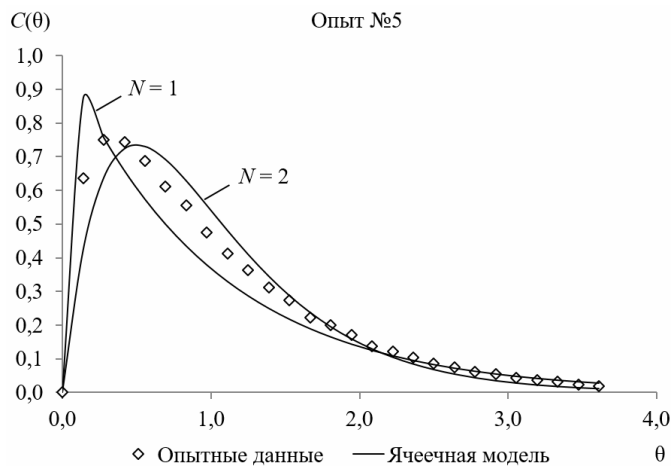
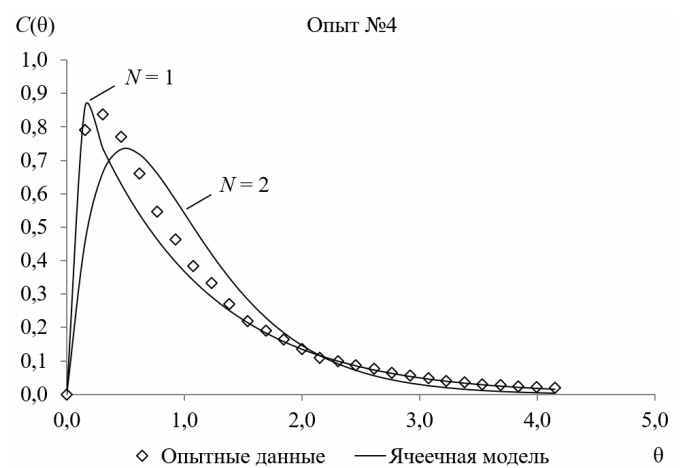
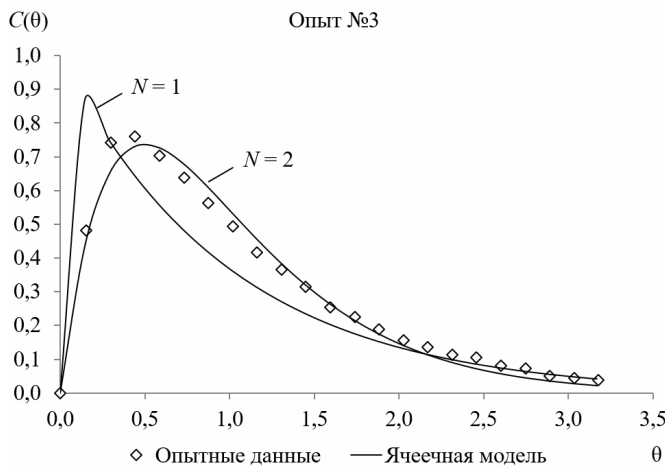
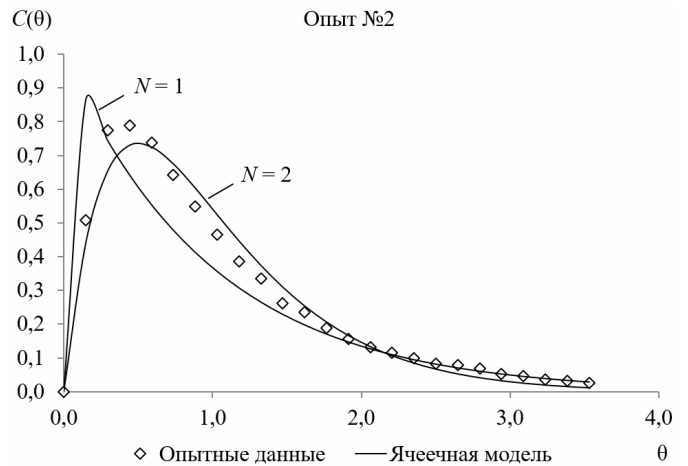
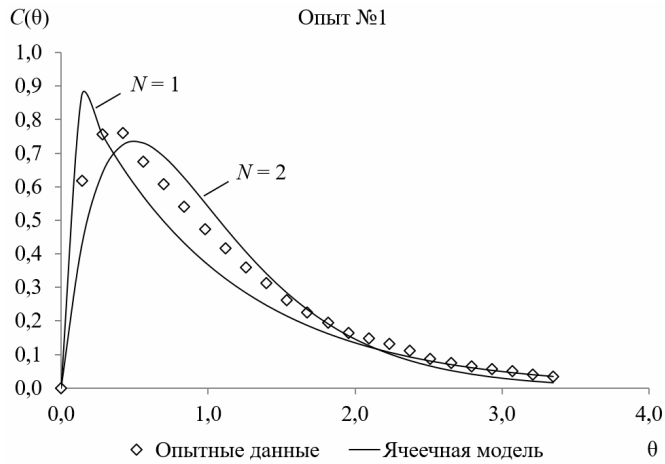


Рисунок Е.1 - Кривые отклика пустотелой барботажной колонны на импульсные возмущения

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Кривые отклика колонны с контактным устройством

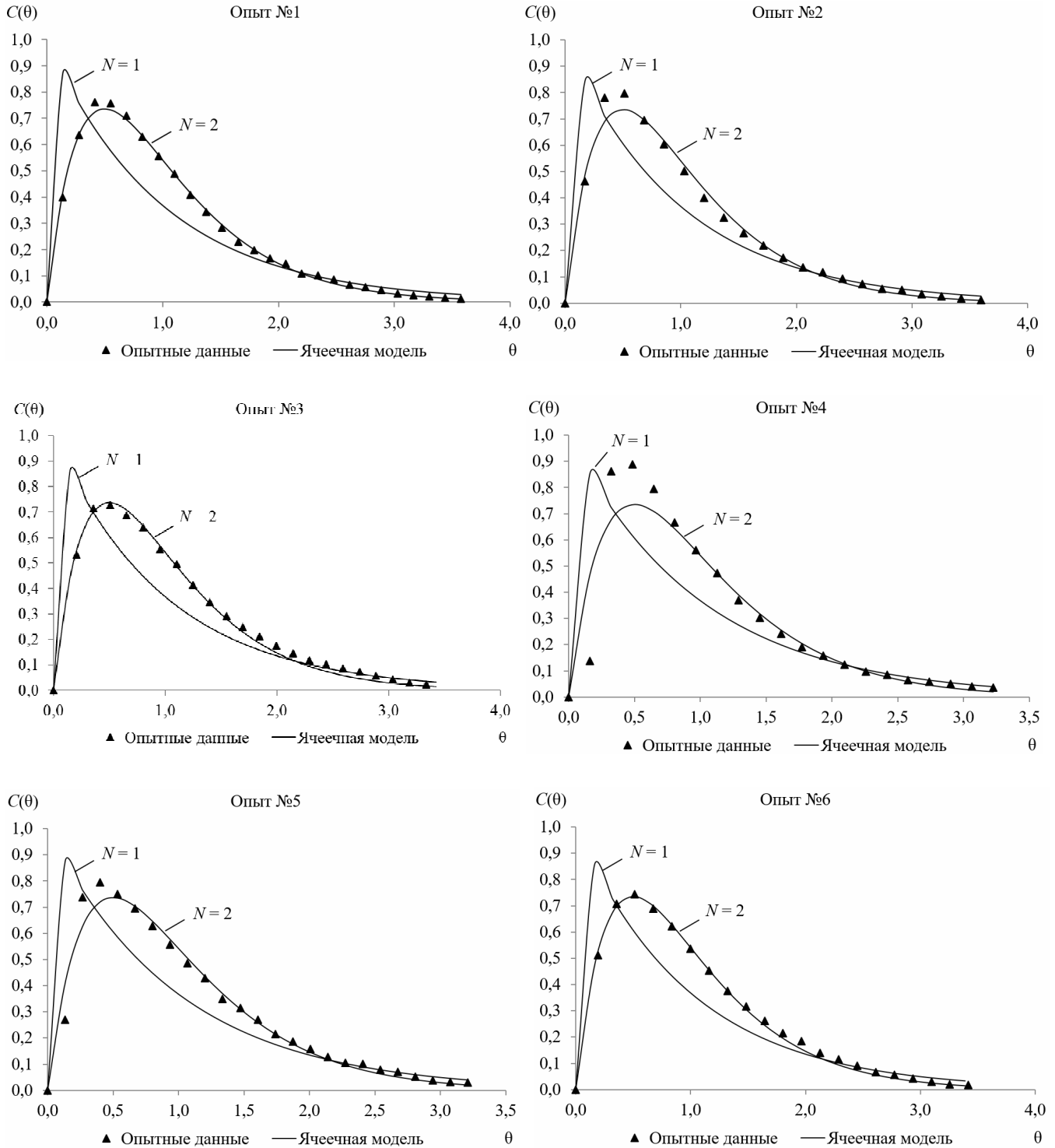


Рисунок Ж.1 - Кривые отклика барботажной колонны с одним блоком контактного устройства на импульсные возмущения

ПРИЛОЖЕНИЕ II. Кадры экспериментов



а



б

Рисунок И.1 - Структура газожидкостного потока в барботажной колонне при расходном газосодержании $\beta = 50\%$ и фиктивной скорости жидкости $w_{ж} = 0,012$ м/с:

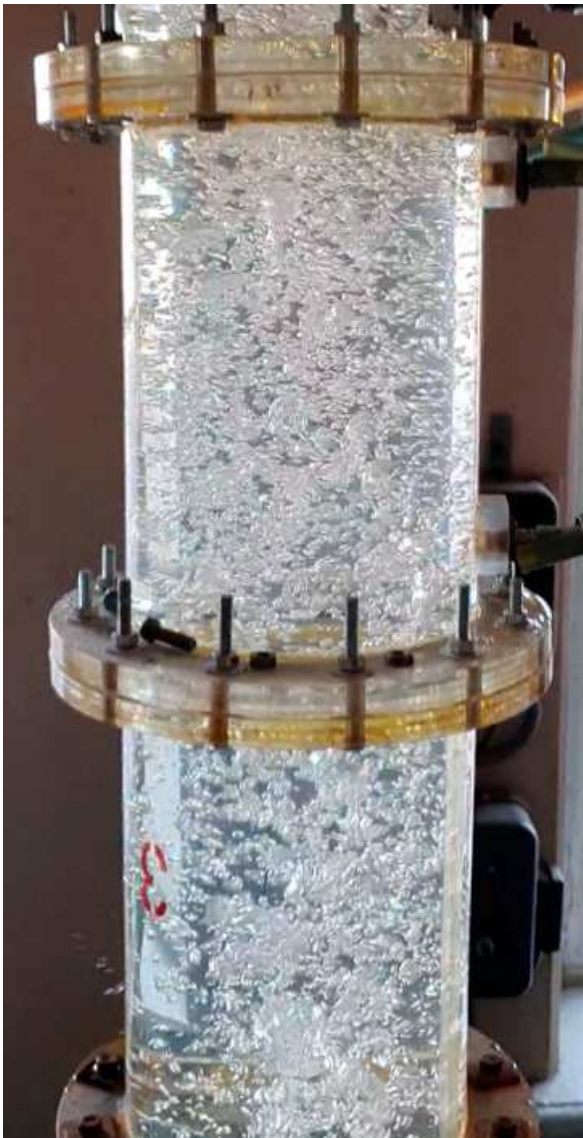
а – пустотелая колонна; б – колонна с контактнм устройством

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ

Лист

106



а



б

Рисунок И.2 - Структура газожидкостного потока в барботажной колонне при расходе газосодержания $\beta = 60\%$ и фиктивной скорости жидкости $w_{ж} = 0,012$ м/с:

а – пустотелая колонна; б – колонна с контактнм устройством

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВР-НГТУ-М19ТО-000-21 ПЗ

Лист

107

Приложение К. Отчет из программы ПАССАТ

Прочностной расчет лабораторной барботажной колонны с контактными
теплообменными устройствами

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Изн. № подл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Изн. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Дзержинск
2021 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1	Общие положения	2
2	Исходные данные для расчета	3
3	Сводные таблицы	4
4	Штуцер №1	6
5	Фланцевое соединение №2.....	9
6	Штуцер №5.....	15
7	Список литературы.....	19

Изн. № дубл.		Взам. инв. №		Подпись и дата						
Изн. № подл.	Подпись и дата	Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ ЛАБОРАТОРНОЙ БАРБОТАЖНОЙ КОЛОННЫ Расчётно-пояснительная записка	Лит.	Лист	Листов
									1	19
								ДПИ НГТУ М19-МТО		

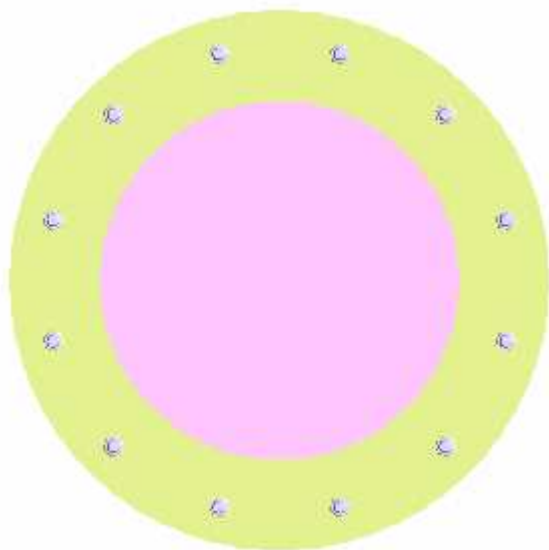
1 Общие положения

Расчет на прочность выполнен на ЭВМ по программе «Пассат 3.01», разработанной ООО НТП «Трубопровод».

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Изм. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Изм. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	Лист 2

2 Исходные данные для расчета

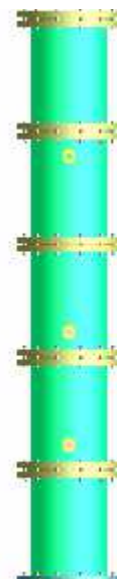
Общий вид аппарата



Вид сверху



Вид спереди



Вид слева



Изометрический вид

Дата и время расчета: 08.06.2021 16:19

Изн. № подл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Изн. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата
------	------	-------------	---------	------

3 Сводные таблицы

3.1 Основные элементы

Исходные данные

Элемент	Материал	Диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Длина (высота), мм	Суммарная прибавка, мм	Коэфф. прочности сварного шва
Крышка плоская №1	12X18Н10Т	200	6	18	1	1
Обечайка цилиндрическая №2	СО-95-К	200	10	300	0	1
Обечайка цилиндрическая №1	СО-95-К	200	10	300	0	1
Обечайка цилиндрическая №3	СО-95-К	200	10	300	0	1
Обечайка цилиндрическая №4	СО-95-К	200	10	300	0	1
Обечайка цилиндрическая №5	СО-95-К	200	10	300	0	1

Результаты расчета

Условия испытаний

Элемент	Расчетное давление, МПа	Допускаемые напряжения, МПа	Расчетная толщина с уч. прибавок, мм	Допускаемое давление, МПа	Условие прочности
Крышка плоская №1	0.016049	227.27	4.2274	0.038520	выполнено
Обечайка цилиндрическая №2	0.015936	36.364	0.043835	3.4632	выполнено
Обечайка цилиндрическая №1	0.012769	36.364	0.035120	3.4632	выполнено
Обечайка цилиндрическая №3	0.0096011	36.364	0.026406	3.4632	выполнено
Обечайка цилиндрическая №4	0.0064334	36.364	0.017693	3.4632	выполнено
Обечайка цилиндрическая №5	0.0032657	36.364	0.0089812	3.4632	выполнено

3.2 Штуцера

Исходные данные

Элемент	Метка	Тип	Материал	Диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Длина (высота), мм	Суммарная прибавка, мм
Штуцер №1		Проходящий без укрепления	12X18Н10Т	16	2	36	0
Штуцер №2		Проходящий без укрепления	12X18Н10Т	16	2	36	0
Штуцер №5		Непроходящий без укрепления	СО-95-К	20	10	20	0

Име. № дубл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	
Име. № подл.	

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	Лист
					4

Штуцер №6		Непроходящий без укрепления	СО-95-К	20	10	20	0
Штуцер №7		Непроходящий без укрепления	СО-95-К	20	10	20	0
Штуцер №8		Непроходящий без укрепления	СО-95-К	20	10	20	0
Штуцер №9		Непроходящий без укрепления	СО-95-К	25	7.5	20	0
Штуцер №10		Непроходящий без укрепления	СО-95-К	20	10	20	0

Результаты расчета

Условия испытаний

Элемент	Расчетное давление, МПа	Диаметр отв., не треб. укрепления, мм	Расчетная толщина с уч. прибавок, мм	Допускаемое давление, МПа	Условие прочности
Штуцер №1	0.016466	55.193	$0.52502 \cdot 10^{-3}$	22.173	выполнено
Штуцер №2	0.016466	55.193	$0.52502 \cdot 10^{-3}$	22.173	выполнено
Штуцер №5	0.012278	200	0.0033771	2.355	выполнено
Штуцер №6	0.012278	200	0.0033771	2.355	выполнено
Штуцер №7	0.0091107	200	0.0025058	2.355	выполнено
Штуцер №8	0.0091107	200	0.0025058	2.355	выполнено
Штуцер №9	0.0059676	200	0.0020515	2.355	выполнено
Штуцер №10	0.0041778	200	0.0011490	2.355	выполнено

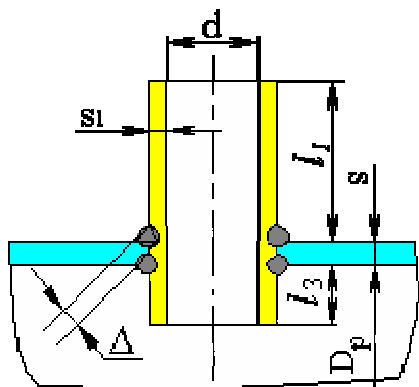
Име. № подл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Име. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	Лист
					5

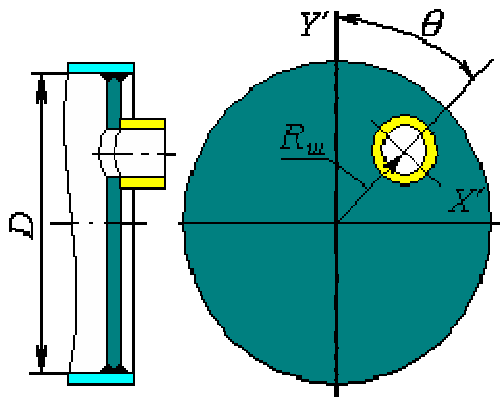
4 Штуцер №1

4.1 Исходные данные

Элемент: Штуцер №1
 Условное обозначение (метка):
 Элемент, несущий штуцер: Крышка плоская №1
 Тип элемента, несущего штуцер: Крышка плоская
 Тип штуцера: Проходящий без укрепления



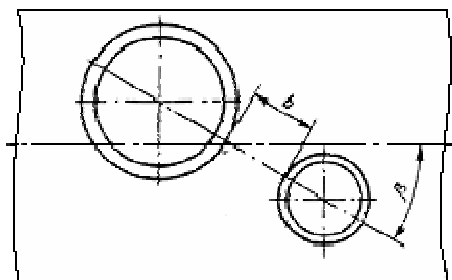
Материал несущего элемента: Ст3
 Толщина стенки несущего элемента, s : 6 мм
 Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c : 1 мм
 Материал штуцера: 12X18H10T
 Внутренний диаметр штуцера, d : 16 мм
 Толщина стенки штуцера, s_1 : 2 мм
 Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s : 0 мм
 Длина штуцера, l_1 : 36 мм



Смещение штуцера, $R_{шт}$: 30 мм
 Угол поворота штуцера, ϑ : 0°
 Длина внутр. части штуцера, l_3 : 36 мм
 Прибавка на коррозию, c_{s1} : 0 мм
 Минимальный размер сварного шва, Δ : 3 мм
 Расчётные параметры размещения штуцера:
 Ближайший штуцер

Изн. № подл.	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата



Название штуцера: Штуцер №2
 Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 40 мм
 Угол β : 90 °

4.2 Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 20 °C
 Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0.0060643 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ 34233.3-2017

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Температура фланца (кольца), t_f : 20 °C
 Допускаемые напряжения для материала Ст3 при температуре 20 °C (рабочие условия):
 $[\sigma]^{20} = 154$ МПа
 Модуль продольной упругости при температуре 20 °C :
 $E = 1.99 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 12X18H10T при температуре 20 °C (рабочие условия):
 $[\sigma]^{20}_1 = 184$ МПа
 Модуль продольной упругости при температуре 20 °C :
 $E_1 = 2 \cdot 10^5$ МПа
 Допускаемое давление для патрубка штуцера :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \Phi_1 \cdot (s_1 - c_f)}{d + s_1 + c_f} = \frac{2 \cdot 184 \cdot 1 \cdot (2 - 0)}{16 + 2 + 0} = 40.889 \text{ МПа}$$

40.889 МПа \geq 0.0060643 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

4.3 Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, T: 20 °C
 Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0.016466 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ 34233.3-2017

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Температура фланца (кольца), t_f : 20 °C
 Допускаемые напряжения для материала Ст3 при температуре 20 °C (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20} = \frac{R_{eH} / 20}{n_T} = 250 / 1.1 = 227.27 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C :
 $E = 1.99 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 12X18H10T при температуре 20 °C (условия гидроиспытаний):

Име. № подл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Име. № дубл.
Подпись и дата	

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	Лист
					7

$$[\sigma]_{20}^{20} = \frac{R_{t, 20}}{n_T} = 276 / 1.1 = 250.91 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °С :

$$E_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера :

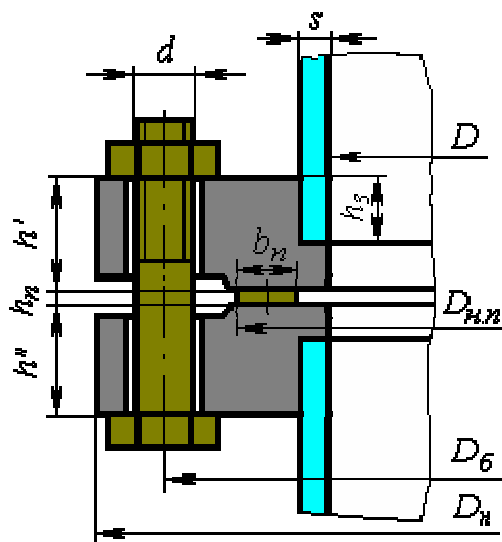
$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_2)}{d + s_1 + c_2} = 2 * 250.91 * 1 * (2 - 0) / (16 + 2 + 0) = 55.758 \text{ МПа}$$

$$55.758 \text{ МПа} \geq 0.016466 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	Лист
										8

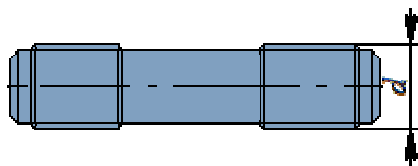
5 Фланцевое соединение №2



5.1 Исходные данные

Тип фланцев: Плоские приварные
 Исполнение: Плоские
 Диаметр болтовой окружности, D_6 : 260 мм

Шпильки:



Материал: 40
 Наружный диаметр, d : 8 мм
 Количество, n : 12
 Контроль затяжки: Без контроля затяжки

Прокладка:

Материал прокладки: Резина по ГОСТ 7338 с твёрдостью по Шору А до 65 единиц
 Толщина, $h_п$: 3 мм
 Наружный диаметр, $D_{н.п.}$: 240 мм
 Ширина, $b_п$: 20 мм

Данные первого фланца (кольца):

Материал фланца (кольца): СО-95-К
 Обечайка цилиндрическая №2
 Смежный элемент: СО-95-К
 Наружный диаметр фланца (кольца), $D_н$: 300 мм
 Толщина фланца (кольца) плоского или с выступом, h : 20 мм
 Толщина стенки смежного элемента: 10 мм
 Сумма прибавок, s (задаётся в смежном элементе): 0 мм

Данные второго фланца (кольца):

Материал фланца (кольца): СО-95-К
 Обечайка цилиндрическая №1
 Смежный элемент: СО-95-К
 Наружный диаметр фланца (кольца), $D_н$: 300 мм

Име. № подл.	Взам. инв. №	Име. № дубл.	Подпись и дата

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

Толщина фланца (кольца) плоского или с выступом, h: 20 мм
 Толщина стенки смежного элемента: 10 мм
 Сумма прибавок, с (задаётся в смежном элементе): 0 мм

5.2 Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 574.51 Н
 Расчётный изгибающий момент, M: 0.0043239 Н·м
 Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0.0043258 МПа

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.4-2017

Температура фланца (кольца), t_f : 20 °С
 Температура фланца (кольца), t_f : 20 °С
 Температура болтов (шпилек), t_b : 20 °С

Свойства материала болтов (шпилек)

Допускаемые напряжения для материала 40 при температуре 20 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_{\sigma}^{20} = [\sigma]_{\sigma} = 130 = 130 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 40 при температуре T = 20 °С :

$$E_{\sigma}^{20} = 2.13 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 40 при температуре T = 20 °С :

$$\alpha_{\sigma}^{20} = 0.113 \cdot 10^{-4} 1/^{\circ}\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 40 при температуре 20 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_{\sigma}^{20} = [\sigma]_{\sigma} = 130 = 130 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 40 при температуре T = 20 °С :

$$E_{\sigma}^{20} = 2.13 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемые напряжения для материала СО-95-К при температуре 20 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_{\sigma 1}^{20} = \min \left(\frac{R_{eHt}}{n_T}; \frac{R_{mHt}}{n_B}; \frac{R_m / 10^5 Ht}{n_H} \right) = \min\{40 / 1.5; 50 / 2.4; 50 / 1.5\} = 20.833 \text{ МПа}$$

Допускаемые напряжения для материала СО-95-К при температуре 20 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_{\sigma 1}^{20} = \min \left(\frac{R_{eHt}}{n_T}; \frac{R_{mHt}}{n_B}; \frac{R_m / 10^5 Ht}{n_H} \right) = \min\{40 / 1.5; 50 / 2.4; 50 / 1.5\} = 20.833 \text{ МПа}$$

Допускаемые напряжения для материала СО-95-К при температуре 20 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_{\sigma 2}^{20} = \min \left(\frac{R_{eHt}}{n_T}; \frac{R_{mHt}}{n_B}; \frac{R_m / 10^5 Ht}{n_H} \right) = \min\{40 / 1.5; 50 / 2.4; 50 / 1.5\} = 20.833 \text{ МПа}$$

Допускаемые напряжения для материала СО-95-К при температуре 20 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_{\sigma 2}^{20} = \min \left(\frac{R_{eHt}}{n_T}; \frac{R_{mHt}}{n_B}; \frac{R_m / 10^5 Ht}{n_H} \right) = \min\{40 / 1.5; 50 / 2.4; 50 / 1.5\} = 20.833 \text{ МПа}$$

Свойства материала фланца (кольца) 1

Допускаемые напряжения для материала СО-95-К при температуре 20 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_{\sigma 1}^{20} = \min \left(\frac{R_{eHt}}{n_T}; \frac{R_{mHt}}{n_B}; \frac{R_m / 10^5 Ht}{n_H} \right) = \min\{40 / 1.5; 50 / 2.4; 50 / 1.5\} = 20.833 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала СО-95-К при температуре T = 20 °С :

$$E_{\sigma 1}^{20} = 2.9 \cdot 10^6 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала СО-95-К при температуре T = 20 °С :

$$\alpha_{\sigma 1}^{20} = 11 / ^{\circ}\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала СО-95-К при температуре 20 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_{\sigma 1}^{20} = \min \left(\frac{R_{eHt}}{n_T}; \frac{R_{mHt}}{n_B}; \frac{R_m / 10^5 Ht}{n_H} \right) = \min\{40 / 1.5; 50 / 2.4; 50 / 1.5\} = 20.833 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала СО-95-К при температуре T = 20 °С :

$$E_{\sigma 1}^{20} = 2.9 \cdot 10^6 \text{ МПа}$$

Свойства материала фланца (кольца) 2

Допускаемые напряжения для материала СО-95-К при температуре 20 °С (рабочие условия):

Подпись и дата	
Име. № дубл.	
Взам. инв. №	
Подпись и дата	
Име. № подл.	

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	Лист
					10

$$[\sigma]_{\Omega}^{20} = \min \left(\frac{R_{eHt}}{n_T}; \frac{R_{mHt}}{n_z}; \frac{R_{mHt}}{n_{\pi}} \right) = \min\{40/1.5; 50/2.4; 50/1.5\} = 20.833 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала СО-95-К при температуре $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_2^{20} = 2.9 \cdot 10^6 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала СО-95-К при температуре $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\alpha_2^{20} = 11/^{\circ}\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала СО-95-К при температуре $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (рабочие условия):

$$[\sigma]_{\Omega}^{20} = \min \left(\frac{R_{eHt}}{n_T}; \frac{R_{mHt}}{n_z}; \frac{R_{mHt}}{n_{\pi}} \right) = \min\{40/1.5; 50/2.4; 50/1.5\} = 20.833 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала СО-95-К при температуре $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_2^{20} = 2.9 \cdot 10^6 \text{ МПа}$$

Расчёт без учета стесненности температурных деформаций

Расчёт болтов(шпилек):

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке :

$$[\sigma]_6^M = \xi \cdot K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_6^{20} = 1.2 * 1 * 1 * 1 * 130 = 156 \text{ МПа}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} \leq [\sigma]_6^M$$

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} = 20467 / 0.3936 \cdot 10^{-3} = 52 \text{ МПа}$$

52 МПа \leq 156 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:

$$[\sigma]_6^P = K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_6 = 1 * 1 * 1 * 130 = 130 \text{ МПа}$$

Условие прочности в рабочих условиях:

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} \leq [\sigma]_6^P$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} = 20555 / 0.3936 \cdot 10^{-3} = 52.223 \text{ МПа}$$

52.223 МПа \leq 130 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Расчёт прокладки:

Условие прочности мягких прокладок:

$$q = \frac{\max\{P_6^M; P_6^P\}}{\pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_{\text{пр}}} \leq [q]$$

$$q = \frac{\max\{P_6^M; P_6^P\}}{\pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_{\text{пр}}} = \max\{20467; 20555\} / (3.1416 * 223.01 * 20) = 1.467 \text{ МПа}$$

$[q] = 18 \text{ МПа}$

Условие работоспособности выполнено.

Расчёт первого фланца:

Условие статической прочности при затяжке в сечении S_0 :

$$\max\{|\sigma_0^M + \sigma_R^M|; |\sigma_0^M + \sigma_T^M|\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_0^{20}$$

$$\max\{|\sigma_0^M + \sigma_R^M|; |\sigma_0^M + \sigma_T^M|\} = \max\{18.864 + 7.2686; |18.864 + 4.7918|\} = 26.133 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_0^{20} = 1.0333 * 1 * 31.25 = 32.292 \text{ МПа}$$

26.133 МПа \leq 32.292 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении S_0 :

$$\max\{|\sigma_0^P - \sigma_{\text{omm}}^P + \sigma_T^P|; |\sigma_0^P - \sigma_{\text{omm}}^P + \sigma_R^P|; |\sigma_0^P + \sigma_{\text{omm}}^P|\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_0$$

$$\max\{|\sigma_0^P - \sigma_{\text{omm}}^P + \sigma_T^P|; |\sigma_0^P - \sigma_{\text{omm}}^P + \sigma_R^P|; |\sigma_0^P + \sigma_{\text{omm}}^P|\} = \max\{19 - 0.020589 + 4.8262; |19 - 0.020589 + 7.3208|; |19 + 0.020589|\} = 26.3 \text{ МПа}$$

Име. № дубл.	Подпись и дата
Име. № подл.	
Взам. име. №	
Подпись и дата	
Име. № подл.	

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	Лист
					11

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_0 = 1.0333 \cdot 1 \cdot 31.25 = 32.292 \text{ МПа}$$

26.3 МПа ≤ 32.292 МПа, **Условие прочности выполнено.**

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P - \sigma_{0mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_0^P - \sigma_{0mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_0^P + \sigma_{0mm}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_0$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P - \sigma_{0mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_0^P - \sigma_{0mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_0^P + \sigma_{0mm}^{P-} \right| \right\} = \max \{ |19 - 0.020589 + 4.8262|; |19 - 0.020589 + 7.3208|; |19 + 0.020589| \} = 26.3 \text{ МПа}$$

26.3 МПа ≤ 32.292 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении s_0 :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_0$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max \{ |0.043258|; |(-0.066505)| \} = 0.066505 \text{ МПа}$$

0.066505 МПа ≤ 20.833 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_0^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ |7.2686|; |4.7918| \} = 7.2686 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_0^{20} = 1 \cdot 20.833 = 20.833 \text{ МПа}$$

7.2686 МПа ≤ 20.833 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_0$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max \{ |7.3208|; |4.8262| \} = 7.3208 \text{ МПа}$$

7.3208 МПа ≤ 20.833 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Жёсткость фланца:

Условие выполнения жёсткости фланцев :

$$\Theta \leq K_\Theta \cdot [\Theta] = 1 \cdot 0.74485 = 0.74485 \text{ }^\circ$$

Условие жёсткости выполнено.

Расчёт второго фланца:

Параметры первого и второго фланцев полностью совпадают, расчёт второго фланца не проводится

Жёсткость фланца:

Параметры первого и второго фланцев полностью совпадают, расчёт второго фланца не проводится

5.3 Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения:

Расчётное осевое сжимающее усилие, F:	813.31 Н
Расчётный изгибающий момент, M:	0.0014250 Н·м
Расчётное внутреннее избыточное давление, p:	0.013092 МПа

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.4-2017

Температура фланца (кольца), t_f :	20 °С
Температура фланца (кольца), t_f :	20 °С
Температура болтов (шпилек), t_b :	20 °С

Свойства материала болтов (шпилек)

Допускаемые напряжения для материала 40 при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]_{\sigma}^{20} = [\sigma]_{=130} = 130 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 40 при температуре T = 20 °С :

$$E_{\sigma}^{20} = 2.13 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 40 при температуре T = 20 °С :

$$\alpha_{\sigma}^{20} = 0.113 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала СО-95-К при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]_{\text{шп}}^{20} = \frac{R_{eH}}{n_T} = 40 / 1.1 = 36.364 \text{ МПа}$$

Допускаемые напряжения для материала СО-95-К при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):

Подпись и дата	
Име. № дубл.	
Взам. инв. №	
Подпись и дата	
Име. № подл.	

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	Лист
					12

$$[\sigma]_{m2}^{20} = \frac{R_{e/t}}{n_{\tau}} = 40 / 1.1 = 36.364 \text{ МПа}$$

Свойства материала фланца (кольца) 1

Допускаемые напряжения для материала СО-95-К при температуре 20 °С (условия гидротестирования):

$$[\sigma]_{fl}^{20} = \frac{R_{e/t}}{n_{\tau}} = 40 / 1.1 = 36.364 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала СО-95-К при температуре T = 20 °С :

$$E_{1}^{20} = 2.9 \cdot 10^6 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала СО-95-К при температуре T = 20 °С :

$$\alpha_{1}^{20} = 11 / ^\circ\text{C}$$

Свойства материала фланца (кольца) 2

Допускаемые напряжения для материала СО-95-К при температуре 20 °С (условия гидротестирования):

$$[\sigma]_{fl}^{20} = \frac{R_{e/t}}{n_{\tau}} = 40 / 1.1 = 36.364 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала СО-95-К при температуре T = 20 °С :

$$E_{2}^{20} = 2.9 \cdot 10^6 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала СО-95-К при температуре T = 20 °С :

$$\alpha_{2}^{20} = 11 / ^\circ\text{C}$$

Расчёт без учета стесненности температурных деформаций

Расчёт болтов(шпилек):

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке :

$$[\sigma]_6^M = \xi \cdot K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_6^{20} = 1.2 * 1.35 * 1 * 1 * 130 = 210.6 \text{ МПа}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} \leq [\sigma]_6^M$$

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} = 20467 / 0.3936 \cdot 10^{-3} = 52 \text{ МПа}$$

52 МПа ≤ 210.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:

$$[\sigma]_6^P = K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_6 = 1.35 * 1 * 1 * 130 = 175.5 \text{ МПа}$$

Условие прочности в рабочих условиях:

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} \leq [\sigma]_6^P$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} = 20732 / 0.3936 \cdot 10^{-3} = 52.674 \text{ МПа}$$

52.674 МПа ≤ 175.5 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Расчёт прокладки:

Условие прочности мягких прокладок:

$$q = \frac{\max\{P_6^M, P_6^P\}}{\pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_{\text{пр}}} \leq [q]$$

$$q = \frac{\max\{P_6^M, P_6^P\}}{\pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_{\text{пр}}} = \max\{20467; 20732\} / (3.1416 * 223.01 * 20) = 1.4796 \text{ МПа}$$

$$[q] = 18 \text{ МПа}$$

Условие работоспособности выполнено.

Расчёт первого фланца:

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении s_0 :

$$\max\{|\sigma_{0\text{мо}}^P|; |\sigma_{0\text{мм}}^P|\} \leq [\sigma]_0$$

$$\max\{|\sigma_{0\text{мо}}^P|; |\sigma_{0\text{мм}}^P|\} = \max\{0.13092; |(-0.060969)|\} = 0.13092 \text{ МПа}$$

0.13092 МПа ≤ 36.364 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Име. № дубл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	
Подпись и дата	
Име. № подл.	

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	Лист
					13

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ 7.2686; | 4.7918 | \} = 7.2686 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1 * 36.364 = 36.364 \text{ МПа}$$

7.2686 МПа ≤ 36.364 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max \{ 7.4266; | 4.8959 | \} = 7.4266 \text{ МПа}$$

7.4266 МПа ≤ 36.364 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Жёсткость фланца:

Условие выполнения жесткости фланцев :

$$\Theta \leq K_{\Theta} \cdot [\Theta] = 1.3 * 0.74485 = 0.9683 \text{ }^{\circ}$$

Условие жёсткости выполнено.

Расчёт второго фланца:

Параметры первого и второго фланцев полностью совпадают, расчёт второго фланца не проводится

Жёсткость фланца:

Параметры первого и второго фланцев полностью совпадают, расчёт второго фланца не проводится

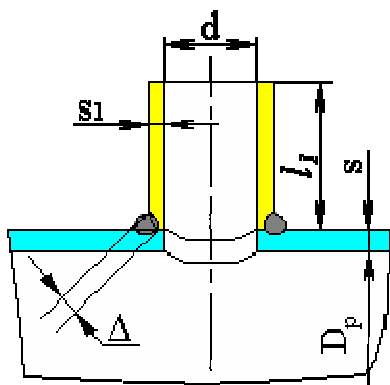
Изн. № подл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Изн. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

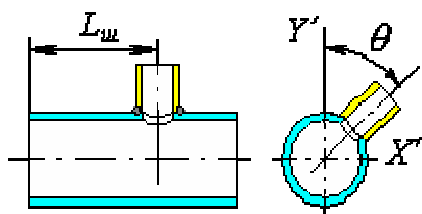
6 Штуцер №5

6.1 Исходные данные

Элемент:	Штуцер №5
Условное обозначение (метка)	
Элемент, несущий штуцер:	Обечайка цилиндрическая №1
Тип элемента, несущего штуцер:	Обечайка цилиндрическая
Тип штуцера:	Непроходящий без укрепления



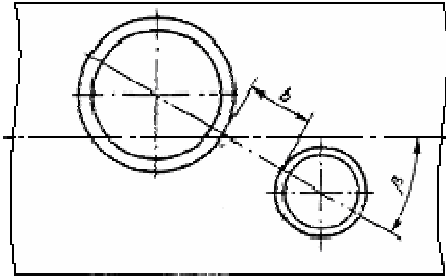
Материал несущего элемента:	СО-95-К
Толщина стенки несущего элемента, s :	10 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c :	0 мм
Материал штуцера:	СО-95-К
Внутренний диаметр штуцера, d :	20 мм
Толщина стенки штуцера, s_1 :	10 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s :	0 мм
Длина штуцера, l_1 :	20 мм



Смещение штуцера, $L_{ш}$:	60 мм
Угол поворота штуцера, θ :	90 °
Минимальный размер сварного шва, Δ :	2 мм
Расчётные параметры размещения штуцера:	
Ближайший штуцер	

Изн. № подл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Изн. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата
------	------	-------------	---------	------



Название штуцера: Штуцер №6
 Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 305.35 мм
 Угол β: 90 °

6.2 Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 20 °С
 Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0.0039064 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ 34233.3-2017

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала СО-95-К при температуре 20 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]^{20} = \min \left(\frac{R_{\sigma t}}{n_{\sigma}}; \frac{R_{m t}}{n_{\sigma}}; \frac{R_{m 10^5 t}}{n_{\sigma}} \right) = \min\{40 / 1.5; 50 / 2.4; 50 / 1.5\} = 20.833 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °С :

$$E = 2.9 \cdot 10^6 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала СО-95-К при температуре 20 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_1^{20} = \min \left(\frac{R_{\sigma t}}{n_{\sigma}}; \frac{R_{m t}}{n_{\sigma}}; \frac{R_{m 10^5 t}}{n_{\sigma}} \right) = \min\{40 / 1.5; 50 / 2.4; 50 / 1.5\} = 20.833 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °С :

$$E_1 = 2.9 \cdot 10^6 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = \frac{2 \cdot 20.833 \cdot 1 \cdot (10 - 0)}{20 + 10 + 0} = 13.889 \text{ МПа}$$

$$13.889 \text{ МПа} \geq 0.0039064 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Расчётный диаметр отверстия (ось штуцера совпадает с нормалью к поверхности в центре отверстия):

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 20 + 2 \cdot 0 = 20 \text{ мм}$$

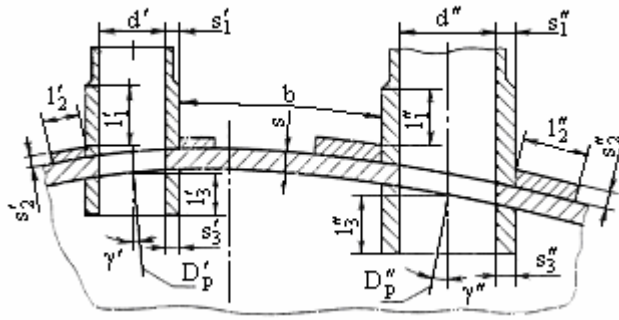
Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда:

$$d_0 = \min \left\{ 2 \cdot \left(\frac{s-c}{s_{\text{пр}}} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)}; d_{\text{max}} + 2 \cdot c_s \right\} = \min\{2 \cdot ((10-0) / 0.027578 - 0.8) \cdot (200 \cdot (10-0))^{1/2}; 200 + 2 \cdot 0\} = 200 \text{ мм}$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s-c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s-c) \cdot V} = \frac{2 \cdot 1 \cdot (10-0) \cdot 0.68 \cdot 20.833 \cdot 1}{200 + (10-0) \cdot 1} = 1.3492 \text{ МПа}$$

Подпись и дата	
Име. № дубл.	
Взам. инв. №	
Подпись и дата	
Име. № подл.	

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	Лист
					16



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер №6 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (200 \cdot (10 - 0))^{1/2} + (200 \cdot (10 - 0))^{1/2} = 89.443 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 1.3492 \text{ МПа}$

$1.3492 \text{ МПа} \geq 0.0039064 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (20 - 17.889) \cdot 0.027578 = 0.29115 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления одиночного отверстия:

$$A_a = l_{1p} \cdot (s_1 - s_{1p} - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c) \\ = 17.678 \cdot (10 - 0.0018752 - 0) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (0 - 0 - 0) \cdot 1 + 40 \cdot (10 - 0.027578 - 0) \cdot 1 \\ = 0.57564 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$A_r = 0.29115 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \leq 0.57564 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

6.3 Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, T: 20 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0.012278 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ 34233.3-2017

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала СО-95-К при температуре 20 °C (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20} = \frac{R_{\sigma/t}}{n_r} = 40 / 1.1 = 36.364 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C :

$$E = 2.9 \cdot 10^6 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала СО-95-К при температуре 20 °C (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20}_1 = \frac{R_{\sigma/t}}{n_r} = 40 / 1.1 = 36.364 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C :

$$E_1 = 2.9 \cdot 10^6 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \Phi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 36.364 \cdot 1 \cdot (10 - 0) / (20 + 10 + 0) = 24.242 \text{ МПа}$$

$$24.242 \text{ МПа} \geq 0.012278 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Расчётный диаметр отверстия (ось штуцера совпадает с нормалью к поверхности в центре отверстия):

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 20 + 2 \cdot 0 = 20 \text{ мм}$$

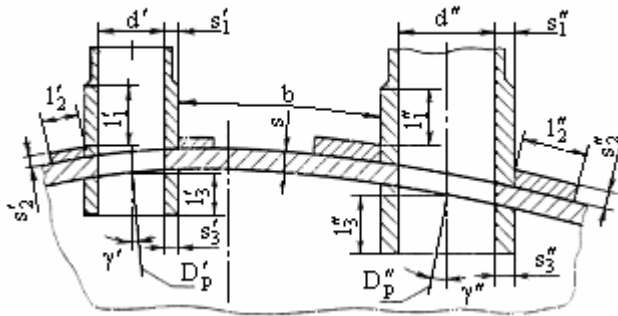
Име. № дубл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	
Подпись и дата	
Име. № подл.	

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	Лист
					17

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда:

$$d_0 = \min \left\{ 2 \cdot \left(\frac{s-c}{s_{pm}} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)}; d_{max} + 2 \cdot c_s \right\} = \min \{ 2 \cdot ((10-0) / 0.049667 - 0.8) \cdot (200 \cdot (10-0))^{1/2}; 200 + 2 \cdot 0 \} = 200 \text{ мм}$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s-c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s-c) \cdot \psi} = 2 \cdot 1 \cdot (10-0) \cdot 0.68 \cdot 36.364 \cdot 1 / [200 + (10-0) \cdot 1] = 2.355 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер №6 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D'_p \cdot (s-c)} + \sqrt{D''_p \cdot (s-c)} = (200 \cdot (10-0))^{1/2} + (200 \cdot (10-0))^{1/2} = 89.443 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 2.355 \text{ МПа}$

$2.355 \text{ МПа} \geq 0.012278 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5 \cdot (d_p - d_{0p}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (20 - 17.889) \cdot 0.049667 = 0.52435 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления одиночного отверстия:

$$A_a = l_{1p} \cdot (s_1 - s_p - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c) \\ = 17.678 \cdot (10 - 0.0033771 - 0) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (0 - 0 - 0) \cdot 1 + 40 \cdot (10 - 0.049667 - 0) \cdot 1 \\ = 0.57473 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$A_r = 0.52435 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \leq 0.57473 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

Име. № подл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Име. № дубл.
Подпись и дата	
Име. № подл.	

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	Лист
					18

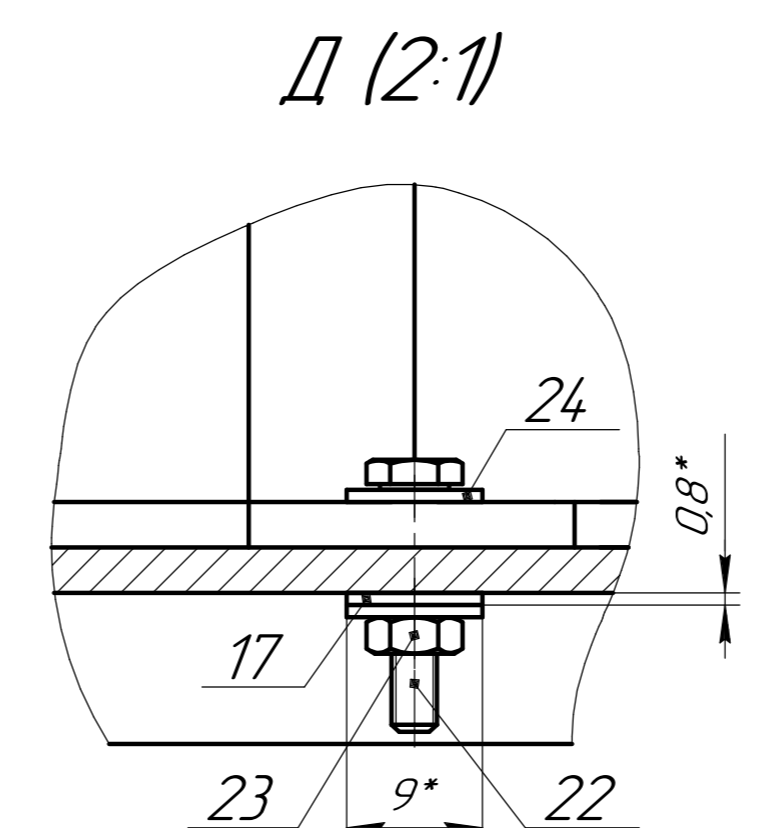
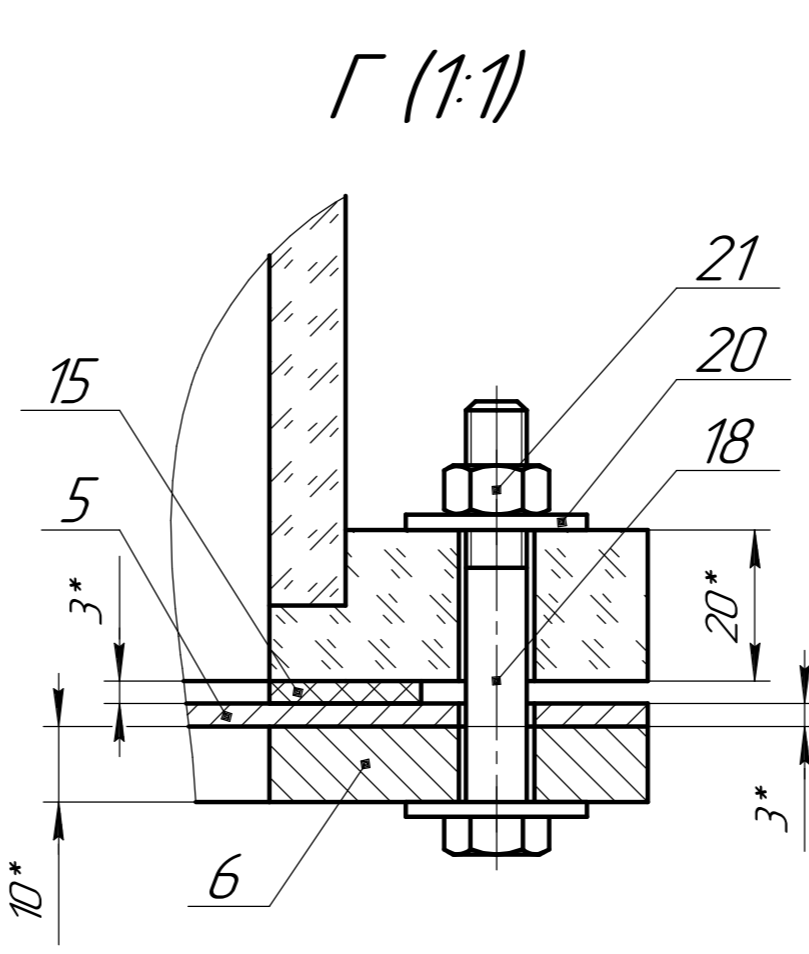
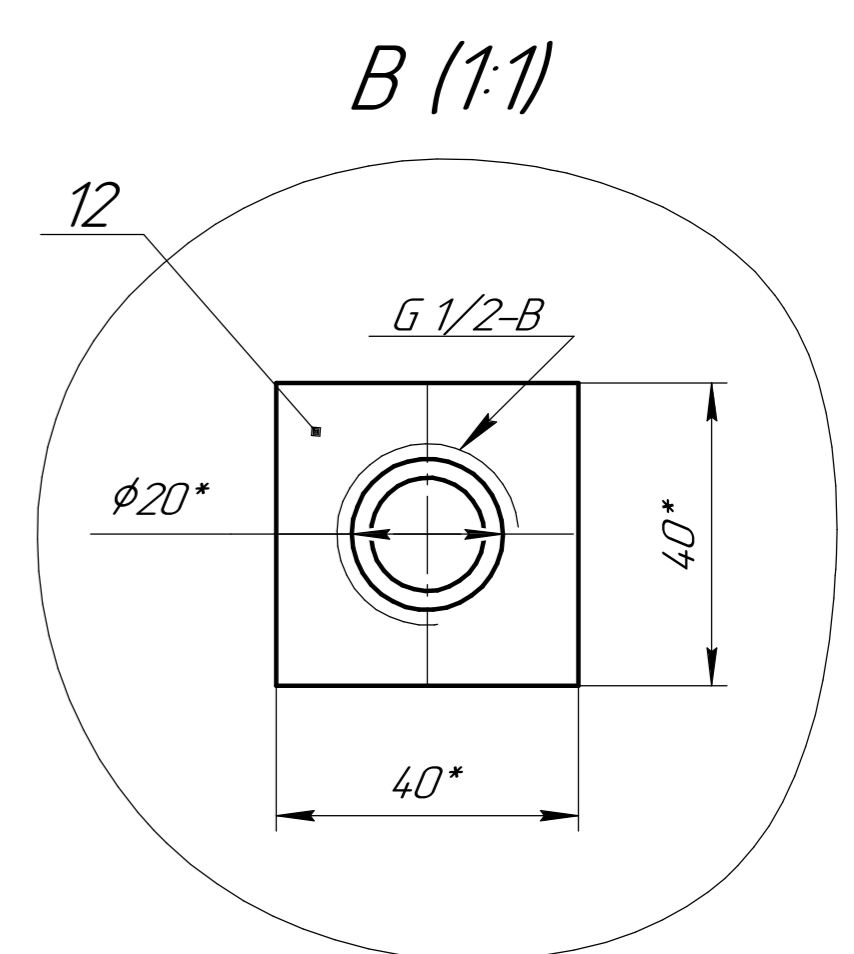
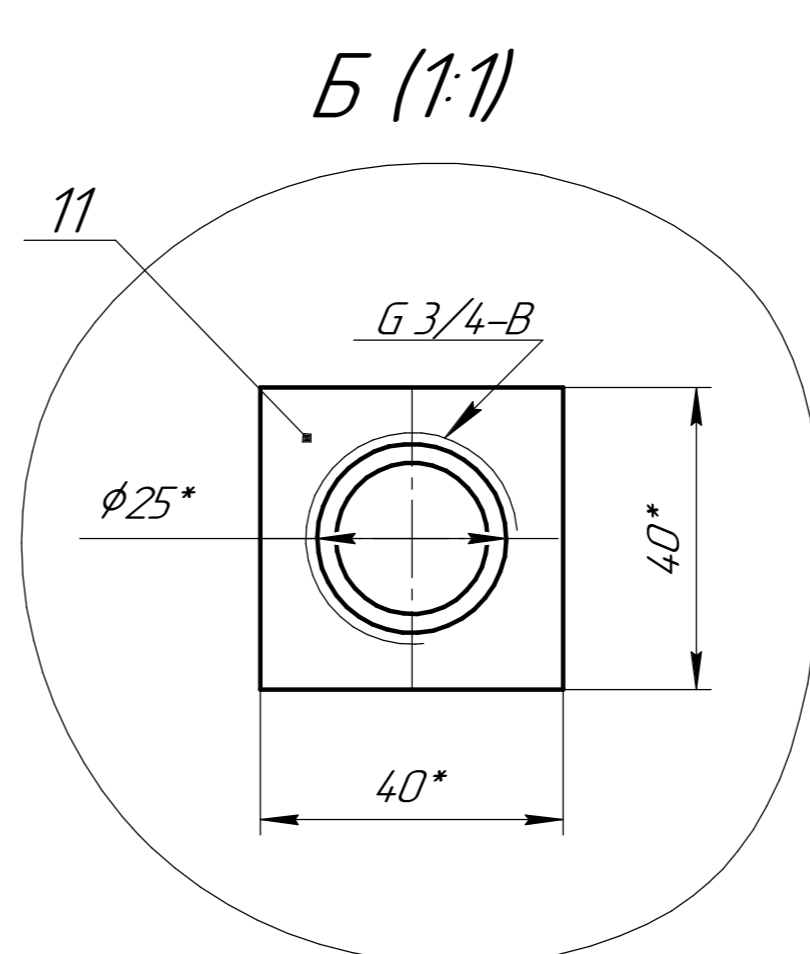
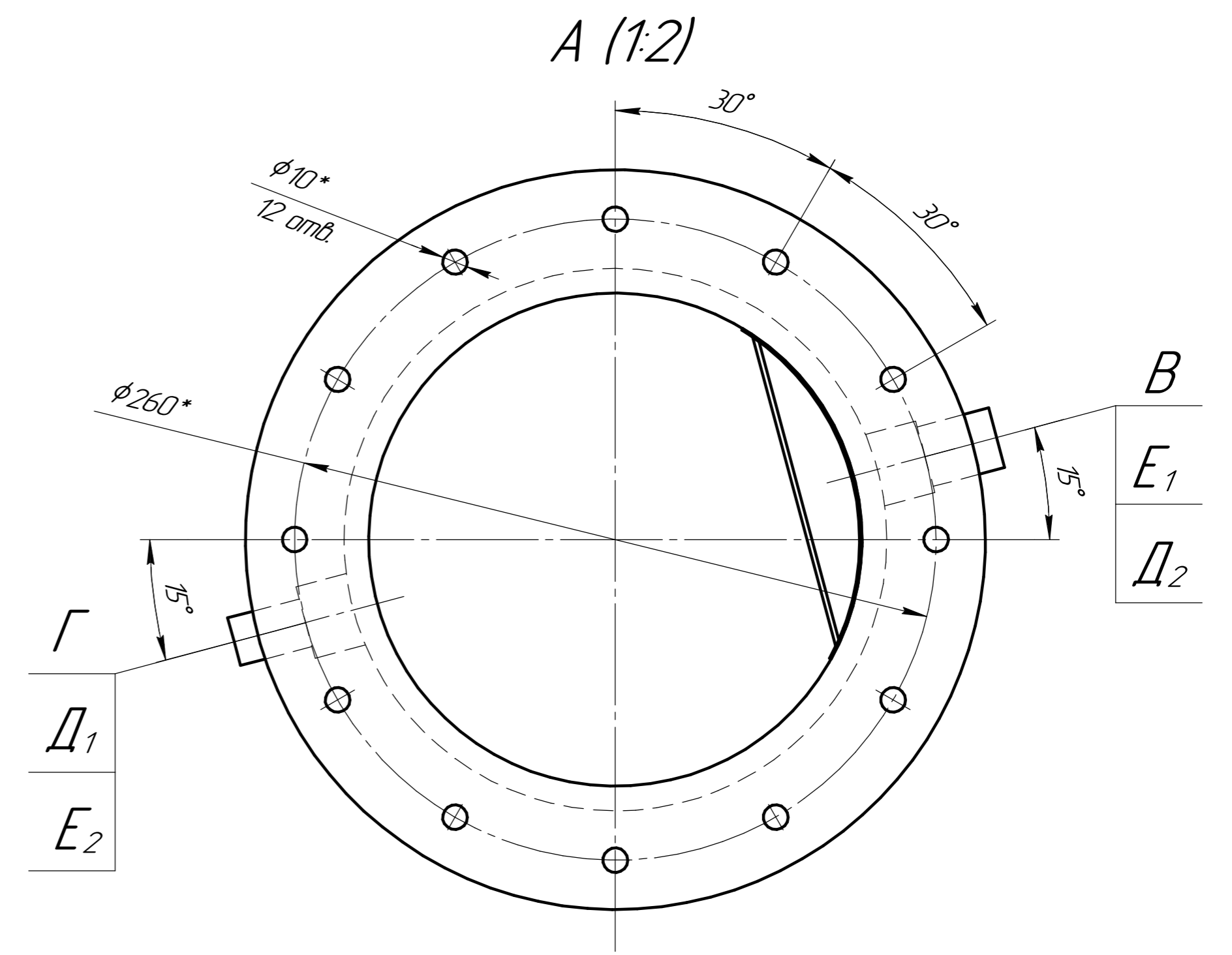
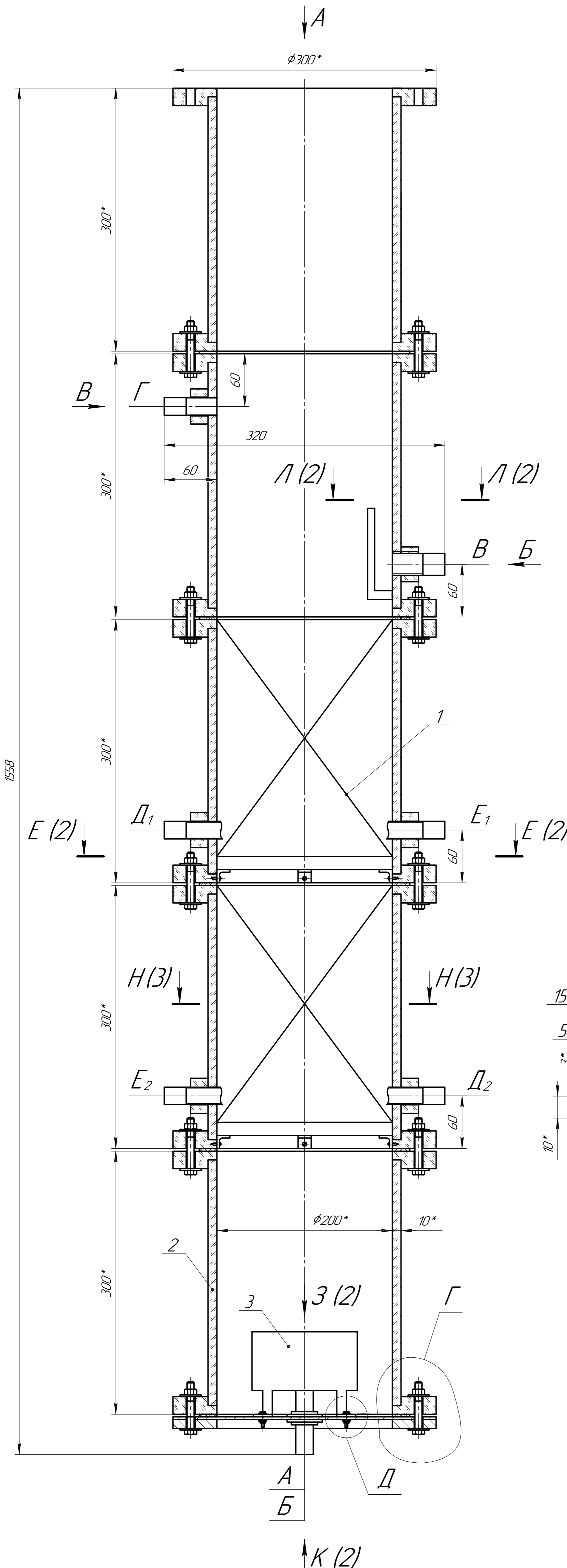
7 Список литературы

- 1) ГОСТ 34233.1-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования.
- 2) ГОСТ 34233.2-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек.
- 3) ГОСТ 34233.3-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер.
- 4) ГОСТ 34233.4-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений.
- 5) ГОСТ 34233.9-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Аппараты колонного типа.
- 6) ГОСТ 34283-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность при ветровых, сейсмических и других внешних нагрузках.

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		Лист
						19

Таблица штуцеров

Обозначение	Наименование	Кол.	Прочай условный Ду, мм	Давление условное Ру, МПа
А	Вход воздуха	1	15	0,16
Б	Вход воды	1	15	0,16
В	Выход воды	1	20	0,16
Г	Резервный выход воды	1	15	0,16
Д _{1,2}	Вход теплоносителя	2	15	0,16
Е _{1,2}	Выход теплоносителя	2	15	0,16



Техническая характеристика

Наименование		Корпус	
Давление, МПа	рабочее	Атмосферное	
	расчетное	0,006	
	пробное	0,0132	
Расчетная температура стенки, °С		30	
Характеристика рабочей среды	состав		
	температура, °С	максимальная	30
		минимальная	20
Внутренний объем, м ³		0,047	
Масса, кг	в рабочем состоянии	59,7	
	при гидротестировании	75,3	
Габаритные размеры (ДхШхВ), мм		320х300х1558	

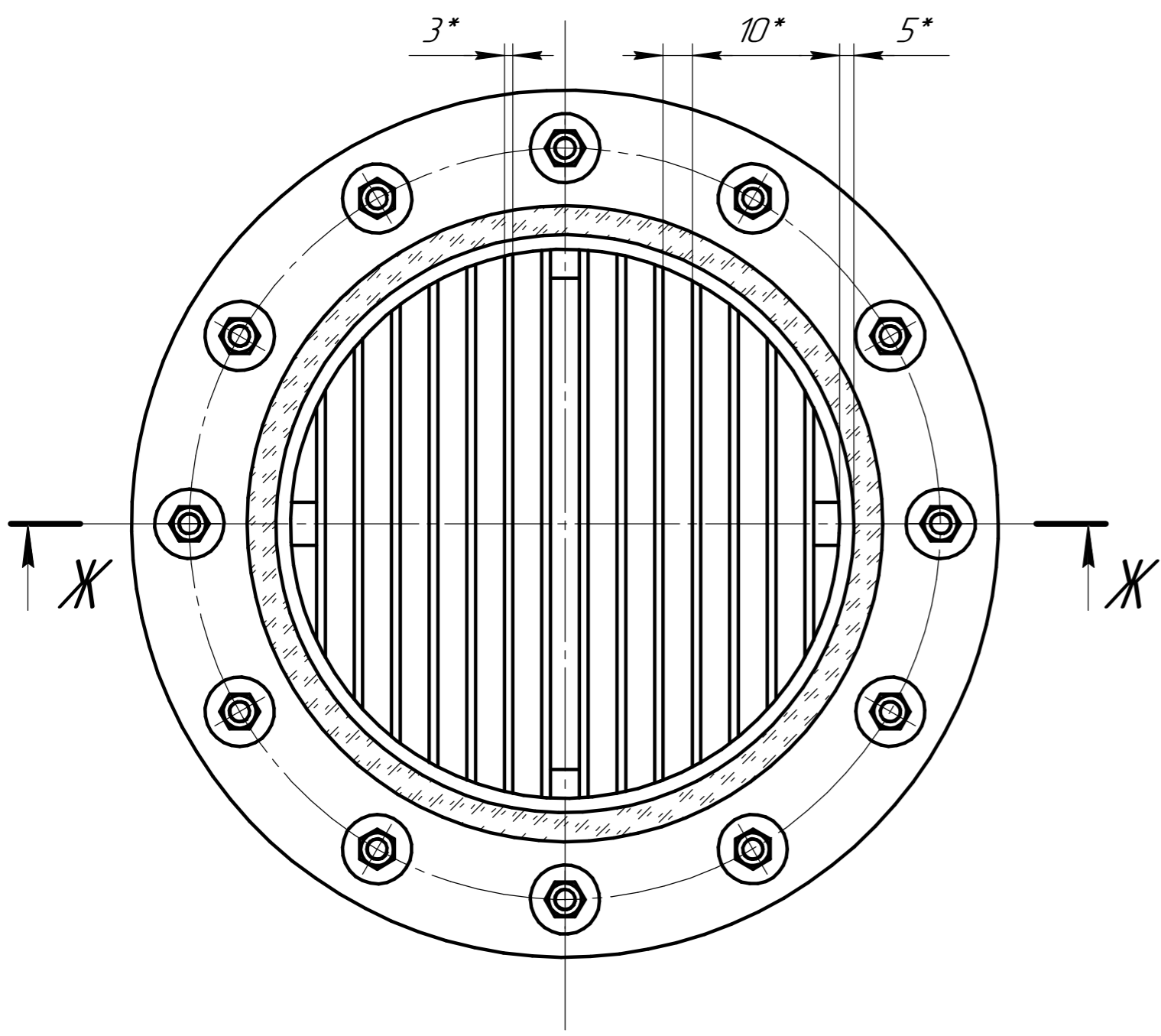
Технические требования

1. Действительное расположение штуцеров и патрубков см. на виде А и разрезе К-К.
2. Перед установкой сгонов в штуцера резьбовые участки сгонов обмотать лентой из фторопластового уплотнительного материала.
3. Склеивку гидрозатвора с корпусом аппарата выполнить с помощью монтажного клея.
4. Соединения штуцеров теплообменных модулей контактных устройств со штуцерами корпуса аппарата выполнить с помощью гибких шлангов и металлических хомутов.
5. Гидравлические испытания аппарата провести под наливом воды.
6. Гофрированная насадка в блоке контактного теплообменного устройства условно показана ломаными (см. разрез Н-Н, лист 3) и штрих-пунктирными линиями (см. разрез П-П, лист 3).
7. * - Размеры для справок.

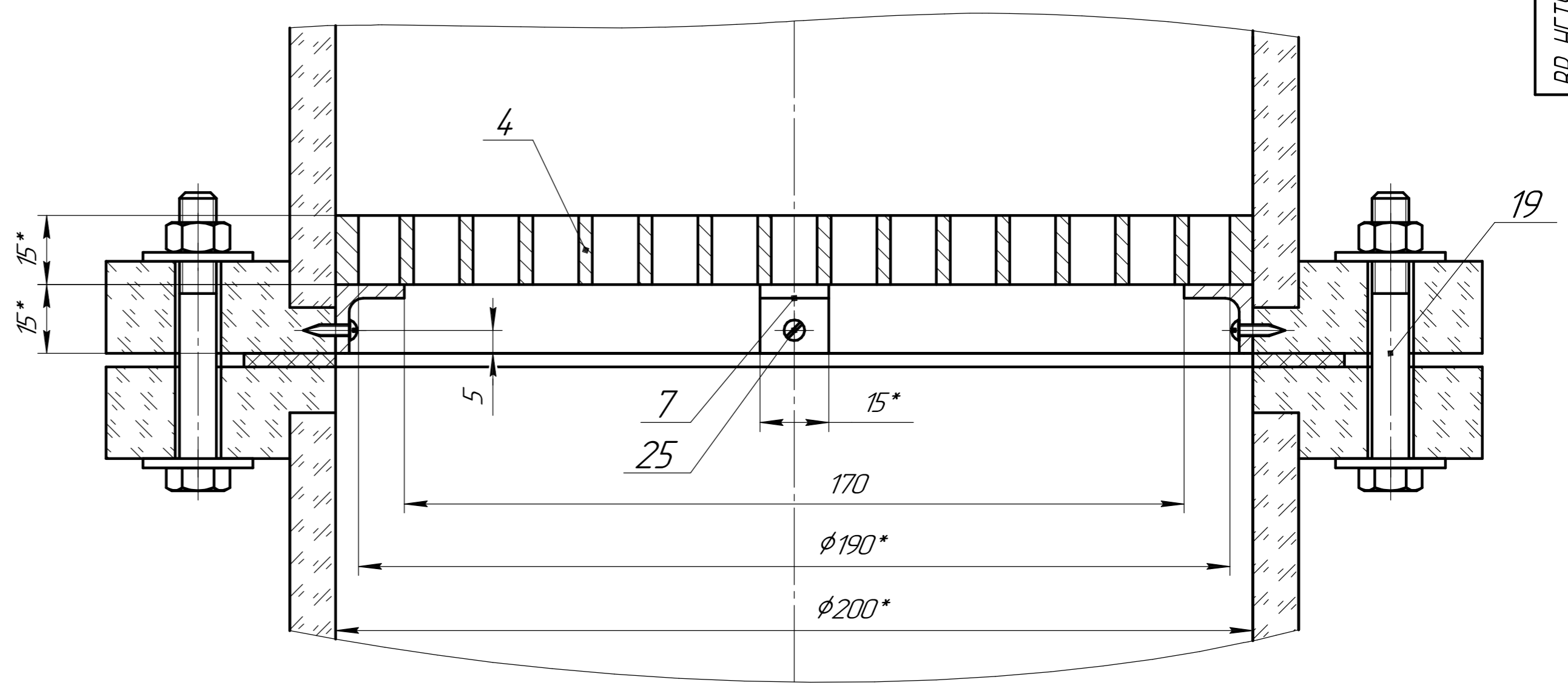
ВР-НГТУ-М19Т0-000-21 СБ				Колонна лабораторная		
Изд. Лист	№ докум.	Лист	Листа	у	41	12,5
Разработ.	Васильев П.Д.			Сборочный чертёж		
Проб.	Сидягин А.А.					
Техн.пр.						
Начерт.	Балахнин И.А.			Лист 1 Листов 3		
Экз.	Дьяков В.А.			ДПИ НГТУ М19-ТМО		
				Формат А1		

Перед. прорисован
Справка №
Листы и дата
Взнос. лист №
Листы и дата
Лист № разраб.

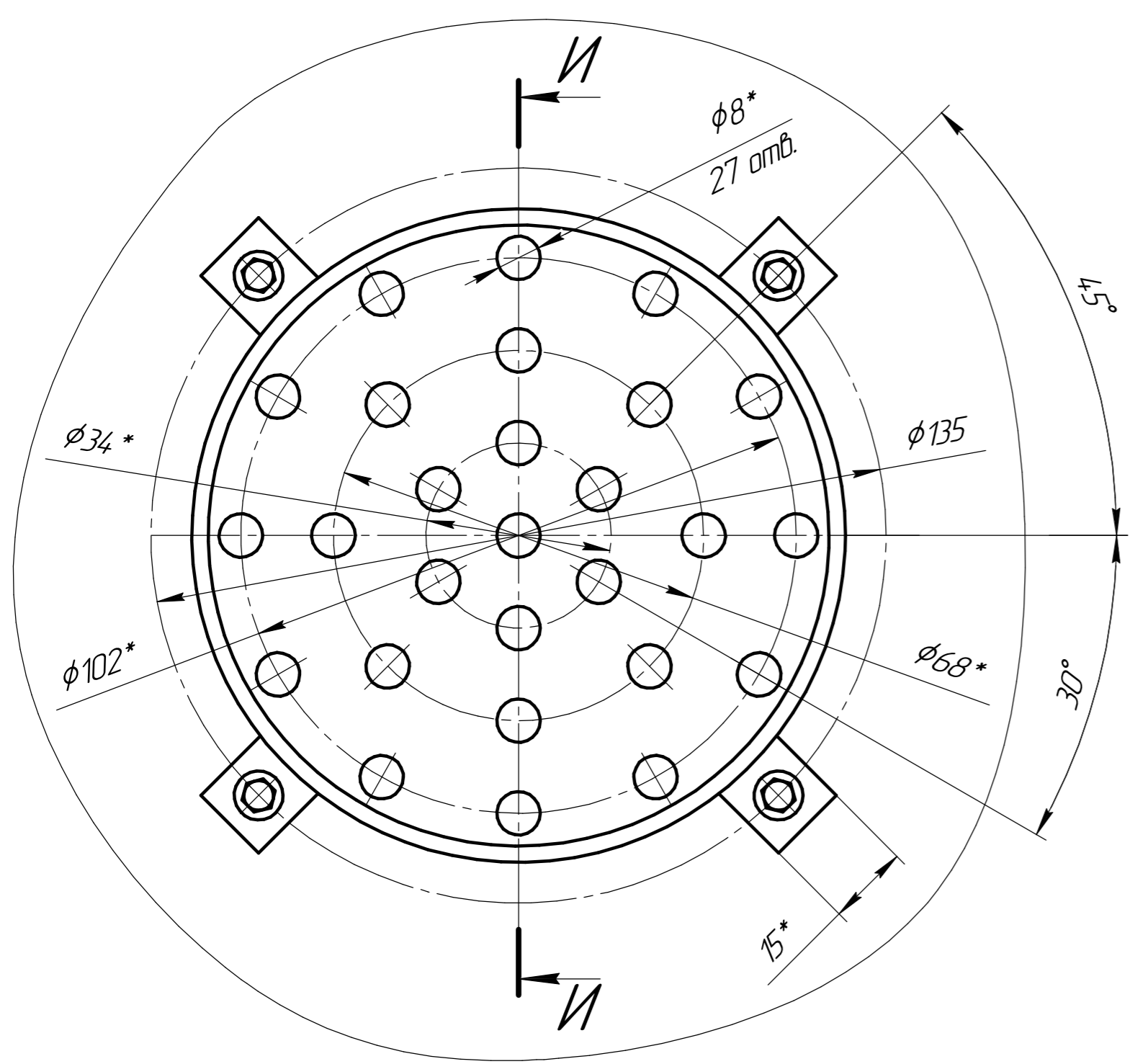
E - E (1:2) (1)



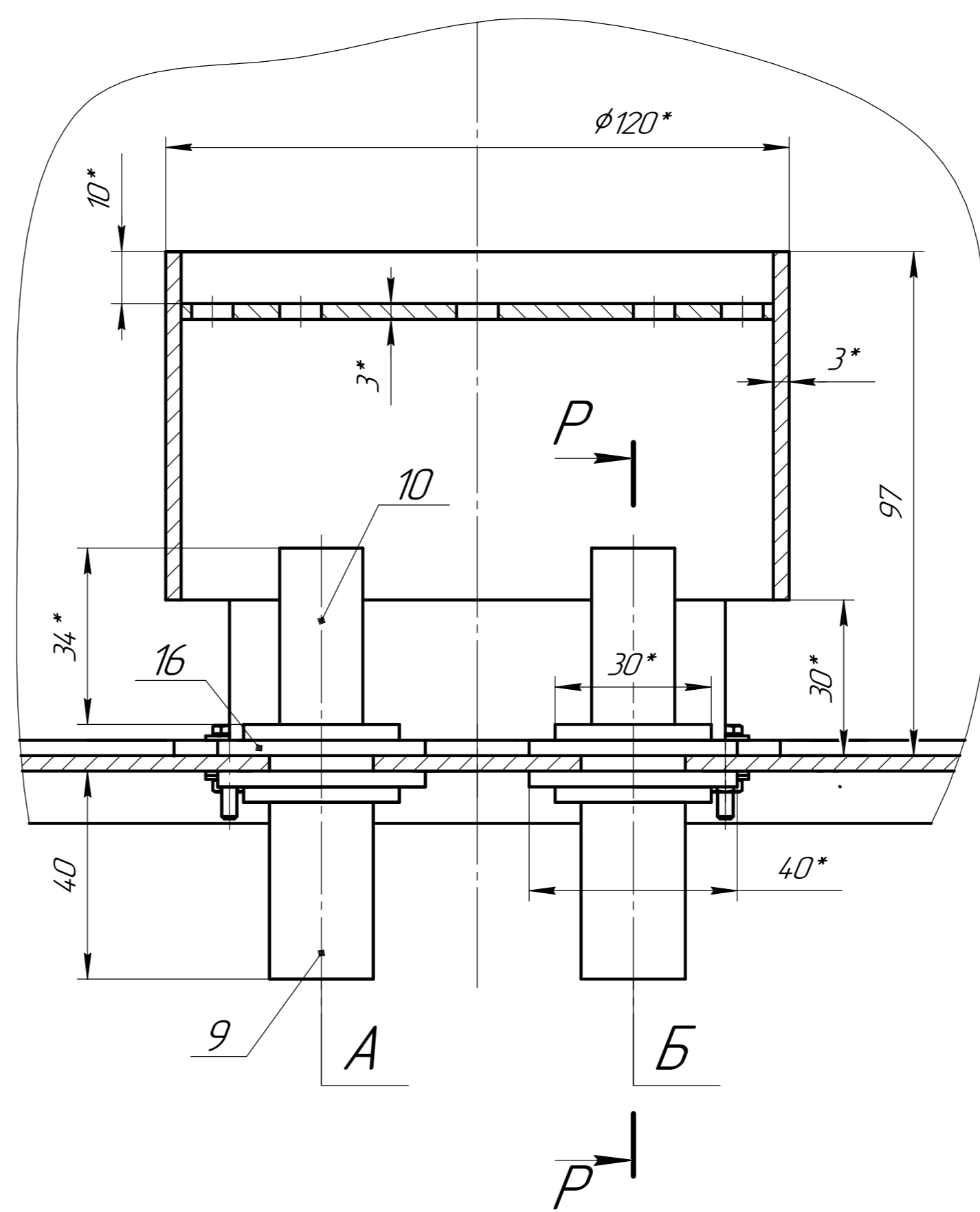
Ж - Ж (1:1)



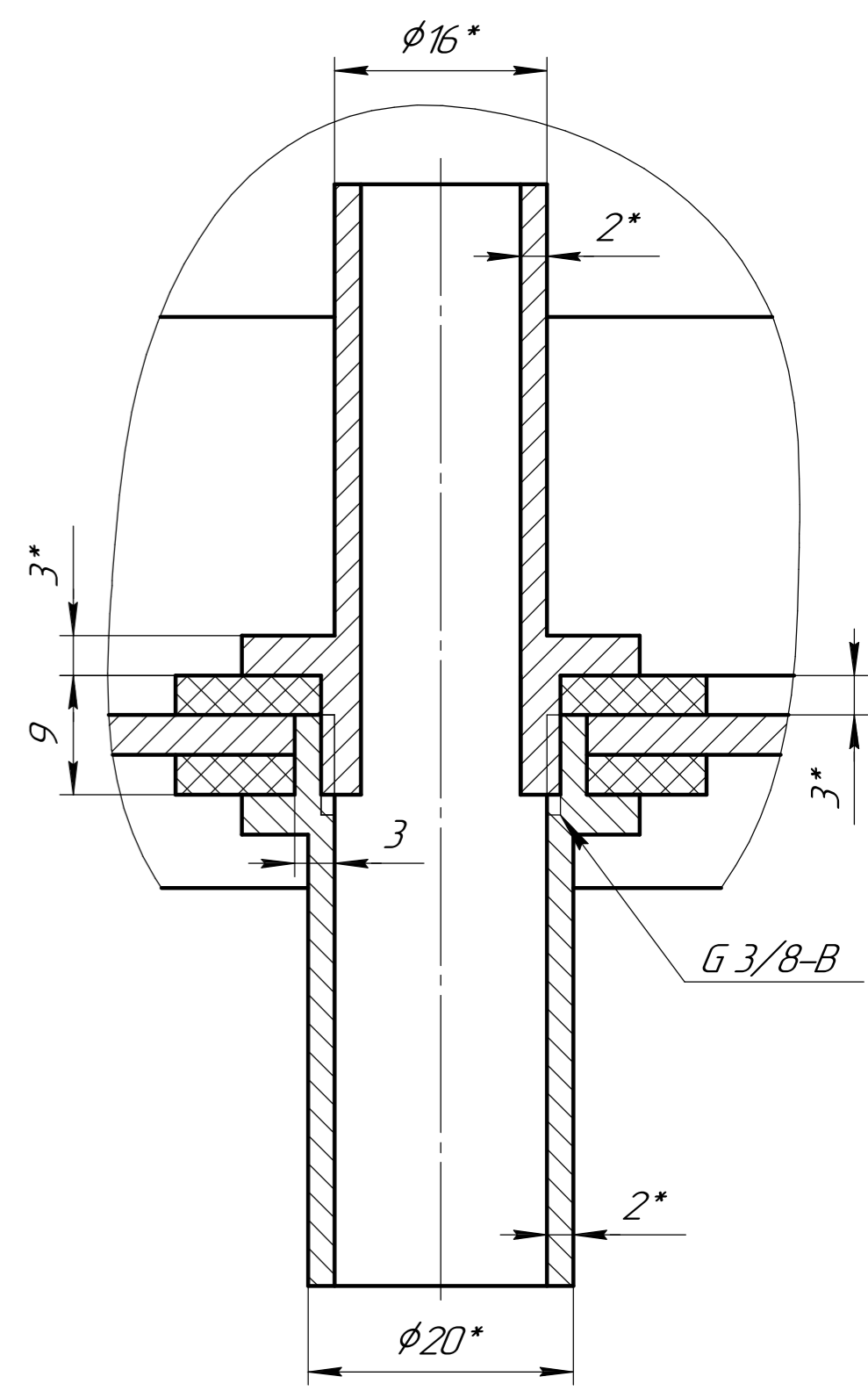
З (1:1) (1)



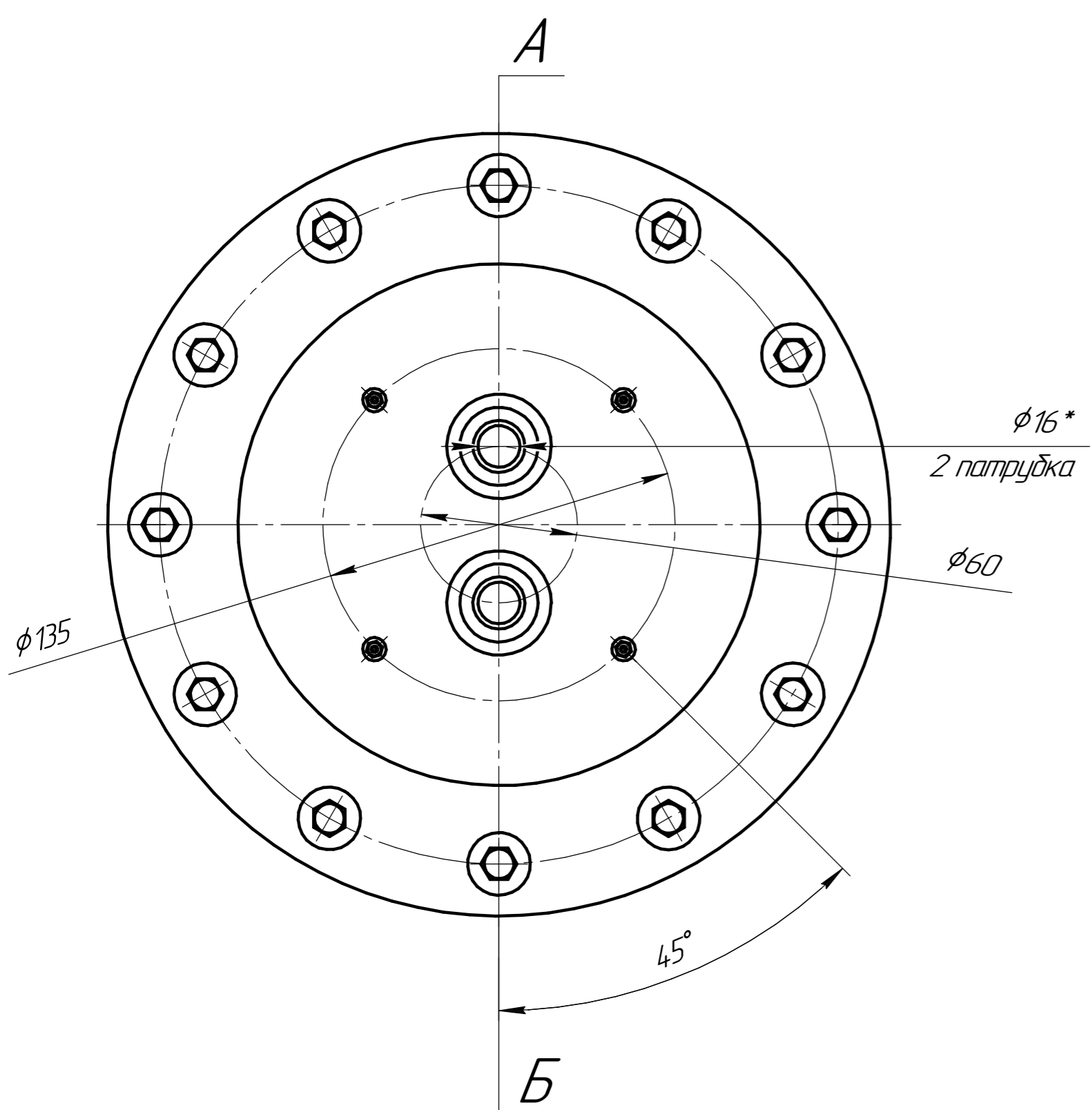
И - И (1:1)



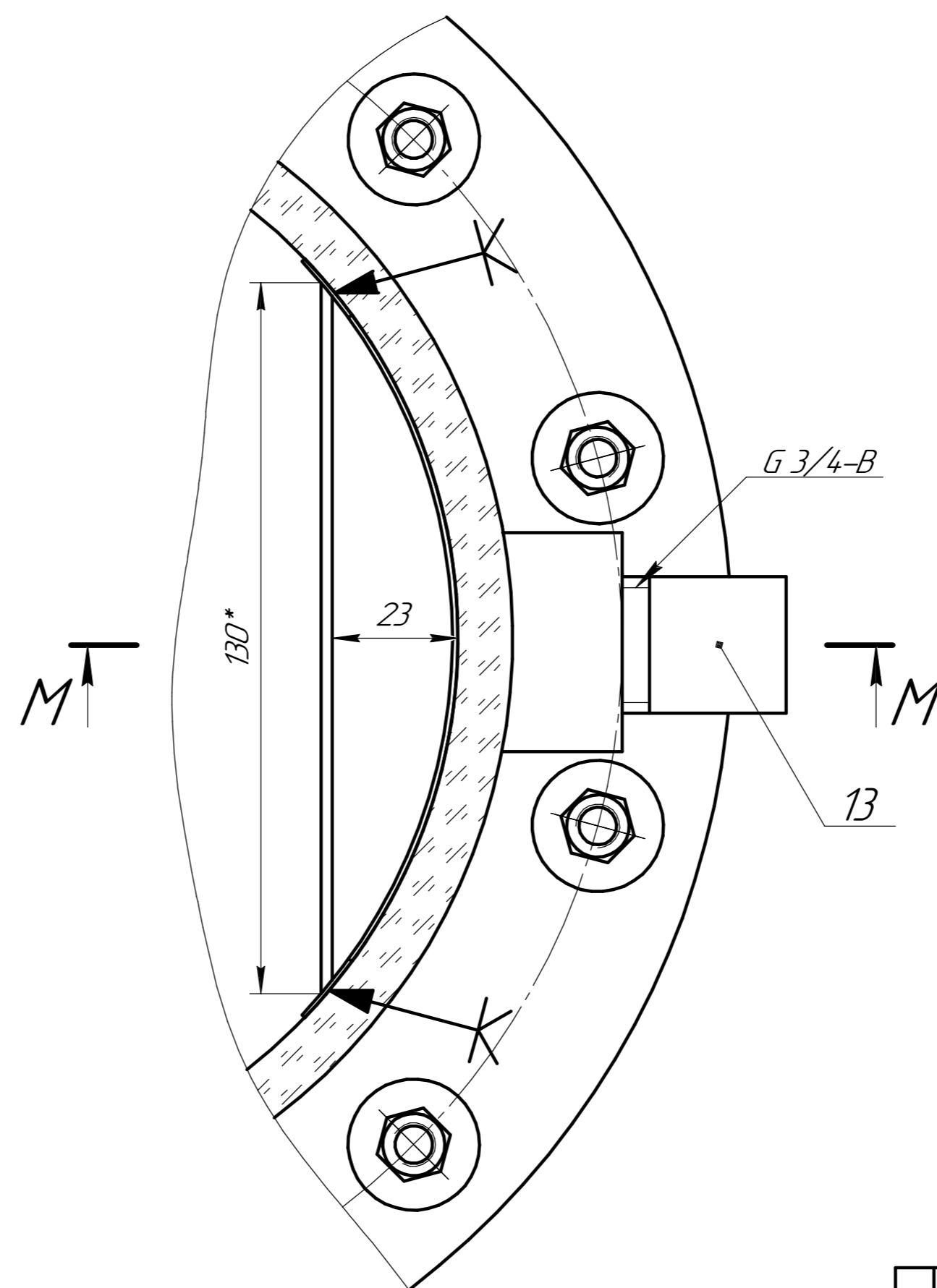
Р - Р (1:1)



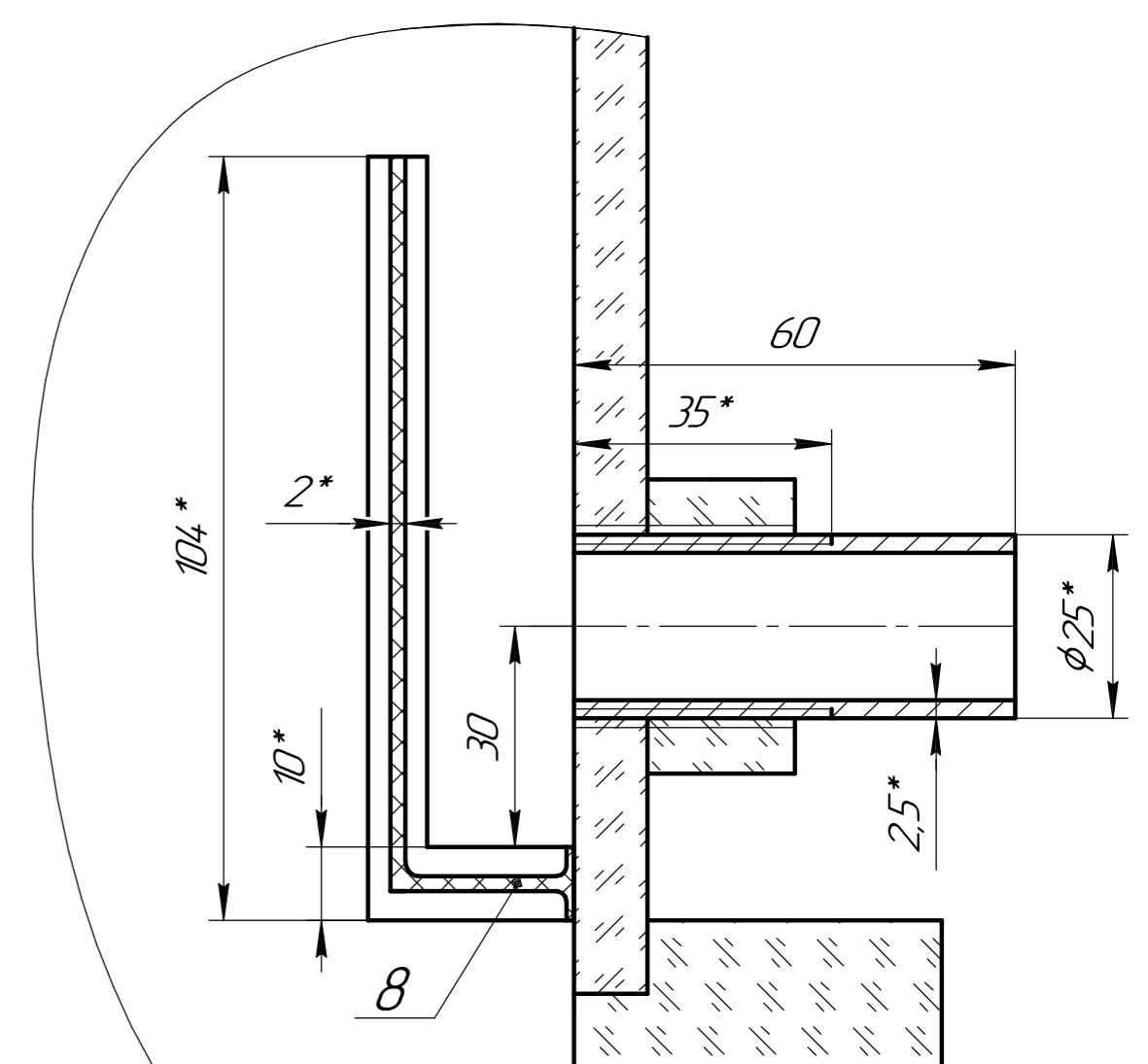
К - К (1:2) (1)



Л - Л (1:1) (1) ∅ 15°



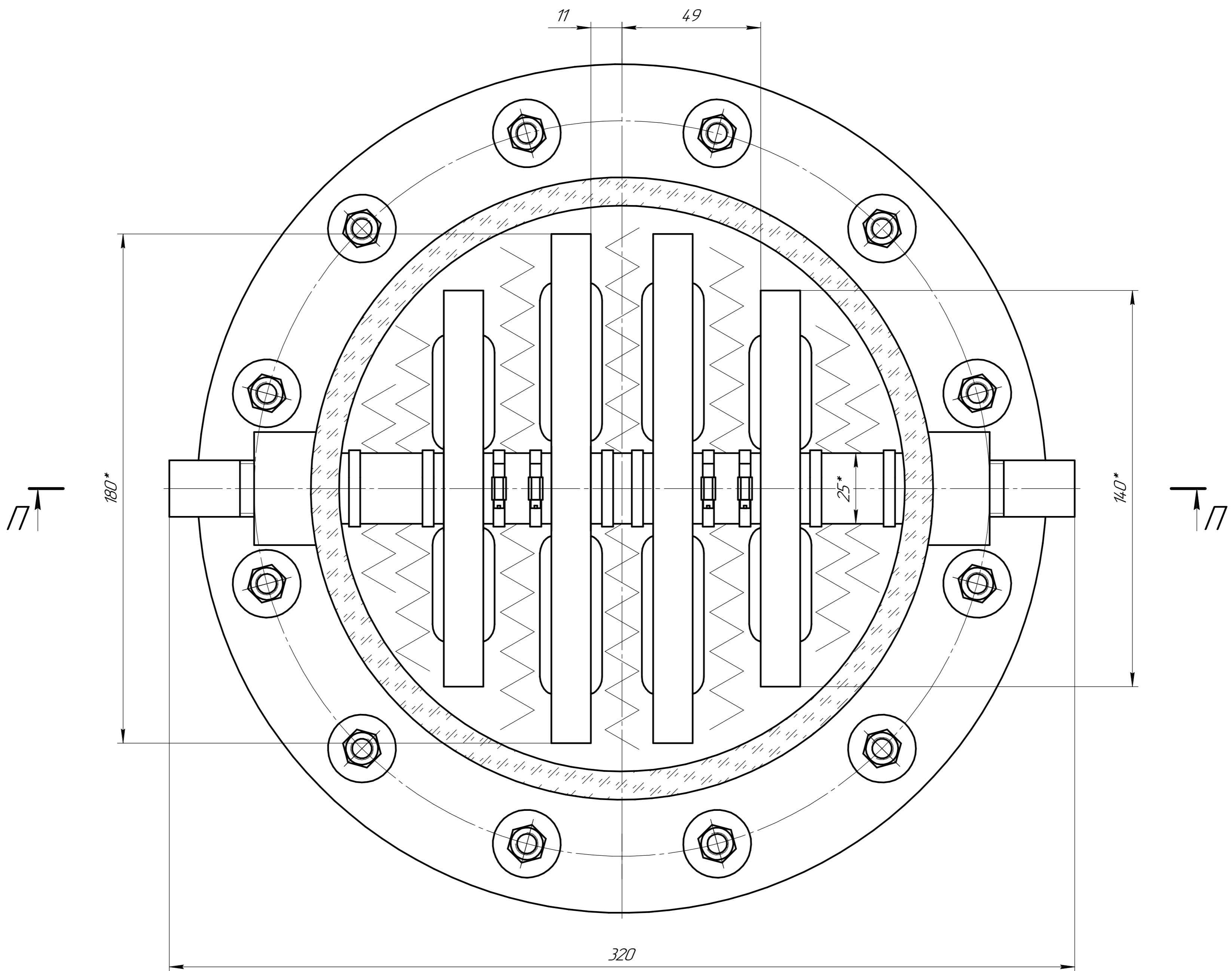
М - М (1:1)



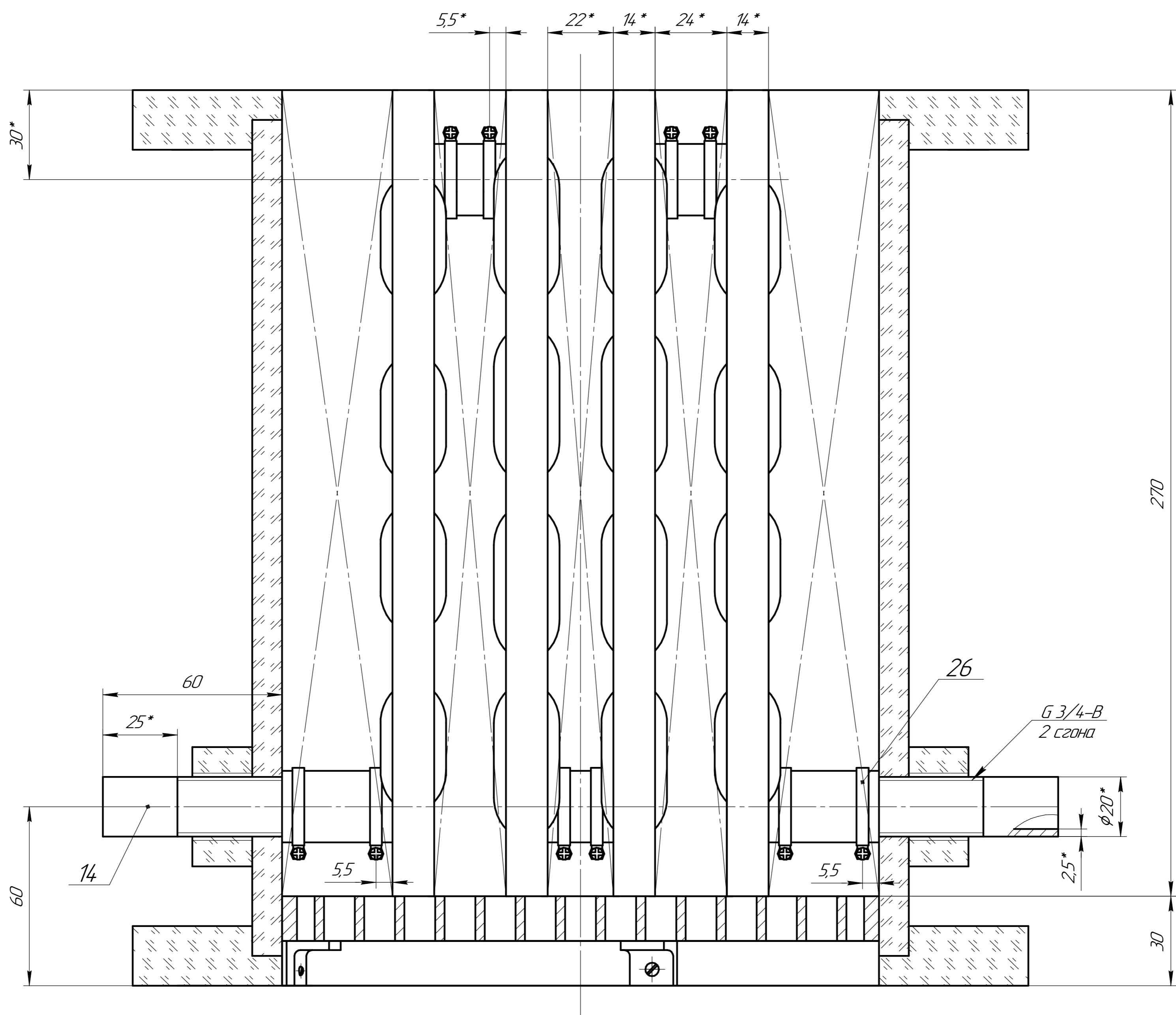
Лист 2 из 3
 Дата: 15.08.2019
 Изменения:
 1. 15.08.2019
 2. 15.08.2019
 3. 15.08.2019
 4. 15.08.2019
 5. 15.08.2019
 6. 15.08.2019
 7. 15.08.2019
 8. 15.08.2019
 9. 15.08.2019
 10. 15.08.2019
 11. 15.08.2019
 12. 15.08.2019
 13. 15.08.2019
 14. 15.08.2019
 15. 15.08.2019
 16. 15.08.2019
 17. 15.08.2019
 18. 15.08.2019
 19. 15.08.2019
 20. 15.08.2019
 21. 15.08.2019
 22. 15.08.2019
 23. 15.08.2019
 24. 15.08.2019
 25. 15.08.2019
 26. 15.08.2019
 27. 15.08.2019
 28. 15.08.2019
 29. 15.08.2019
 30. 15.08.2019
 31. 15.08.2019
 32. 15.08.2019
 33. 15.08.2019
 34. 15.08.2019
 35. 15.08.2019
 36. 15.08.2019
 37. 15.08.2019
 38. 15.08.2019
 39. 15.08.2019
 40. 15.08.2019
 41. 15.08.2019
 42. 15.08.2019
 43. 15.08.2019
 44. 15.08.2019
 45. 15.08.2019
 46. 15.08.2019
 47. 15.08.2019
 48. 15.08.2019
 49. 15.08.2019
 50. 15.08.2019
 51. 15.08.2019
 52. 15.08.2019
 53. 15.08.2019
 54. 15.08.2019
 55. 15.08.2019
 56. 15.08.2019
 57. 15.08.2019
 58. 15.08.2019
 59. 15.08.2019
 60. 15.08.2019
 61. 15.08.2019
 62. 15.08.2019
 63. 15.08.2019
 64. 15.08.2019
 65. 15.08.2019
 66. 15.08.2019
 67. 15.08.2019
 68. 15.08.2019
 69. 15.08.2019
 70. 15.08.2019
 71. 15.08.2019
 72. 15.08.2019
 73. 15.08.2019
 74. 15.08.2019
 75. 15.08.2019
 76. 15.08.2019
 77. 15.08.2019
 78. 15.08.2019
 79. 15.08.2019
 80. 15.08.2019
 81. 15.08.2019
 82. 15.08.2019
 83. 15.08.2019
 84. 15.08.2019
 85. 15.08.2019
 86. 15.08.2019
 87. 15.08.2019
 88. 15.08.2019
 89. 15.08.2019
 90. 15.08.2019
 91. 15.08.2019
 92. 15.08.2019
 93. 15.08.2019
 94. 15.08.2019
 95. 15.08.2019
 96. 15.08.2019
 97. 15.08.2019
 98. 15.08.2019
 99. 15.08.2019
 100. 15.08.2019

				ВР-НГТУ-М19Т0-000-21 СБ		
Изд.	Лист	№ докум.	Лист	Лист	Колонна лабораторная	Лит
Разраб.	Васильев П.Д.	Собякин А.А.			Сборочный чертёж	у
Проб.						
Т.контр.						
Исполн.	Балахнин И.А.	Дьяков В.А.				
Удп.						
						Лист 2 из 3
						Формат А1

H - H (1:1) (1) $\circ 15^\circ$



П - П (1:1)



Изд. №	Лист	№ докум.	Лист
Разраб.	Васильев П.Д.	Лист	Лист
Проб.	Сидягин А.А.	Лист	Лист
Т.контр.		Лист	Лист
Исполн.	Балахнин И.А.	Лист	Лист
Удп.	Джодж В.А.	Лист	Лист

ВР-НГТУ-М19Т0-000-21 СБ				Лист	Масса	Масштаб
Колонна лабораторная				у		
Сборочный чертеж				Лист 3	Листов 3	
ИПН НГТУ						
М19-ТМО						
Формат А1						

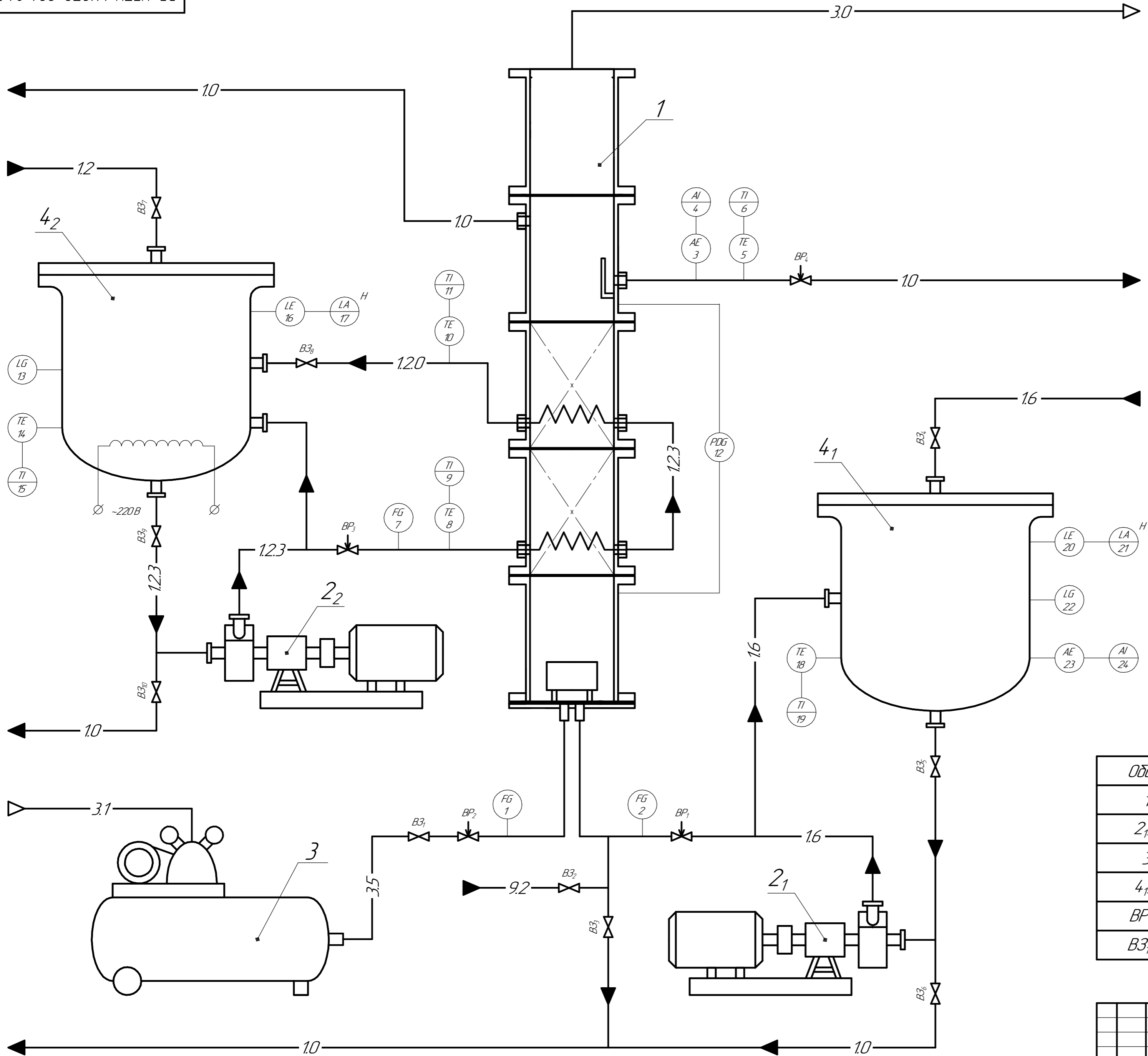


Таблица условных обозначений

Условное обозначение	Наименование среды
1.0	Вода сточная
1.2	Вода техническая
1.2.0	Вода техническая отработанная
1.2.3	Вода техническая горячая
1.6	Вода очищенная
3.0	Воздух отработанный
3.1	Воздух атмосферный
3.5	Воздух сжатый
9.2	Индикатор (20%-ый раствор NaCl)

Точки замера и контроля

Обозначение	Контролируемый параметр	Примечание
ТГ, ТЕ, ТИ	Температура	
FG	Расход	
АЕ, АИ	Концентрация	
PDG	Разность давлений	
LE, LA	Уровень (сигнализация)	
LG	Уровень	

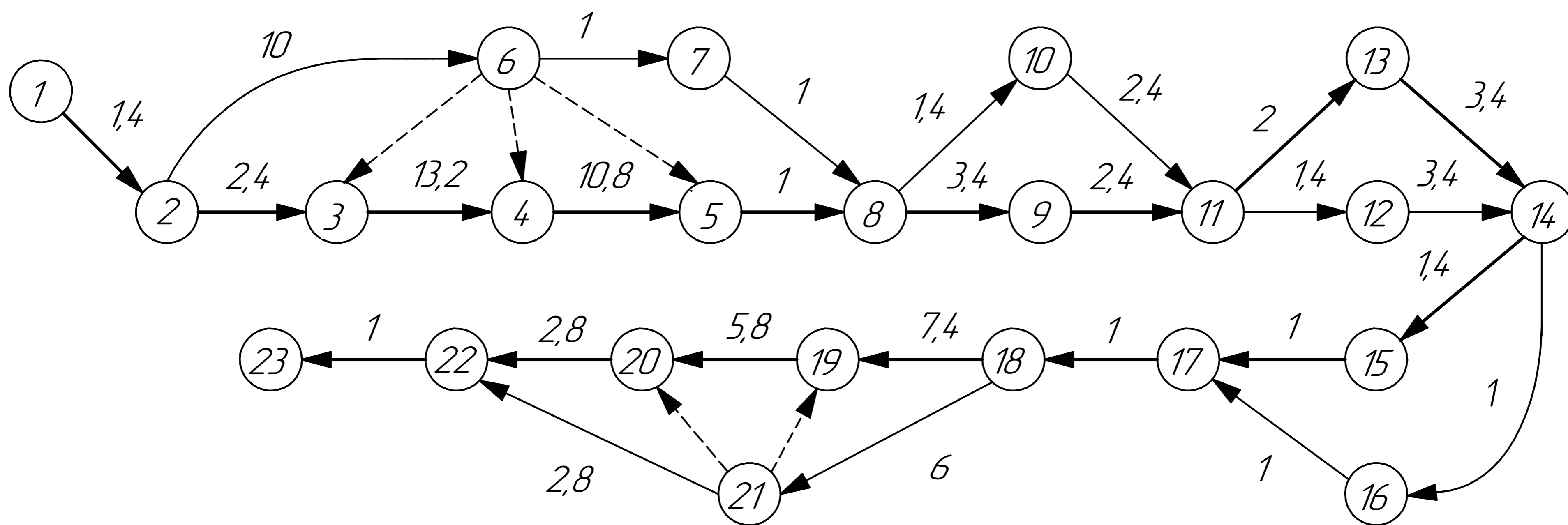
Экспликация оборудования и трубопроводной арматуры

Обозн.	Наименование	Кол.	Примечание
1	Колонна лабораторная	1	D=200 мм
2 ₁₋₂	Насосы вихревые	2	Q=3,6 м ³ /ч
3	Компрессор паршивой	1	Q=12,3 м ³ /ч
4 ₁₋₂	Емкости	2	V=0,25 м ³
BP ₁₋₄	Вентиль регулирующий	4	
BZ ₁₋₁₀	Вентиль запорный	10	

				БР-НГТУ-М19Т0-001-21 ТЗ				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Стенд лабораторный Технологическая схема	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.	У	Васильев П.Д.				У		
Проб.		Сидягин А.А.				Лист		Листов 1
Т.контр.								
Н.контр.		Балахнин И.А.			ДПИ НГТУ М19-ТМО			
Утв.		Ликав В.А.			Копирован Формат А2			

Перв. примен.
Справ. №
Подп. и дата
Изм. № и дата
Взам. инв. №
Подп. и дата
Изм. № подл.

Сетевой график работ



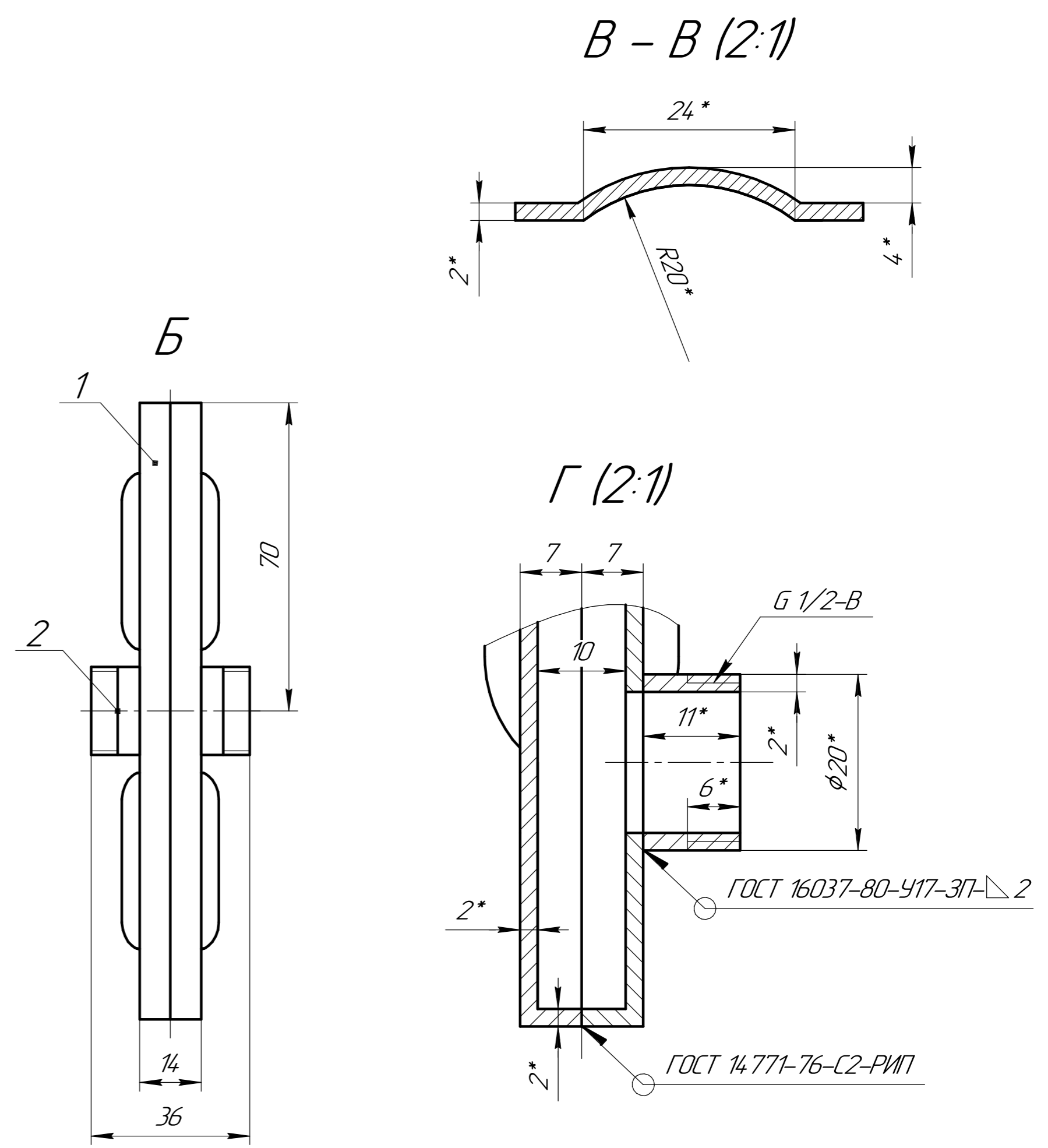
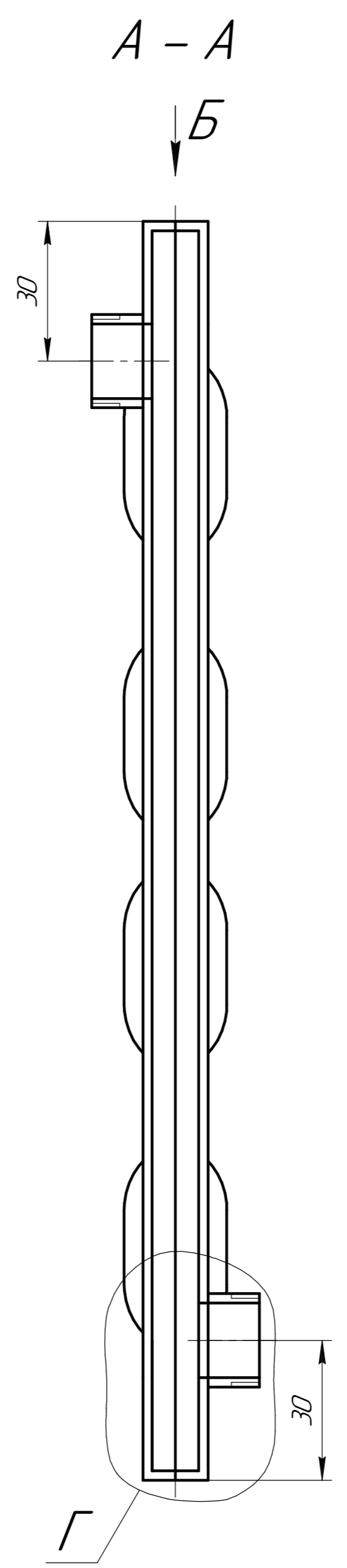
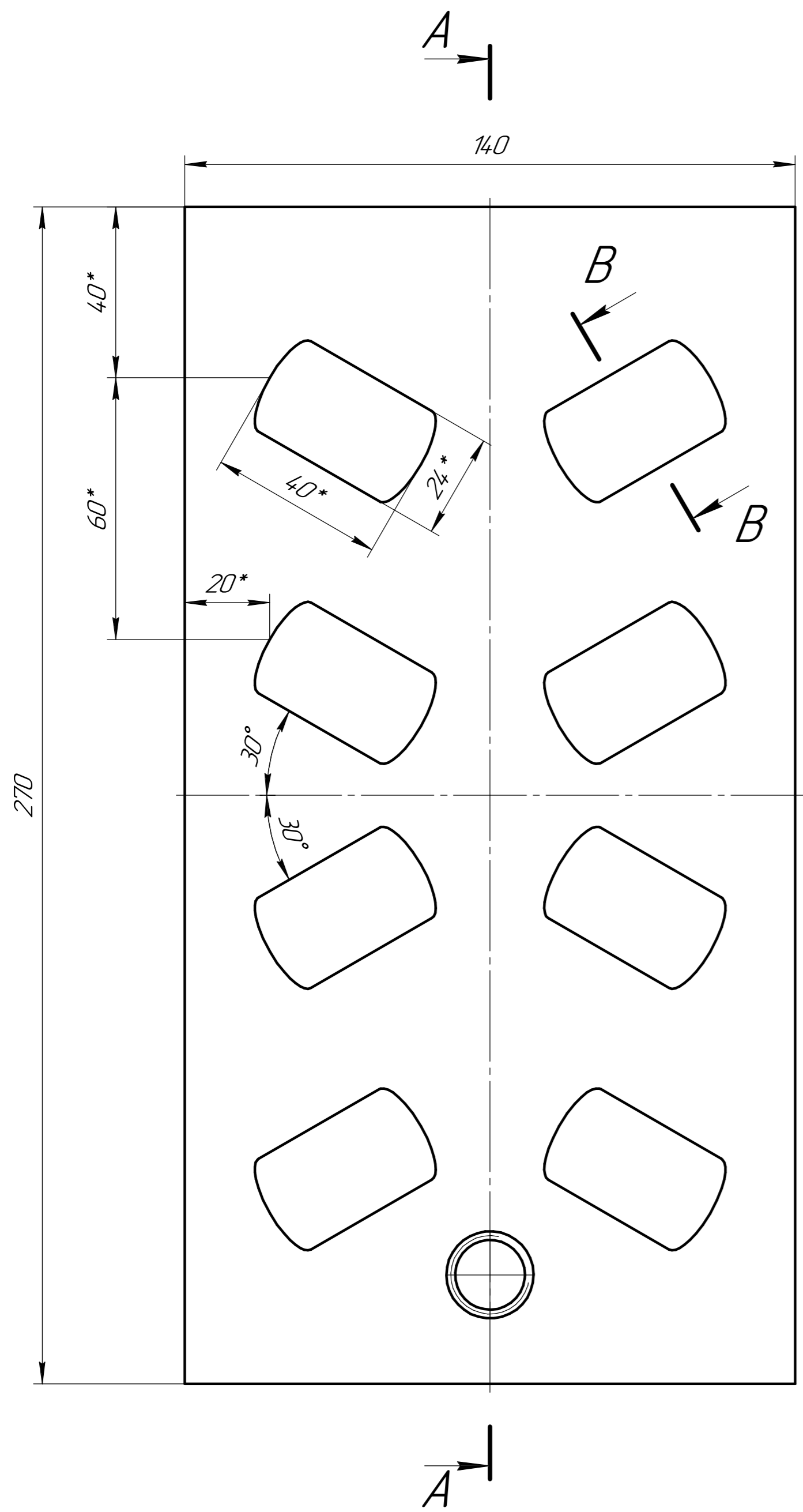
Виды работ и поздние сроки окончания последующих событий

№	Название работы	Поздний срок свершения последующего события, дни	№	Название работы	Поздний срок свершения последующего события, дни
1 - 2	Изучение задания	14	11 - 13	Установка вспомогательного оборудования	36,6
2 - 3	Обоснование конструкции и подбор материалов	3,8	12 - 14 13 - 14	Подключение коммуникаций и монтаж трубопровода	40
2 - 6	Проведение консультаций	26,8	14 - 15	Установка средств КИПиА	41,4
3 - 4	Проектировочный расчет	17	14 - 16	Подключение вспомогательного оборудования к сети	41,4
4 - 5	Разработка чертежей	27,8	15 - 17 16 - 17	Установка щита управления	42,4
5 - 8 7 - 8	Завершение проектирования	28,8	17 - 18	Проведение пуска и наладки стенда	43,4
6 - 7	Согласование установки стенда	27,8	18 - 19	Проведение исследований	50,8
8 - 9	Заготовка материалов и оборудования	32,2	18 - 21	Проведение консультаций	56,6
8 - 10	Изготовление внутренних устройств	32,2	19 - 20	Обработка экспериментальных данных	56,6
9 - 11 10 - 11	Монтаж опоры и площадки обслуживания	34,6	20 - 22 21 - 22	Оформление результатов	59,4
11 - 12	Монтаж лабораторной колонны	36,6	22 - 23	Завершение исследований	60,4

Общая смета затрат на лабораторный стенд

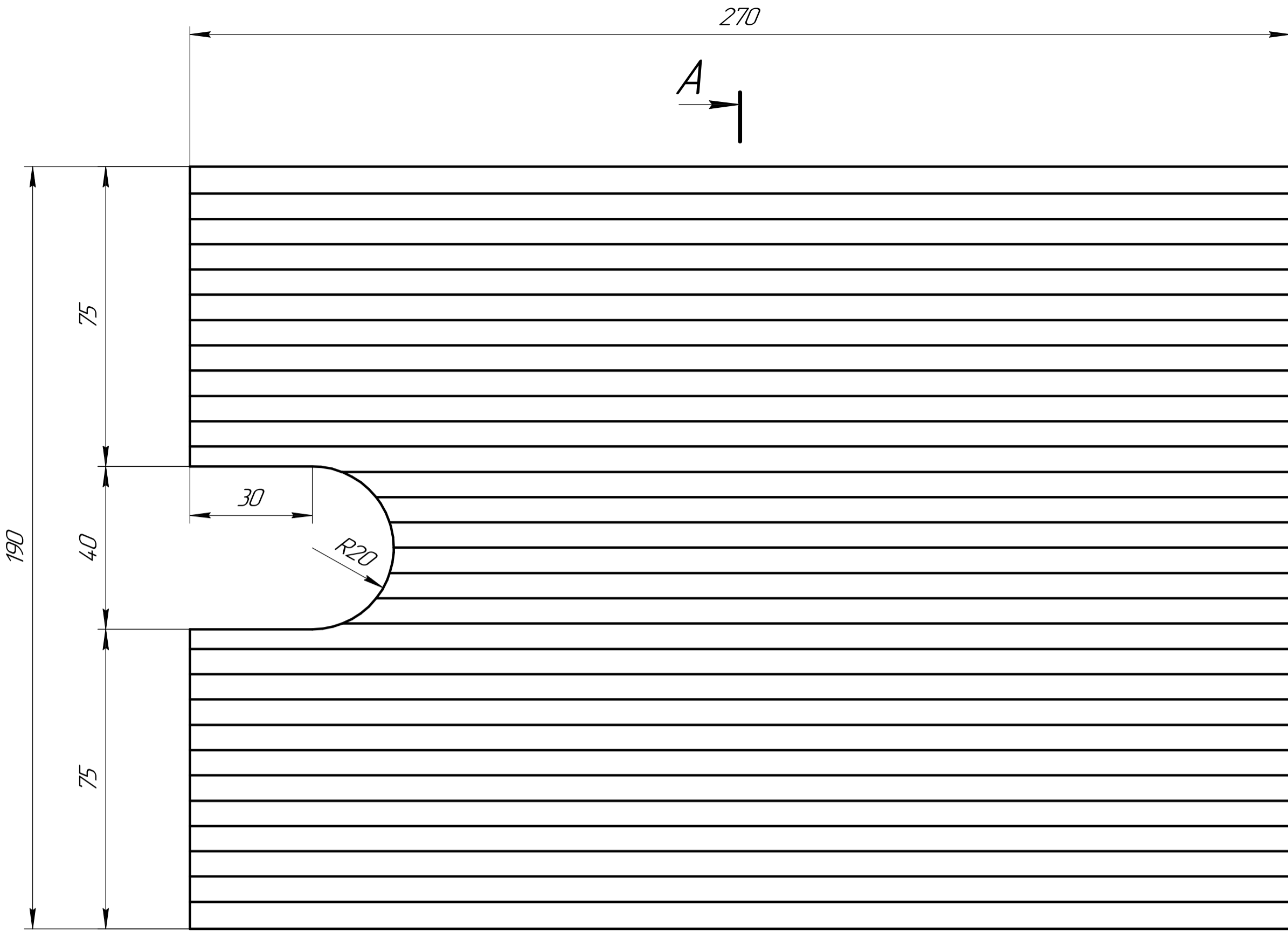
№	Наименование затрат	Материалы, руб.	Энергия, руб.	Зарплата, руб.	Сумма, руб.
1	Проектирование	1000	315	9986	11301
2	Монтаж	304870	-	9842	314712
3	Исследования	-	3310	8241	11551
4	Прочие затраты	7000	-	-	7000
Итого		312370	3625	28069	344065

Изм. №	Изм. №	Изм. №	Изм. №	Изм. №
Дата	Дата	Дата	Дата	Дата
Подп.	Подп.	Подп.	Подп.	Подп.
Изм. №	Изм. №	Изм. №	Изм. №	Изм. №
Дата	Дата	Дата	Дата	Дата
Подп.	Подп.	Подп.	Подп.	Подп.
Изм. №	Изм. №	Изм. №	Изм. №	Изм. №
Дата	Дата	Дата	Дата	Дата
Подп.	Подп.	Подп.	Подп.	Подп.



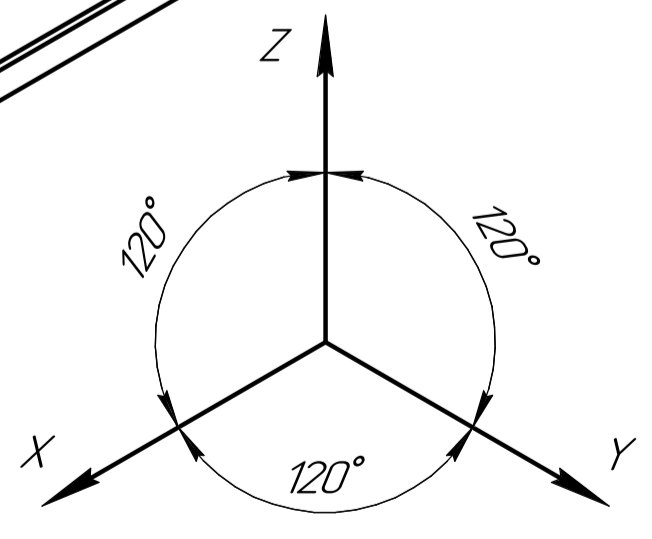
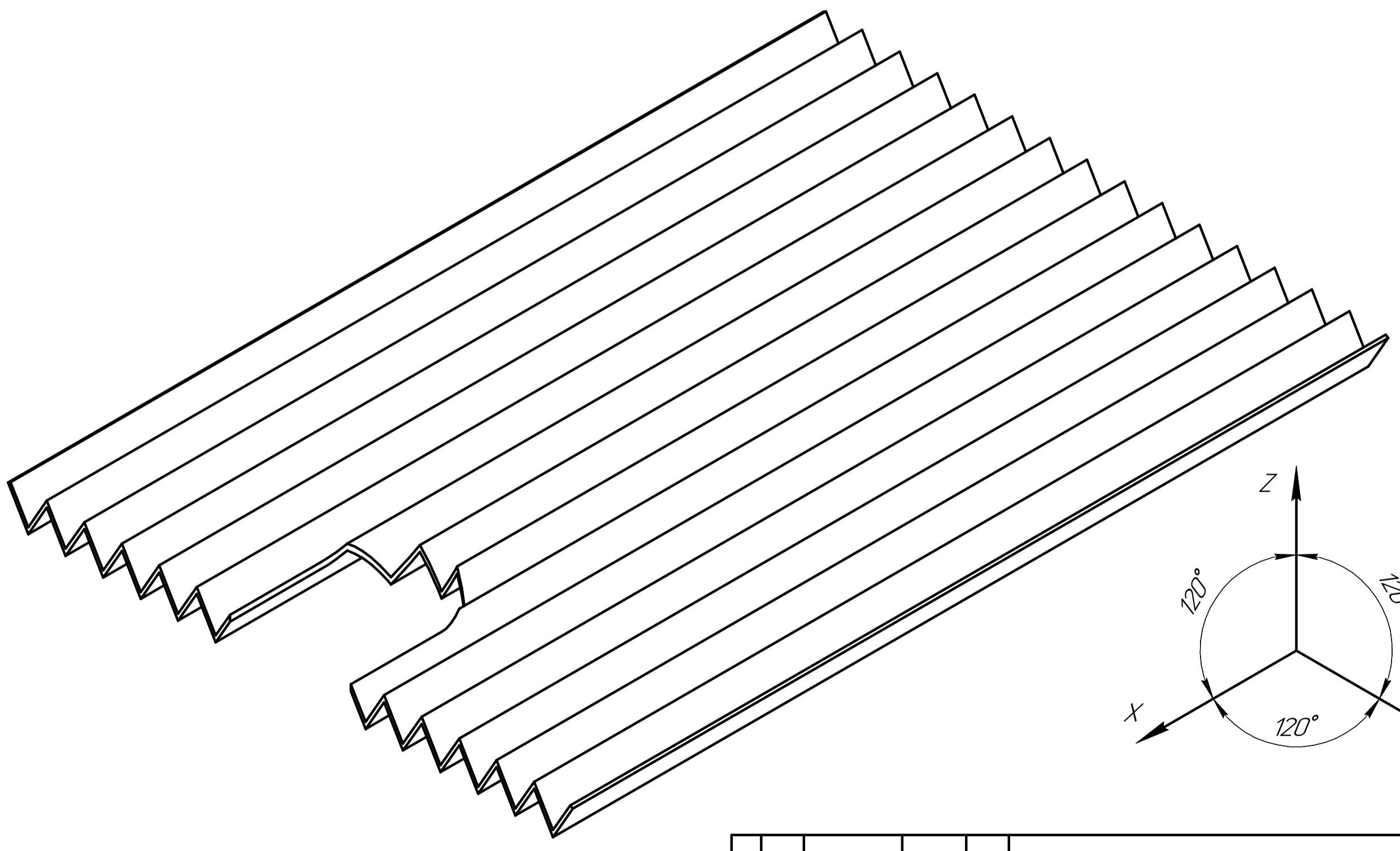
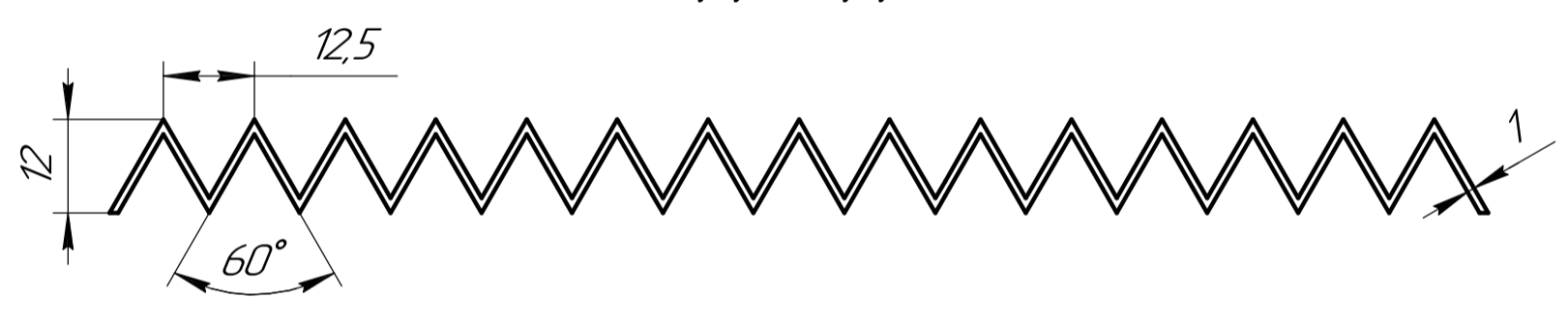
1 * - Размеры для справок.

BP-HГТУ-M19TO-005-21 CB				Лит.	Масса	Масштаб
Малый теплообменный модуль Сборочный чертёж				У	3	1:1
Изм. №	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		
Разраб.	Васильев П.Д.					
Проб.	Сидягин А.А.					
Т.контр.						
Н.контр.	Балахнин И.А.					
Утв.	Дикаев В.А.					
				Лист	Листов	1
				ДПИ НГТУ М19-ТМО		
				Формат А2		



A

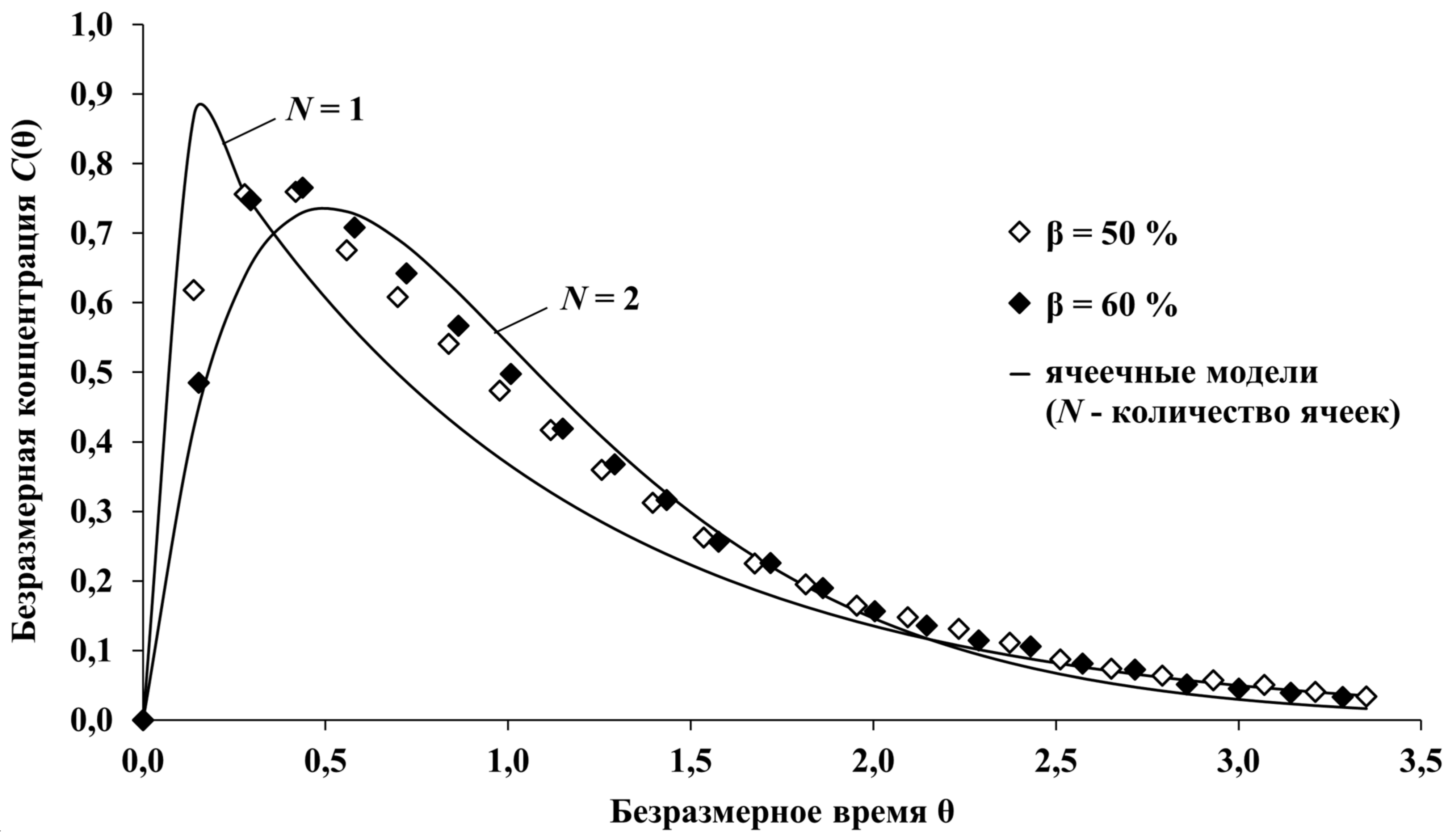
A - A



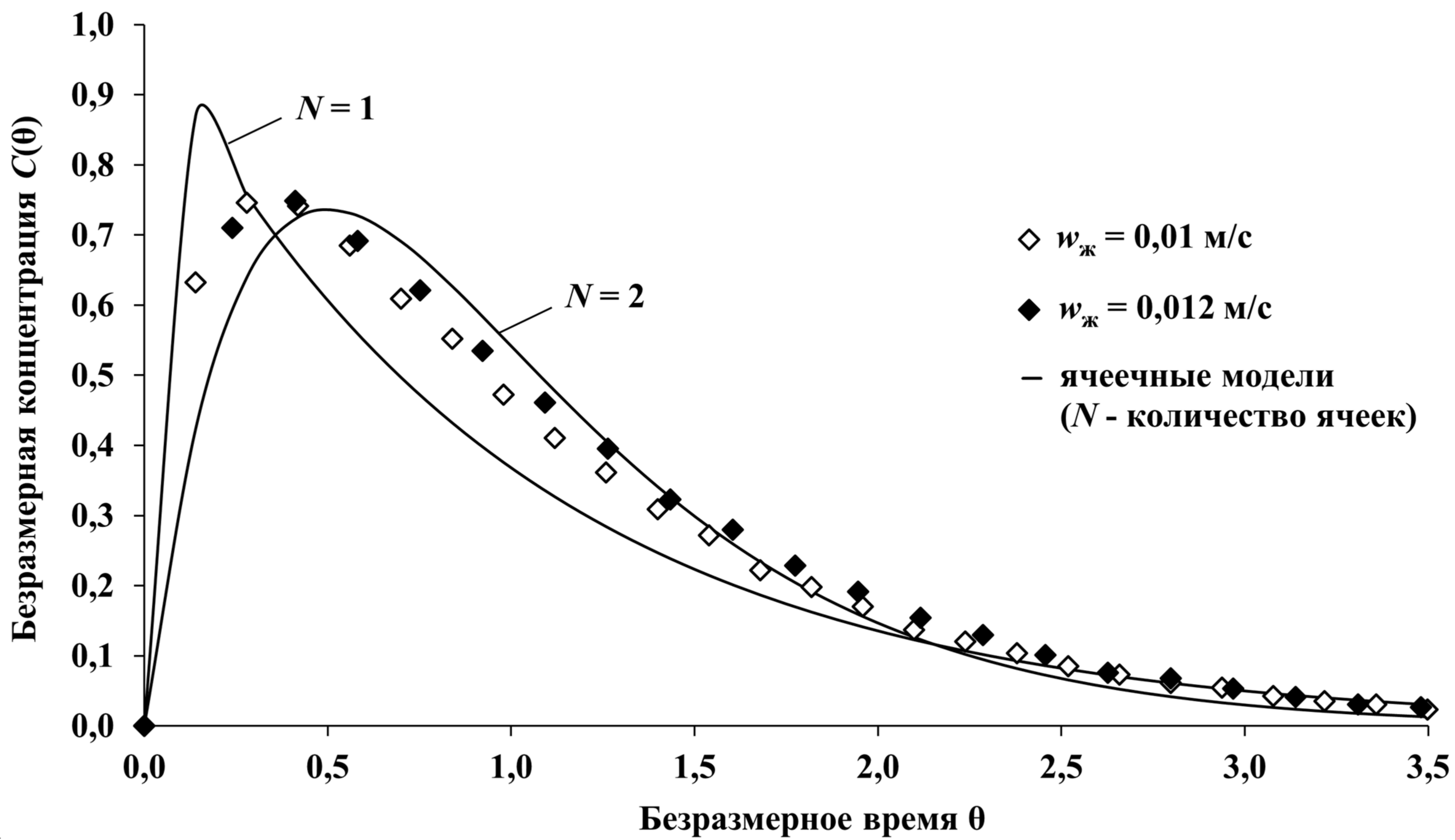
Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инд. № д/д	Подп. и дата	Справ. №	Перв. примен.
--------------	--------------	--------------	------------	--------------	----------	---------------

BP-НГТУ-М19Т0-006-21							
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лит.	Масса	Масштаб
		Разраб.	Васильев П.Д.		У	0,1	1:1
		Проб.	Сидягин А.А.		Листов 1		
		Т.контр.			Листов 1		
		Н.контр.	Балахнин И.А.		ДПИ НГТУ		
		Чтб.	Диков В.А.		М19-ТМО		
ABS-пластик						Формат А2	
Копировал						Формат А2	

Кривые отклика пустотелой барботажной колонны на импульсные возмущения при постоянной фиктивной скорости жидкости $w_{ж} = 0,012$ м/с и различных расходных газосодержаниях β



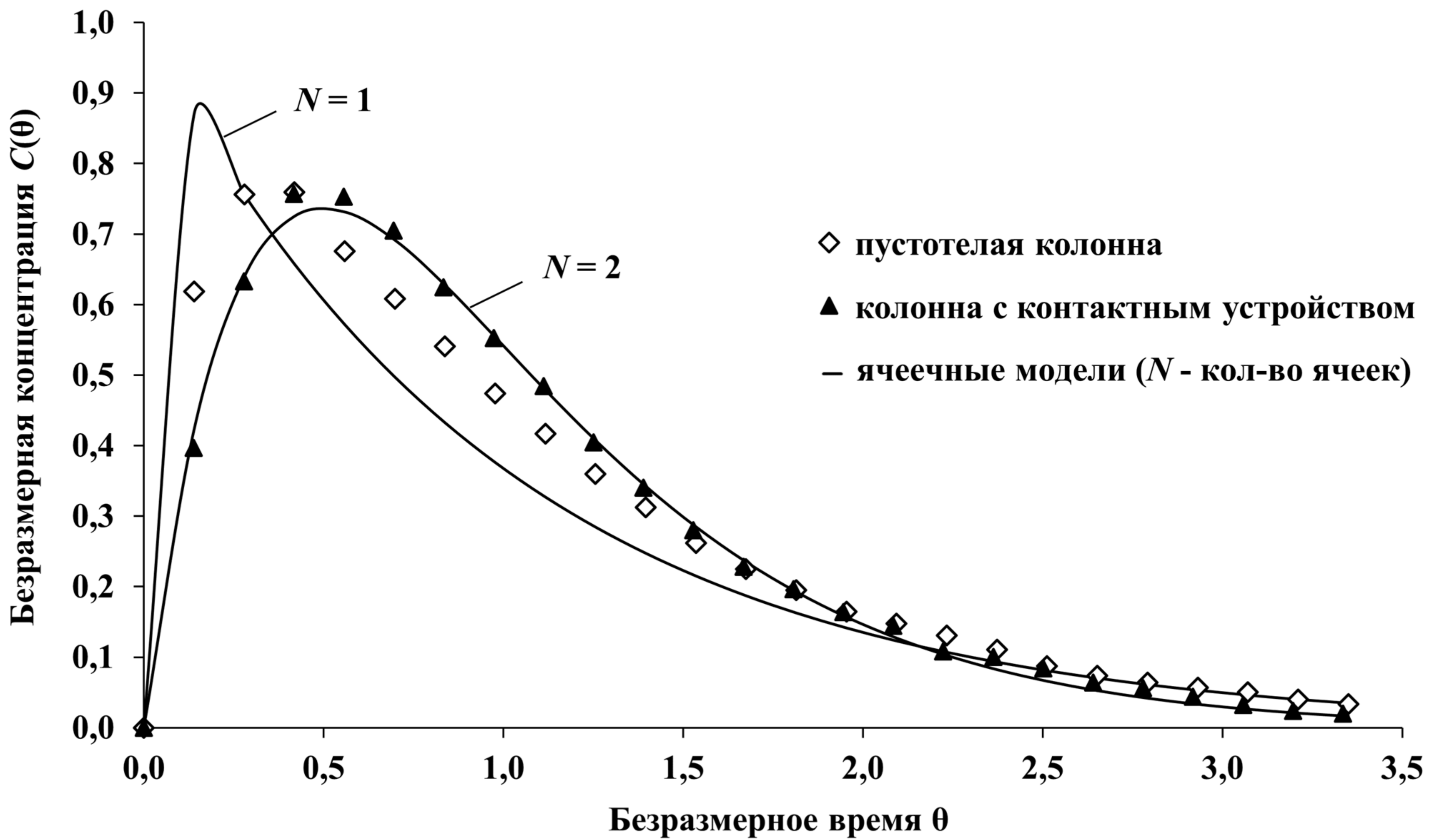
Кривые отклика пустотелой барботажной колонны на импульсные возмущения при постоянном расходном газосодержании $\beta = 70\%$ и различных фиктивных скоростях жидкости $w_{ж}$



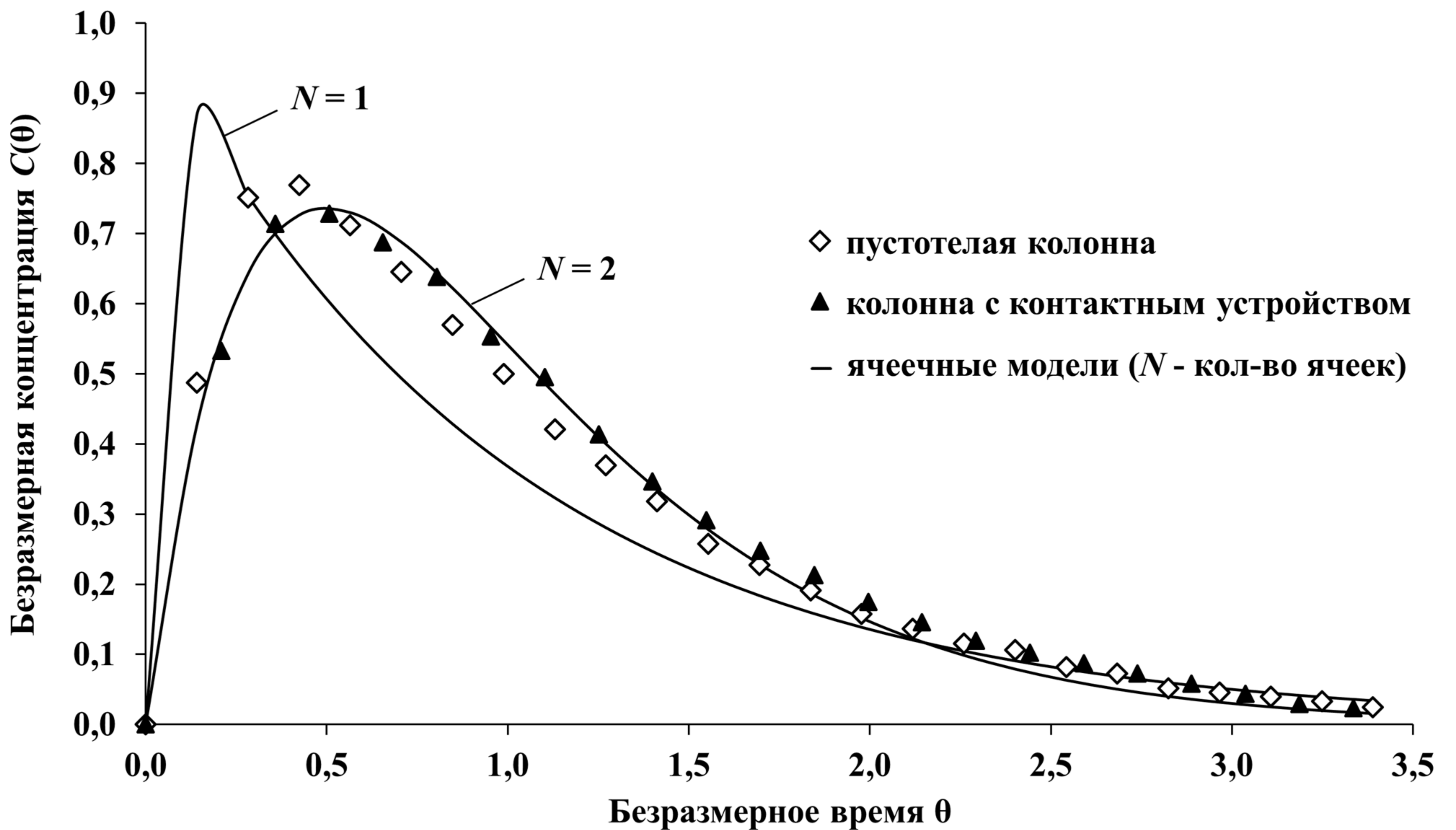
Изд. № 1000
Лист № 1
Справа №
Лист № 1
Лист № 1
Лист № 1
Лист № 1
Лист № 1

				ВР-НГТУ-М19Т0-007-21		
Изд.	Лист	№ докум.	Лист	Лист	Лист	Лист
Разраб.	Васильев П.А.	Лист	Лист	Лист	Лист	Лист
Проб.	Сидякин А.А.	Лист	Лист	Лист	Лист	Лист
Техн.р.		Лист	Лист	Лист	Лист	Лист
Исполн.	Балахнин И.А.	Лист	Лист	Лист	Лист	Лист
Удп.	Дьяков В.А.	Лист	Лист	Лист	Лист	Лист
				Результаты исследований		
				Лист	1	Листов
				3		
				ДПИ НГТУ		
				М19-ТМО		
				Формат А1		

Кривые отклика барботажной колонны на импульсные возмущения при расходном газосодержании $\beta = 50\%$ и фиктивной скорости жидкости $w_{ж} = 0,012$ м/с



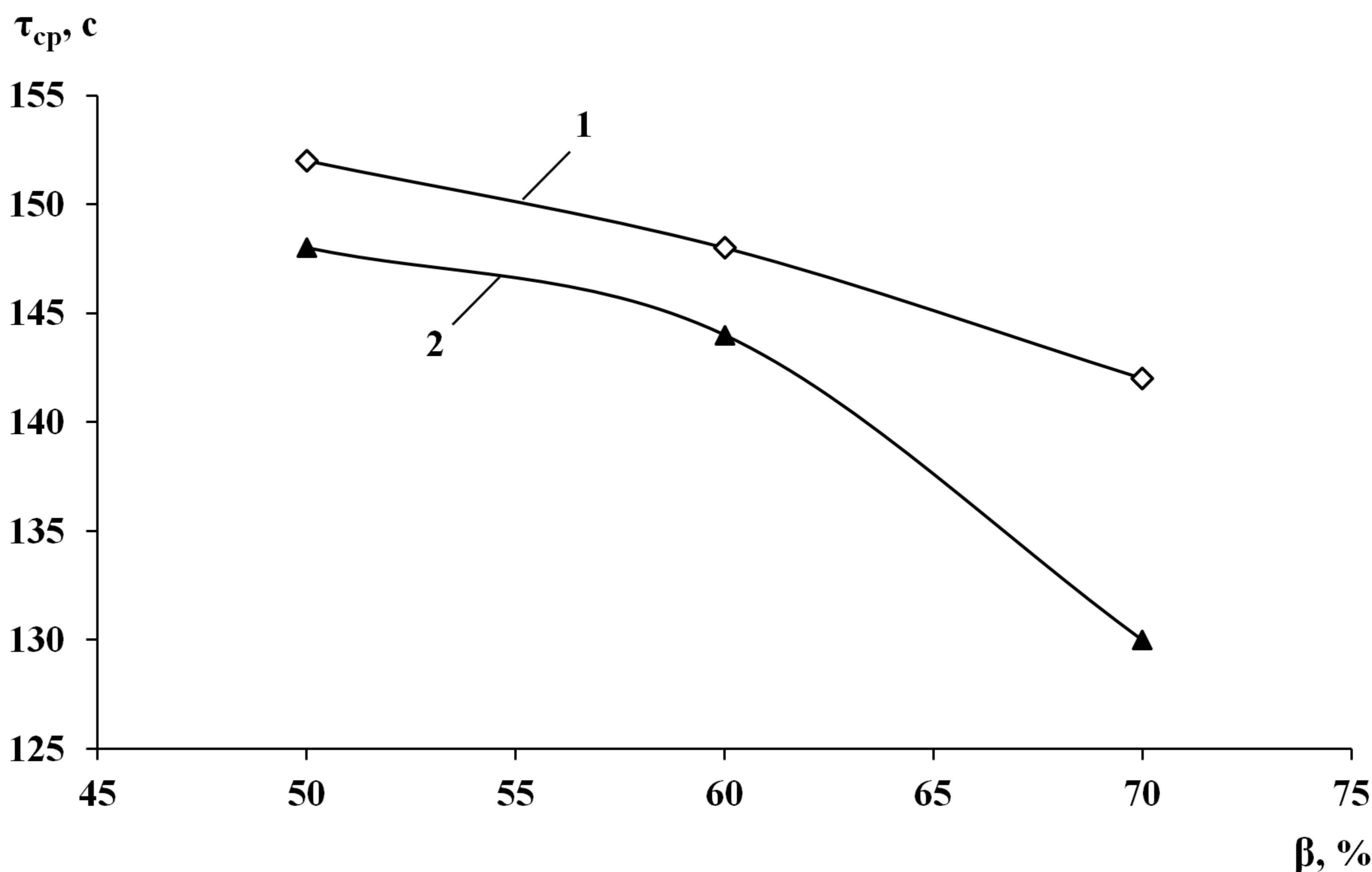
Кривые отклика барботажной колонны на импульсные возмущения при расходном газосодержании $\beta = 60\%$ и фиктивной скорости жидкости $w_{ж} = 0,012$ м/с



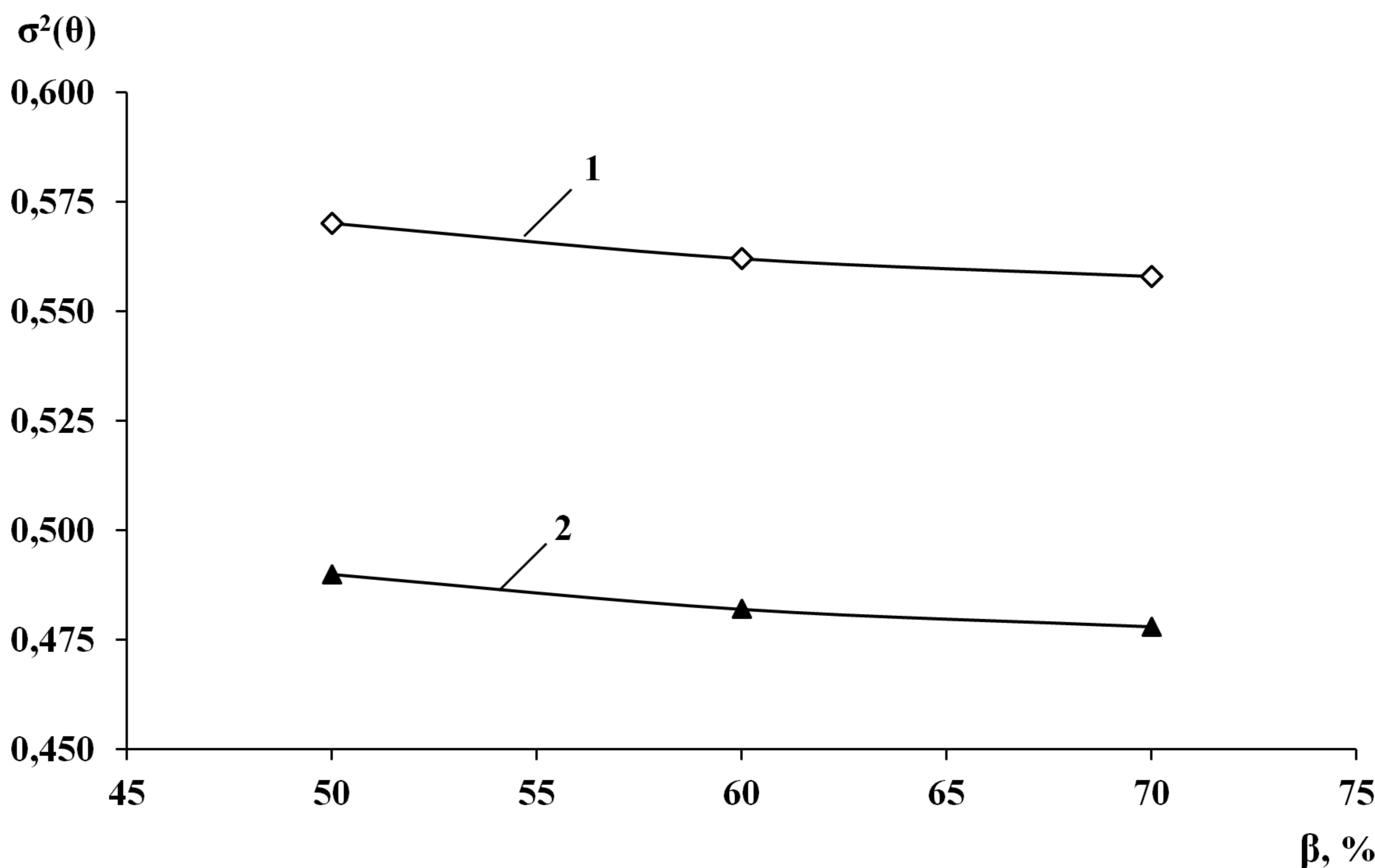
Лист 2 из 3
 Дата: _____
 Имя: _____
 Подпись: _____

				ВР-НГТУ-М19Т0-007-21		
Изд.	Лист	№ докум.	Лист	Дата	Результаты исследований	
Разраб.	Васильев П.Д.				Лист	2
Проб.	Сидягин А.А.				Листов	3
Контр.					ДПИ НГТУ	
Исполн.	Балахнин И.А.				М19-ТМО	
Удб.	Дьяков В.А.				Формат А1	

Зависимость среднего времени пребывания частиц жидкости τ_{cp} от расходного газосодержания β при постоянной фиктивной скорости жидкости $w_{ж} = 0,012$ м/с



Зависимость безразмерной дисперсии распределения частиц жидкости $\sigma^2(\theta)$ от расходного газосодержания β при постоянной фиктивной скорости жидкости $w_{ж} = 0,012$ м/с



Сплошными линиями на графиках обозначены экспериментальные кривые, построенные по опытным точкам: кривая 1 (маркер \diamond) – для пустотелой барботажной колонны; кривая 2 (маркер \blacktriangle) – для колонны с контактным устройством.

				ВР-НГТУ-М19Т0-007-21		
Изд.	Лист	№ докум.	Лист	Результаты исследований		
Разраб.	Васильев П.Д.	Лист	Лист	Лист	Масштаб	Масштаб
Проб.	Сидягин А.А.			у		
Техн.пр.				Лист 3	Листов 3	
Исполн.	Балахнин И.А.			ДПИ НГТУ		
Удп.	Дьяков В.А.			М19-ТМО		
				Формат А1		

Изд. № 001
Лист № 001
Всего листов 3
Лист № 001
Лист № 001
Лист № 001