

Министерство образования и науки Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»**

Гатапова Н.Ц., Пахомов А.Н., Пахомова Ю.В., Алексеева Н.В.

**ИНЖЕНЕРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ**

Учебно-методическое издание

УДК 66.011(075.8)
ББК Л11я73-5
И-622

Аттестовано Методическим советом университета
(Протокол № 9 от 19 ноября 2013 г.)

Р е ц е н з е н т
Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
К.В. Брянкин

И-622 Инженерная оптимизация технологических процессов и аппаратов
[Электронный ресурс]: учебно-метод. изд. / Н.Ц. Гатапова, А.Н. Пахомов,
Ю.В. Пахомова, Н.В. Алексеева. – Тамбов, 2014. – 36 с.

Рассматриваются методы инженерной оптимизации в технологических процессах и аппаратах на примерах перекачивания жидкостей по трубопроводам, выбора оптимальной с точки зрения потребления греющего пара технологической схемы ректификационной установки и определения экономически обоснованной толщины теплоизоляции теплового оборудования.

Предназначено для магистрантов, обучающихся по направлению 241000 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, биотехнологии и нефтехимии».

УДК 66.011(075.8)
ББК Л11я73-5

Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.
Нелегальное копирование и использование данного продукта запрещено.

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»), 2014

Содержание

Введение.....	4
Лабораторная работа № 1. Определение оптимального диаметра трубопровода.....	5
Лабораторная работа № 2. Выбор оптимальной обвязки ректификационной колонны.....	21
Лабораторная работа № 3. Определение оптимальной толщины теплоизоляции.....	30
Список рекомендуемой литературы.....	35

Введение

На сегодняшний день в промышленности наиболее остро стоит вопрос повышения энергоэффективности существующих производств и разработка новых энерго-ресурсосберегающих технологий.

Каким образом можно уменьшить размеры теплообменного аппарата, не снижая его тепловой нагрузки? Или каким образом снизить общее энергопотребление технологической линии при сохранении требуемой мощности производства? Какая комбинация варьируемых параметров наилучшая для достижения цели оптимизации? Для решения подобных задач используются методы инженерной оптимизации, использование которых позволяет находить оптимальную конструкцию аппарата или конфигурацию технологической системы, удовлетворяющую определенным критериям. Фактически, инженерная оптимизация - это генерация решений на основе численного анализа для ускорения разработки оптимальных решений.

В представленной учебно-методической разработке рассматриваются методы инженерной оптимизации в технологических процессах и аппаратах на примерах перекачивания жидкостей по трубопроводам, выбора оптимальной с точки зрения потребления греющего пара технологической схемы ректификационной установки и определения экономически обоснованной толщины теплоизоляции теплового оборудования.

Пособие в виде лабораторного практикума предназначено для подготовки магистров по направлению 241000 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» и для всех интересующихся вопросами энерго-ресурсосбережения в области технологических процессов и аппаратов.

Лабораторная работа № 1

Определение оптимального диаметра трубопровода

Цель работы: рассчитать и выбрать значение экономически целесообразного диаметра трубопроводной системы в условиях работы определенного предприятия.

Теоретические положения

Передача технологических жидкостей по трубопроводу является одним из самых распространенных технологических процессов. В общем случае трубопровод представляет собой непосредственно трубу, состоящую из отдельных участков соединенных между собой определенным способом. На трубопроводе устанавливается различная запорная и контролирующая аппаратура. Трубопровод может изменять направление и высоту над уровнем моря. Для создания напора жидкости на трубопроводе устанавливается насосное оборудование. Основой расчета трубопровода является определение его гидравлического сопротивления. Гидравлическое сопротивление зависит от режима течения жидкости, длины и диаметра трубопровода, материала трубы и состояния ее внутренней поверхности, а также от наличия и величины местных сопротивлений. Расчет гидравлического сопротивления трубопровода подробно описан в литературе [1-6]. Однако такой расчет требует знания диаметра трубопровода. Как правило, изначально известен маршрут трубопровода и расход жидкости. Выбор диаметра трубопровода является отдельной технико-экономической задачей и зависит как от гидравлического сопротивления трубопровода, так и от сформировавшихся на текущий момент цен на его монтаж и обслуживание.

Рассмотрим основные факторы, влияющие на величину гидравлического сопротивления трубопровода и соответственно на выбор диаметра трубопровода.

Местными сопротивлениями называются, в отличие от сопротивлений по длине, сосредоточенные на коротких участках трубопровода потери напора, вызванные местным отрывом вихрей, а также нарушением структуры потока. К основным видам местных сопротивлений можно отнести внезапное расширение, внезапное сужение, диффузор, конфузор, закругление (поворот) и диафрагма (вентиль) [1-3, 6]. Их схемы представлены на рис. 1.

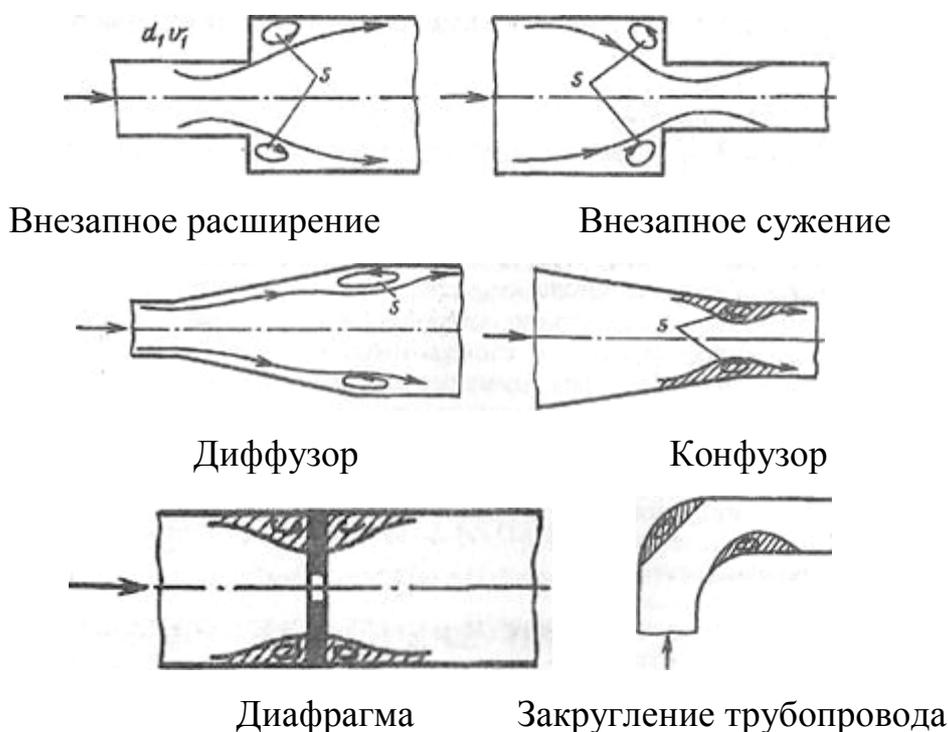


Рис. 1. Основные виды местных сопротивлений.

К местным сопротивлениям, в частности, относятся участки трубопроводов, имеющих переходы с одного диаметра на другой, колена, раструбы, тройники, крестовины, всякого рода запорные устройства и приспособления (краны, задвижки, вентили, клапаны), а также фильтры,

сетки, специальные устройства входа и выхода к насосам (диффузоры, конфузоры).

Учет местных сопротивлений играет решающую роль при расчете гидравлически коротких трубопроводах, где величина потерь энергии на местных сопротивлениях сравнима с потерями по длине. Практически любое местное сопротивление приводит к резкому изменению характера течения, сопровождаемого изменением местных скоростей как по величине, так и по направлению.

На практике, для определения потерь энергии на местных сопротивлениях применяется формула Вейсбаха, выражающая потери в долях скоростного напора:

$$h = \chi \frac{w^2}{2g}$$

где неизвестный коэффициент пропорциональности ζ называется коэффициентом местного сопротивления.

В качестве скорости w принимается скорость на участке трубопровода, либо до него. От этого будет зависеть численное значение коэффициента ζ , поэтому необходимо специально оговаривать, по отношению к какой скорости вычислен коэффициент местного сопротивления. В общем случае коэффициент ζ зависит от геометрической формы местного сопротивления и числа Re .

Коэффициент ζ принимается постоянным для данного вида местного сопротивления. Однако экспериментальные исследования показали, что это условие соблюдается только при больших числах Рейнольдса ($Re > 10^4$). При меньших величинах Re значения коэффициента ζ существенно зависят от числа Рейнольдса. Справочные значения ζ относятся к случаю, когда местное сопротивление работает в условиях автомодельности по числу Re , т.е. не зависит от его числового значения. Значения ζ , приводимые в справочниках, следует считать ориентировочными. Для уточнения данных о конкретном местном сопротивлении необходимо провести экспериментальное

исследование в требуемом диапазоне чисел Re . Однако, есть случаи, когда величина потерь энергии на местном сопротивлении может быть определена теоретически, например, при внезапном расширении потока.

В таблице 1 приведены значения некоторых коэффициентов местных сопротивлений [3-4].

Таблица 1. Коэффициенты местного сопротивления

N п.п.	Местное сопротивление	Коэффициент местного сопротивления
1	Задвижка	0.5
2	Вентиль с косым шпинделем	0.5
3	Вентиль с вертикальным шпинделем	6.0
4	Обратный клапан нормальный	7.0
5	Обратный клапан «захлопка»	3.0
6	Кран проходной	2
7	Компенсатор однолинзовый без рубашки	1.6 - 0.5
8	Компенсатор однолинзовый с рубашкой	0.1
9	Компенсатор сальниковый	0.3
10	Компенсатор П-образный	2.8
11	Отводы, гнутые под углом 90°	-
12	со складками $R=3d$	0.8
13	со складками $R=4d$	0.5
14	гладкие $R=1d$	1.0
15	гладкие $R=3d$	0.5

№ п.п.	Местное сопротивление	Коэффициент местного сопротивления
16	гладкие $R=4d$	0.3
17	Отводы сварные одношовные под	-
18	углом 30°	0.2
19	углом 45°	0.3
20	углом 60°	0.7
21	Отводы сварные двухшовные	-
22	под углом 90°	0.6
23	то же, трехшовные	0.5
24	Тройник при слиянии потока:	-
25	проход	1.2
26	ответвление	1.8
27	Тройник при разветвлении потока:	-
28	проход	1.0
29	ответвление	1.5
30	Тройник при встречном потоке	3.0
31	Внезапное расширение	1.0
32	Внезапное сужение	0.5
33	Грязевик	10

Технологические трубопроводы в зависимости от давления транспортируемой среды различают: вакуумные (ниже 1 кгс/см^2), низкого давления (от 1 до 15 кгс/см^2), среднего давления (от 16 до 100 кгс/см^2), высокого давления (свыше 100 кгс/см^2) и безнапорные, т. е. работающие без избыточного давления.

По роду транспортируемых продуктов технологические трубопроводы делятся на газопроводы, водопроводы, паропроводы, кислотопроводы, щелочепроводы, маслопроводы, бензопроводы, нефтепроводы, рассолопроводы и др. Газопроводы, в свою очередь, подразделяются на воздушные (воздухопроводы), ацетиленовые, кислородные, аммиачные, хлорные.

Транспортируемые по трубопроводам продукты по степени агрессивности разделяются на следующие:

неагрессивные и малоагрессивные, вызывающие коррозию, скорость которой не превышает 0,1 мм в год;

среднеагрессивные, вызывающие коррозию, скорость которой находится в пределах от 0,1 до 0,5 мм в год;

высокоагрессивные, вызывающие коррозию, скорость которой выше 0,5 мм в год.

Для трубопроводов, транспортирующих среднеагрессивные продукты применяют трубы из углеродистой стали с повышенной толщиной стенки с учетом прибавки на коррозию (2—5 мм). Для трубопроводов, транспортирующих высокоагрессивные продукты, в зависимости от их свойств используют трубы из высоколегированных сталей, биметаллические, из цветных металлов, неметаллические и футерованные внутри коррозионностойкими материалами.

Технологические трубопроводы в зависимости от места их расположения разделяются на внутрицеховые (соединяющие между собой отдельные аппараты и машины в пределах одной установки, цеха) и межцеховые, соединяющие между собой отдельные установки, цеха. Внутрицеховые трубопроводы в практике получили название «обвязочные трубопроводы».

Изготовление и монтаж технологических трубопроводов осуществляют в соответствии со «Строительными нормами и правилами. Технологические трубопроводы. Правила производства и приемки работ».

Указанными нормами и правилами все технологические трубопроводы делятся на пять групп и категорий (табл. 2) [10, 12].

Таблица 2. Классификация технологических трубопроводов

		Категории									
		I		II		III		IV		V	
Группа	Наименование среды	Рабочее давление, кгс/см ²	Температура, °С	Рабочее давление, кгс/см ²	Температура, °С	Рабочее давление, кгс/см ²	Температура, °С	Рабочее давление, кгс/см ²	Температура, °С	Рабочее давление, кгс/см ²	Температура, °С
А	Продукты с токсическими свойствами:										
	а) сильнодействующие ядовитые вещества (СДЯВ) и дымящиеся кислоты	Независимо	От —70 до 700								
	б) прочие продукты с токсическими свойствами	Свыше 16	От —70 до 700	До 16	От —70 до 350	—	—	—	—	—	—
Б	Горючие и активные газы, легковоспламеняющиеся и	Независимо	От 350 до 700	От 25 до 64	От 250 до 350 и от 70 до 0	От 16 до 25	От 120 до 250 и от 70 до 0	До 16	От 70 до 120	—	—

	горючие жидкости										
В	Перегретый водяной пар	То же	От 450 до 660	До 39	От 350 до 450	До 22	От 250 до 350	До 16	От 120 до 250		
Г	Горячая вода и насыщенный водяной пар	Свыше 184	Свыше 120	От 80 до 184	Свыше 120	16-80	Свыше 120	От 2 до 16	Свыше 120	—	—
Д	Негорючие жидкости и пары, инертные газы	Независимо	От 450 до 700	От 64 до 100	От 350 до 450 и от 70 до 0	25—64	От 250 до 350 и от 70 до 0	До 25	От 120 до 250 и от 70 до 0	До 16	От 0 до 120

Для обозначения элементов трубопроводных систем на технологических схемах применяются определенных условные обозначения. Основные условные обозначения элементов трубопроводов представлены в таблице 3 [5].

Таблица 3. Условные обозначения основных элементов трубопроводов

Трубопровод	
Соединение трубопроводов	
Перекрещивание трубопроводов (без соединения)	
Трубопровод с вертикальным стояком	
Трубопровод гибкий	
Изолированный участок трубопровода	
Трубопровод в трубе (футляре)	
Подвеска:	
неподвижная	
направляющая	
упругая (пружинная)	
Детали соединения трубопроводов:	
тройник	
крестовина	
колено, отвод	
коллектор, гребенка	
сильфон	
Разъемные соединения трубопроводов:	
общее обозначение	
фланцевое	
штуцерное резьбовое	
Переход:	
общее обозначение	
фланцевый	
штуцерный	
Компенсатор:	
общее обозначение	
П-образный линзовый	

Таблица 3. Продолжение

Клапан обратный (невозвратный):	
проходной	
угловой	
Клапан дроссельный	
Клапан редукционный	
Задвижка	
Кран:	
проходной	
угловой	
Кран трехходовой	
Конденсатоотводчик	
Граница элемента	
Позиция элемента	
Обозначение узла:	
1 — порядковый номер узла	
3 — число узлов в линии	

Основные размеры труб выбирают в зависимости от расчетного давления и температуры с учетом коррозионной активности среды. За расчетное давление принимают максимальное рабочее давление, за расчетную температуру — максимальную рабочую температуру по проектной документации.

Трубы изготавливаются в соответствии с нормативно-технической документацией, представленной в таблице 4. [10, 12]

Таблица 4. Нормативно-техническая документация на трубы

<i>Марка стали</i>	<i>НТД на трубы</i>	<i>НТД на сталь</i>
<i>Бесшовные трубы</i>		
10, 20	ТУ 10-3-90	ГОСТ 1050
20, 15ГС	ТУ 14-3-460	ТУ 14-3-460
20	ГОСТ 550 (группа А)	ГОСТ 1050
10Г2	ГОСТ 8731 ГОСТ 8733 (группа В)	ГОСТ 4543
09Г2С	ТУ 14-3-1128	ГОСТ 19281
16ГС	ТУ 108-1267 ТУ 3-923	ТУ 3-923
<i>Прямошовные трубы</i>		
10, 20	ГОСТ 10705 (группа В)	ГОСТ 1050
20	ГОСТ 20295	ГОСТ 1050
17ГС, 17Г1С	ГОСТ 20295	ГОСТ 19281
17ГС, 17Г1С, 17Г1СУТУ	ТУ 14-3-6220	ТУ 14-1-1921 ТУ 14-1-1950
17ГС, 17Г1С, 17Г1СУ	ТУ 14-3-1138	ТУ 14-1-1950
<i>Трубы со спиральным швом*</i>		
20	ТУ 14-3-808	ТУ 41-1-2471
20	ГОСТ 20295	ГОСТ 1050
17ГС, 17Г1С	ГОСТ 20295	ГОСТ 19281
17Г1С, 17Г1СУ	ТУ 14-3-954	ТУ 14-1-4248
* Трубы со спиральным швом применяются только для устройства прямолинейных участков сетей и не могут использоваться для изготовления		

Диаметры труб стандартизованы. Основные размеры стандартных труб представлены в таблицах 5 и 6 [5, 10, 12].

Таблица 5. Перечень стальных труб для устройства сетей теплоснабжения

Диаметр условный, мм	Диаметр наружный, мм	Минимальная толщина стенки труб, мм
25	32	3
32	38	3
40	45	3
50	57	3
65	76	3
80	89	4
100	108	4
125	133	4
150	159	4,5
200	219	6
250	273	7
300	325	7
400	426	7
500	530	7
600	630	8
700	720	8
800	820	9
900	920	9
1000	1020	10

1200	1220	10
------	------	----

Таблица 6. Размеры стальных водогазопроводных труб

Условный проход	Наружный диаметр	Толщина стенки труб			Масса 1 м труб, кг		
		легких	обыкновенных	усиленных	легких	обыкновенных	усиленных
6	10,2	1,8	2,0	2,5	0,37	0,40	0,47
8	13,5	2,0	2,2	2,8	0,57	0,61	0,74
10	17,0	2,0	2,2	2,8	0,74	0,80	0,98
15	21,3	2,35	-	-	1,10	-	-
15	21,3	2,5	2,8	3,2	1,16	1,28	1,43
20	26,8	2,35	-	-	1,42	-	-
20	26,8	2,5	2,8	3,2	1,50	1,66	1,86
25	33,5	2,8	3,2	4,0	2,12	2,39	2,91
32	42,3	2,8	3,2	4,0	2,73	3,09	3,78
40	48,0	3,0	3,5	4,0	3,33	3,84	4,34
50	60,0	3,0	3,5	4,5	4,22	4,88	6,16
65	75,5	3,2	4,0	4,5	5,71	7,05	7,88
80	88,5	3,5	4,0	4,5	7,34	8,34	9,32
90	101,3	3,5	4,0	4,5	8,44	9,60	10,74
100	114,0	4,0	4,5	5,0	10,85	12,15	13,44
125	140,0	4,0	4,5	5,5	13,42	15,04	18,24
150	165,0	4,0	4,5	5,5	15,88	17,81	21,63

Определив величину гидравлического сопротивления трубопровода необходимо выбрать насосное оборудование. Расчет и выбор насосов подробно описан в литературе [1-6]. В таблице 7 приведены основные технические характеристики некоторых насосов.

Таблица 7. Сводная таблица технических характеристик некоторых насосов [10]

Наименование	подача, л/сек	напор, м	частота, об/мин	мощность насоса, кВт	масса насоса, кг	мощность двигателя, кВт	масса агрегата, кг
55D90 (VD 200 - 90)	55	98	2900	90	145	90	700
55D90A (VD	49	77	2900	75	145	75	655

200 - 90A)							
55D90B (VD 200 - 90B)	44	64	2900	45	145	45	467
85D50 (VD 315 -50)	85	53	2900	75	188	75	700
85D50A (VD315-50A)	82	45	2900	55	188	55	602
85D50B (VD 315 -50B)	61	36	2900	45	188	45	512
90D71 (VD315-71)	90	73	2900	110	188	110	980
90D71A (VD 315-71A)	75	64	2900	90	188	90	745
55D36 (VD 200 - 36)	55	42	1450	37	240	37	552
55D36A (VD 200 - 36A)	50	33	1450	30	240	30	492
55D36B (VD 200 - 36B)	48	28	1450	22	240	22	432
90D50 (VD 320 - 50)	90	54	1450	75	336	75	820
90D50A (VD 320 - 50A)	78	41	1450	55	336	55	735
90D50B (VD 320 - 50B)	74	34	1450	45	336	45	647
140D40	140	40	1450	90	450	90	1037
140D40A	135	33	1450	75	450	75	972

Порядок выполнения работы

1. Исходя из данных варианта найти все требуемые для расчета теплофизические свойства перекачиваемой среды. Использовать [3].
2. В качестве данных о ценах на электроэнергию и обслуживание трубопровода взять существующие на сегодняшний день тарифы.
3. В среде MathCAD составить программу расчета оптимального диаметра трубопровода. Получить расчетное значение. Таблицу вариантов расчета

поместить в отчет. Отчет приготовить в текстовом редакторе в виде пояснительной записки.

4. Исходя из полученных в предыдущем пункте данных построить сводный график выбора оптимального диаметра. График выбора оптимального диаметра поместить в отчет.

5. Из таблицы сортамента трубопроводов, применяемых в промышленности, выбрать требуемый диаметр. Использовать данные представленные выше или [5, 10, 12]. Рассчитать требуемую мощность насосного оборудования и выбрать насос. Использовать данные представленные выше или [5].

6. Выводы о выборе оптимального диаметра трубопровода и требуемого насосного оборудования поместить в отчет.

Исходные данные

№ варианта	Среда	Расход (кг/ч)	Периодичность обслуживания (раз/10 лет)	Время работы (сут/ год)
1	вода	120	1	365
2	ацетон	100	2	180
3	этиловый спирт	150	3	264
4	бензин	200	5	365
5	керосин	700	7	180
6	вода	500	10	264
7	ацетон	400	1	180
8	этиловый спирт	150	2	264
9	бензин	600	3	365
10	керосин	300	5	180
11	вода	800	7	264
12	ацетон	900	10	365
13	этиловый спирт	650	1	264

14	бензин	250	2	180
15	керосин	450	5	365

Содержание отчета

1. Исходные данные для расчета
2. Описание алгоритма расчета
3. Листинг программы
4. Таблица полученных данных
5. График выбора оптимального диаметра
6. Вывод о выборе оптимального диаметра трубопровода и выбор требуемого насосного оборудования.

Контрольные вопросы

1. Трубопроводы. Основные характеристики.
2. Трубопроводы. Эксплуатационные и капитальные расходы
3. Методика расчета насосов.
4. Методика инженерного расчета диаметра трубопровода.
5. Методика поиска оптимального диаметра трубопровода.
6. Какие встречаются виды технологических трубопроводов в зависимости от давления?
7. Назовите виды технологических трубопроводов в зависимости от рода транспортируемого продукта?
8. Какие встречаются виды технологических трубопроводов в зависимости от степени агрессивности транспортируемой среды?
9. Какие бывают виды технологических трубопроводов в зависимости от места их расположения?

Лабораторная работа № 2

Выбор оптимальной обвязки ректификационной колонны

Цель работы: разработать энергосберегающую технологическую схему обвязки ректификационной колонны

Теоретические положения

Ректификация — массообменный процесс, который осуществляется в большинстве случаев в противоточных колонных аппаратах с контактными элементами: насадки, тарелки). Принципиальная схема ректификационной установки представлена на рис. 2 [6].

Исходную смесь из промежуточной емкости 1 центробежным насосом 2 подают в теплообменник 3, где она подогревается до температуры кипения. Нагретая смесь поступает на разделение в ректификационную колонну 5 на тарелку питания, где состав жидкости равен составу исходной смеси x_F .

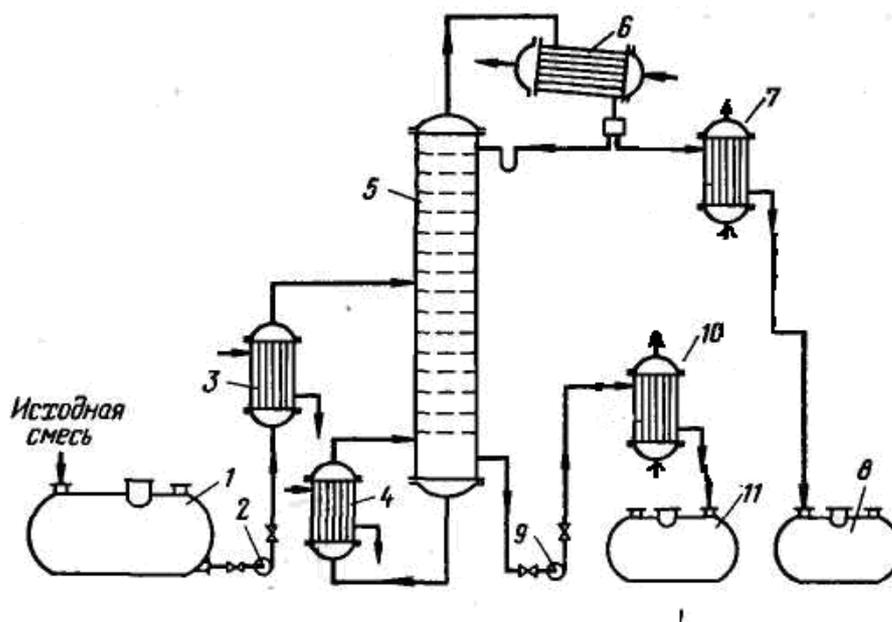


Рис. 2. Схема ректификационной установки непрерывного действия для разделения бинарной смеси.

Стекая вниз по колонне, жидкость взаимодействует с поднимающимся вверх паром, образующимся при кипении кубовой жидкости в кипятыльнике 4. Начальный состав пара примерно равен составу кубового остатка x_w , т. е. обеднена легколетучим компонентом. В результате массообмена с жидкостью пар обогащается легколетучим компонентом. Для более полного обогащения верхнюю часть колонны орошают в соответствии с заданным флегмовым числом жидкостью (флегмой) состава X_p , получаемой в дефлегматоре 6 путем конденсации пара, выходящего из колонны. Часть конденсата выводится из дефлегматора в виде готового продукта разделения — дистиллята, который охлаждается в теплообменнике 7 и направляется в промежуточную емкость 8.

Из кубовой части колонны насосом 9 непрерывно выводится кубовая жидкость — продукт, обогащенный труднолетучим компонентом, который охлаждается в теплообменнике 10 и направляется в емкость 11.

Таким образом, в ректификационной колонне осуществляется непрерывный неравновесный процесс разделения исходной бинарной смеси на дистиллят (с высоким содержанием легколетучего компонента) и кубовый остаток (обогащенный труднолетучим компонентом).

Материальный баланс колонны

Производительность колонны по дистилляту P и кубовому остатку W определим из уравнений материального баланса колонны:

$$F = P + W ; \quad F\bar{x}_f = P\bar{x}_p + W\bar{x}_w$$

Нагрузки ректификационной колонны по пару и жидкости определяются рабочим флегмовым числом R ; его оптимальное значение R_{opt} можно найти путём технико-экономического расчета. Используют приближенные вычисления, основанные на определении коэффициента избытка флегмы (орошения) $v = R/R_{min}$. Здесь R_{min} — минимальное флегмовое число:

$$R_{min} = (x_p - y_f^*) / (y_f^* - x_f),$$

где x_f и x_p — мольные доли легколетучего компонента соответственно в исходной смеси и дистилляте, кмоль/кмоль смеси; y_f^* — концентрация легколетучего компонента в паре, находящемся в равновесии с исходной смесью, кмоль/кмоль смеси.

Один из возможных приближенных методов расчета R заключается в нахождении такого флегмового числа, которому соответствует минимальное произведение $N(R+1)$, пропорциональное объему ректификационной колонны (N — число ступеней изменения концентраций или теоретических тарелок, определяющее высоту колонны, а $(R+1)$ — расход паров и, следовательно, сечение колонны).

Тепловой баланс колонны

Уравнение теплового баланса установки имеет вид:

$$Q_k + Q_f = Q_d + Q_w + Q_p + Q_{nom}$$

из данного уравнения получим:

$$Q_k = Q_d + P * c_p * t_p + W * c_w * t_w - F * c_f * t_f + Q_{nom}$$

Здесь Q_k – расход теплоты получаемой кипящей жидкостью от конденсирующего греющего пара в кубе, Bm ; Q_d – расход теплоты отнимаемый охлаждающей водой от конденсирующихся в дефлегматоре паров, Bm ; Q_{nom} – тепловые потери колонны в окружающую среду, Bm ; F , P , W – массовые расходы исходной смеси, дистиллята, кубового остатка; t_f , t_p , t_w – соответствующие температуры; c_f , c_p , c_w – соответствующие средние удельные теплоемкости.

Расход теплоты, отдаваемой охлаждающей воде в дефлегматоре конденсаторе, найдем по уравнению:

$$Q_d = P * (1 + R) r_p$$

$$r_p = x_p * r_a + (1 - x_p) * r_b$$

Расход теплоты получаемой в кубе испарителе от греющего пара находим по уравнению:

$$Q_k = Q_d + P * c_p * t_p + W * c_w * t_w - F * c_f * t_f + Q_{nom}$$

Расход теплоты в подогревателе исходной смеси:

$$Q = 1,05 * F * c_f * (t_f - t_{нач})$$

Расход теплоты отдаваемый охлаждающей воде в холодильнике кубового остатка

$$Q = W * c_w * (t_w - t_{кон})$$

Расход теплоты отдаваемый охлаждающей воде в водяном холодильнике дистиллята:

$$Q = P * c_p * (t_p - t_{кон})$$

Расход греющего пара в кубе испарителе:

$$G_{\text{пар}} = \frac{Q_{\text{н}}}{r_{\text{пар}} \cdot \delta}$$

где $r_{\text{н}}$ – удельная теплота конденсации греющего пара

В классической технологической схеме подача греющего пара в подогреватель исходной смеси и кипятильник колонны осуществляется раздельно (рис. 3.). Таким образом достигается высокая интенсивность процесса теплопередачи в этих аппаратах. Однако, при этом, во-первых расходуется большое количество греющего пара, во-вторых образуется большое количество высокотемпературного теплоносителя (конденсата) который выводится из технологического процесса.

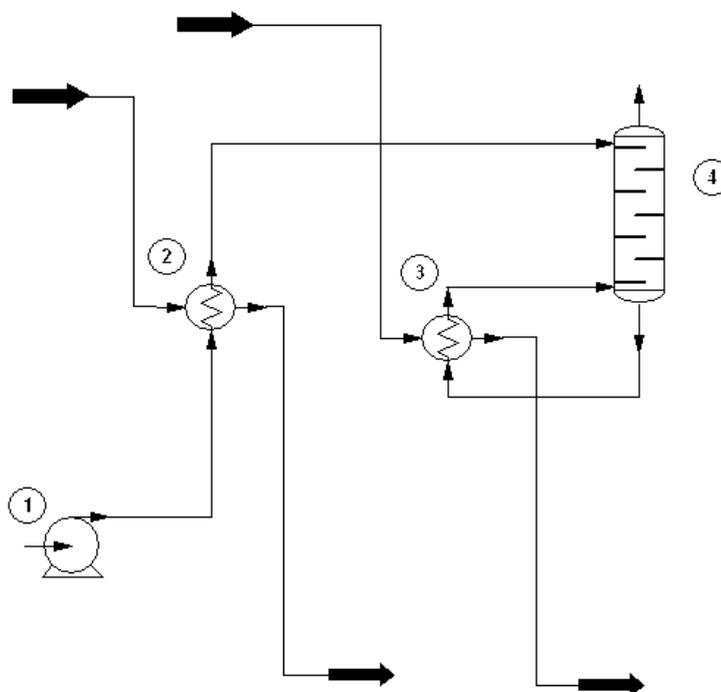


Рисунок 3. Классическая технологическая схема раздельной подачи греющего пара в подогреватель исходной смеси и кипятильник колонны
1 – насос, 2 – подогреватель исходной смеси, 3 – кипятильник ректификационной колонны, 4 – нижняя часть колонны (показана условно)

Для экономии греющего пара возможно использование паров кубовой жидкости для обогрева подогревателя. Такой подход представлен на рис 4. В данной лабораторной работе предлагается оценить эффективность такого способа с помощью теплового расчета двух теплообменников.

Лучшим вариантом экономии греющего пара является возможное использование высокотемпературного конденсата, образующегося на выходе из кипятивника. На рис. 5 представлен вариант такого использования.

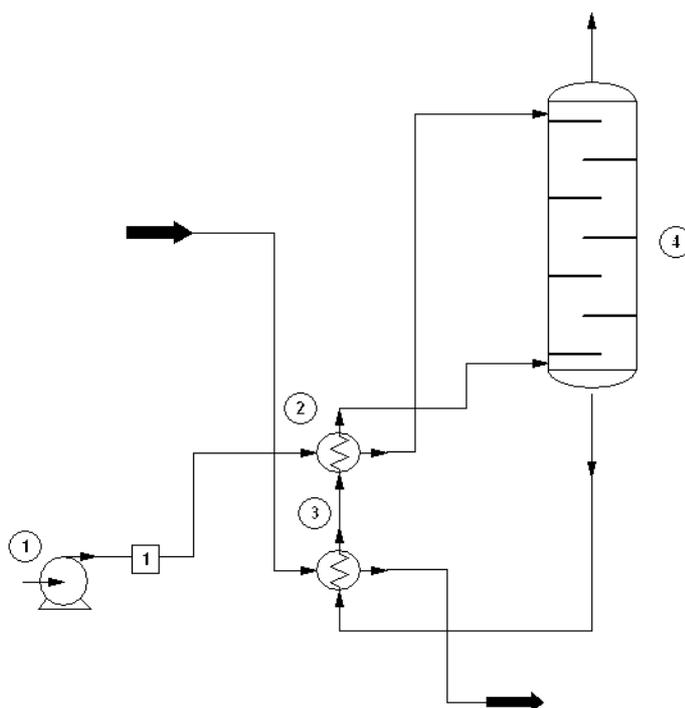


Рисунок 4. Вариант обвязки колонны для оценки возможности его применения с помощью теплового расчета подогревателя и кипятивника.

1 – насос, 2 – подогреватель исходной смеси, 3 – кипятивник ректификационной колонны, 4 – нижняя часть колонны (показана условно)

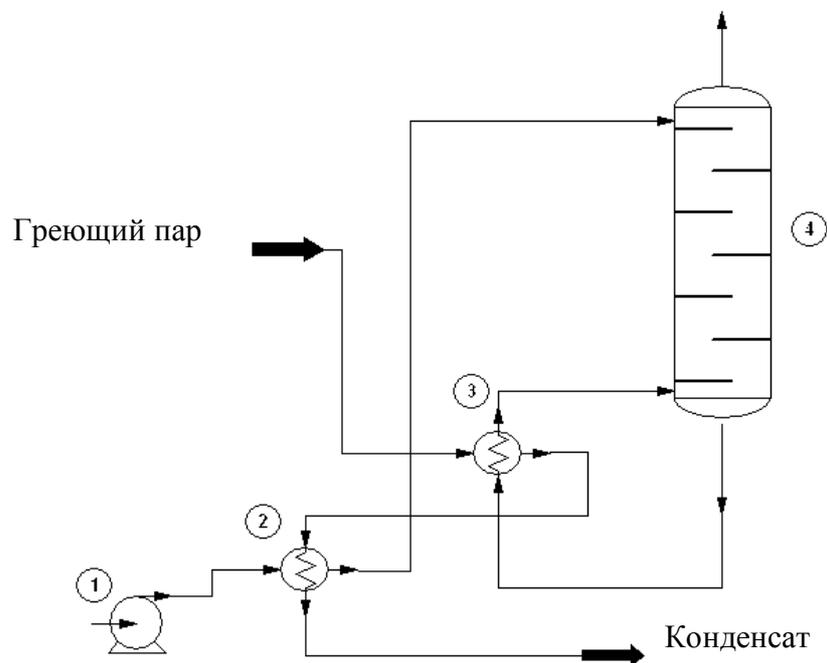


Рисунок 5. Использование конденсата греющего пара из кипятильника для обогрева подогревателя исходной смеси.

1 – насос, 2 – подогреватель исходной смеси, 3 – кипятильник ректификационной колонны, 4 – нижняя часть колонны (показана условно)

Порядок выполнения работы

1. Исходя из данных варианта найти все требуемые для расчета теплофизические свойства разделяемой смеси. Использовать [3].
2. В среде AutoCAD подготовить рассматриваемые технологические схемы обвязки ректификационной колонны. Каждую схему поместить в отчет. Отчет приготовить в текстовом редакторе в виде пояснительной записки.

3. В среде MathCAD, для каждой рассматриваемой схемы, составить программу расчета общего расхода греющего пара и требуемой мощности устанавливаемых насосов. Данные расчета в виде таблицы поместить в отчет.
4. В среде ChemCAD смоделировать каждую рассматриваемую схему. Произвести расчет общего расхода греющего пара и требуемой мощности устанавливаемых насосов. Данные расчета в виде схемы рабочего листа и листа результатов расчета программы поместить в отчет.
5. Сделать сводную таблицу данных расчетов полученных в программах MathCAD и ChemCAD. Таблицу поместить в отчет.
6. Сделать вывод о выборе оптимального варианта обвязки ректификационной колонны.

Исходные данные

№ вар.	Разделяемая смесь	Расход (кг/ч)	Концентрации $x_f / x_d / x_w$ (мол.)	Давление пара (атм.)
1	этил. спирт - вода	100	0.4/0.8/0.1	4
2	вода – уксусн. кислота	150	0.3/0.7/0.05	5
3	ацетон – бензол	200	0.5/0.85/0.15	6
4	бензол - толуол	250	0.3/0.75/0.01	3
5	этил. спирт - вода	200	0.2/0.7/0.05	4.5
6	вода – уксусн. кислота	150	0.4/0.6/0.1	5.2
7	ацетон – бензол	100	0.4/0.8/0.1	6
8	бензол - толуол	200	0.3/0.7/0.05	3.5
9	этил. спирт - вода	150	0.5/0.85/0.15	4.2
10	вода – уксусн. кислота	250	0.3/0.75/0.01	3.3
11	ацетон – бензол	120	0.2/0.7/0.05	5
12	бензол - толуол	220	0.4/0.6/0.1	4
13	этил. спирт - вода	125	0.2/0.7/0.05	6

14	вода – уксусн. кислота	150	0.4/0.6/0.1	3.5
15	ацетон – бензол	175	0.3/0.75/0.01	4

Содержание отчета

1. Схемы обвязки ректификационной колонны (чертежи AutoCAD)
2. Листинг программы расчета общего расхода греющего пара и требуемой мощности устанавливаемых насосов.
3. Сводная таблица по результатам расчетов в программе MathCAD.
4. Скриншоты рабочего листа моделирования в среде ChemCAD для каждой схемы обвязки.
5. Листы результатов расчета в среде ChemCAD для каждой схемы обвязки.
5. Сводная таблица данных расчетов полученных в программах MathCAD и ChemCAD.
6. Вывод о выборе оптимального варианта обвязки ректификационной колонны.

Контрольные вопросы

1. Сущность процесса ректификации.
2. Схема ректификационной установки непрерывного действия для разделения бинарной смеси.
3. Типы теплообменников.
4. Тепловой расчет ректификационной колонны.
5. Методы теплового расчета теплообменников.

Лабораторная работа № 3

Определение оптимальной толщины теплоизоляции

Цель работы: выбрать экономически целесообразный тип теплоизоляции и рассчитать ее толщину.

Теоретические положения

Теплоизоляционные материалы, материалы и изделия, применяемые для теплоизоляции зданий (сооружений), технологического оборудования, средств транспорта и др. Теплоизоляционные материалы характеризуются низкой теплопроводностью [коэффициент теплопроводности не более 0,2 Вт/(м × К)], высокой пористостью (70—98%), незначительными объёмной массой и прочностью (предел прочности при сжатии 0,05—2,5 МН/м²) [7-9].

Основной показатель качества теплоизоляционных материалов — коэффициент теплопроводности. Однако его определение весьма трудоёмко и требует применения специального оборудования, поэтому на практике в качестве такого показателя используют выраженную в кг/м³ величину их объёмной массы в сухом состоянии, которая в достаточном приближении характеризует теплопроводность теплоизоляционного материала.

В эксплуатационных условиях теплоизоляционные материалы должны быть защищены от проникновения влаги; их теплопроводность при насыщении водой возрастает в несколько раз [7-9].

Основные области применения теплоизоляционных материалов — изоляция ограждающих строительных конструкций, технологического оборудования (промышленных печей, тепловых агрегатов, холодильных камер и т. д.) и трубопроводов. Различают теплоизоляционные материалы

жѣсткие (плиты, блоки, кирпич, скорлупы, сегменты и др.), гибкие (маты, матрацы, жгуты, шнуры и др.), сыпучие (зернистые, порошкообразные) или волокнистые. По виду основного сырья теплоизоляционные материалы подразделяют на органические, неорганические и смешанные [7-9].

К органическим теплоизоляционным материалам относят прежде всего материалы, получаемые переработкой неделовой древесины и отходов деревообработки (древесноволокнистые плиты и древесностружечные плиты), сельскохозяйственных отходов (соломит, камышит и др.), торфа (торфоплиты) и различного местного органического сырья. Эти теплоизоляционные материалы, как правило, отличаются низкой водо- и биостойкостью. Указанных недостатков лишены так называемые газонаполненные пластмассы (пенопласты, поропласты, сотопласты и др.) — высокоэффективные органические теплоизоляционные материалы с объёмной массой от 10 до 100 кг/м³ [7-9].

Неорганические теплоизоляционные материалы — минеральная вата и изделия из неё, лёгкие и ячеистые бетоны (главным образом газобетон и пенобетон), пеностекло, стеклянное волокно, изделия из вспученного перлита и др. Изделия из минеральной ваты получают переработкой расплавов горных пород или металлургических (главным образом доменных) шлаков в стекловидное волокно. Объёмная масса изделий из минеральной ваты 75—350 кг/м³ [7-9].

Неорганические теплоизоляционные материалы, используемые в качестве монтажных, изготавливают на основе асбеста (асбестовые картон, бумага, войлок), смесей асбеста и минеральных вяжущих веществ (асбестодиатомовые, асбестотрепельные, асбестоизвестковокремнезѣмистые, асбестоцементные изделия) и на основе вспученных горных пород (вермикулита, перлита). Для изоляции промышленного оборудования и установок, работающих при температурах выше 1000°С (например, металлургических, нагревательных и др. печей, топок, котлов и т. д.),

применяют так называемые легковесные огнеупоры, изготавливаемые из огнеупорных глин или высокоогнеупорных окислов в виде штучных изделий (кирпичей, блоков различного профиля); перспективно также использование волокнистых теплоизоляционных материалов из огнеупорных волокон и минеральных вяжущих веществ (коэффициент их теплопроводности при высоких температурах в 1,5—2 раза ниже, чем у традиционных, имеющих ячеистое строение) [7-9].

В таблице 8 представлены основные теплотехнические характеристики наиболее распространенных теплоизоляционных материалов [11].

Таблица 8. Сравнительная таблица теплоизоляционных материалов

Материал	Технические характеристики				
	Плотность, ρ , кг/м ³	Теплопроводность λ , Вт/м ² °С	Паропроницаемость μ , мг/м*ч*Па	Прочность σ , МПа	Максимальная рабочая температура $T_{\text{раб}}$, °С
Пенополиуретан	25 – 60	0,018 – 0,032	0,02 – 0,03	0,19 – 0,2	130 – 150
Пенополистирол экструдированный	35 – 45	0,028 – 0,032	0,013 – 0,018 – 0,006	0,2 – 0,4	65 – 75
Пенополистирол вспученный ПСБ	15 – 50	0,038 – 0,05	0,05	0,05 – 0,14	65
Пенополиэтилен	25 – 30	0,037 – 0,05	0,001	0,025	80 – 100
Пенополипропилен	40	0,04	0,0001	0,1	140 – 150
Стекловата	15 – 75	0,035 – 0,05	0,5 – 0,6	0,02	280 – 1100
Минеральная вата	35 – 200	0,036 – 0,06	0,4 – 0,6	0,02	250 – 700

Ячеистый бетон	300 – 1000	0,1 – 0,3	0,1 – 0,3	1 - 10	1000
----------------	---------------	-----------	-----------	--------	------

Порядок выполнения работы

1. Исходя из данных варианта найти все требуемые для расчета теплофизические свойства среды. Использовать данные представленные выше или [7-9, 11].
2. В среде MathCAD, составить программу расчета общих затрат для поддержания заданного теплового режима в вертикальной цилиндрической емкости заданного объема в заданных климатических условиях без теплоизоляции. Все расчеты производить исходя из продолжительности работы аппарата 365 дней в году. Режим перемешивания – турбулентный. Обогрев – погружной змеевик (выбрать самостоятельно). Результаты расчета поместить в отчет.
3. В среде MathCAD, составить программу расчета общих затрат на теплоизоляцию для поддержания заданного теплового режима в емкости заданного объема в заданных климатических условиях. Результаты расчета в виде таблицы поместить в отчет.
4. Составить график зависимости общих затрат без теплоизоляции и от толщины теплоизоляции для каждого типа теплоизоляции. Указать на графике оптимальную и максимально допустимую толщину каждого типа теплоизоляции.
5. Сделать вывод об экономически целесообразном выборе типа теплоизоляции и ее толщины.

Исходные данные

№	Среда	Размеры	Температура в	Температура
---	-------	---------	---------------	-------------

вар.		(D / H, м)	аппарате	снаружи аппарата
1	вода	3/1	90	5
2	р-р NaCl 5%	2/5	70	2
3	вода	7/3	80	-3
4	уксусн. кислота	1/2	90	10
5	вода	2/1	70	0
6	р-р KCl 5%	3/1	80	-5
7	вода	2/5	90	1
8	вода	7/3	70	-10
9	р-р NaCl 10%	1/2	80	3
10	вода	2/1	90	2
11	вода	3/1	70	0
12	р-р KCl 15%	2/5	80	-7
13	вода	7/3	90	-12
14	р-р KCl 7%	1/2	70	7
15	р-р NaCl 12%	2/1	80	9

Содержание отчета

1. Листинг программы в среде MathCAD, расчета общих затрат для поддержания заданного теплового режима в емкости заданного объема в заданных климатических условиях без теплоизоляции.
2. Листинг программы в среде MathCAD, расчета общих затрат на теплоизоляцию для поддержания заданного теплового режима в емкости заданного объема в заданных климатических условиях.
3. Сводная таблица результатов расчета общих затрат без теплоизоляции и для рассматриваемых типов теплоизоляции в зависимости от ее толщины.
4. График зависимости общих затрат без теплоизоляции и от толщины теплоизоляции для каждого типа теплоизоляции. Указать на графике

оптимальную и максимально допустимую толщину каждого типа теплоизоляции.

5. Вывод об экономически целесообразном выборе типа теплоизоляции и ее толщины.

Контрольные вопросы

1. Основные положения теории теплопроводности.
2. Основные характеристики теплоизоляционных материалов.
3. Методы расчета необходимой толщины теплоизоляции.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии.- М.: Альянс, 2008. - 753 с.

2. Плановский, А.Н. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии / А.Н. Плановский, П.И. Николаев. - М.: Химия, 1987.- 496 с.

3. 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. - М.: ООО ТИД "Альянс", 2006. - 576 с.

4. Романков, П.Г. Гидромеханические процессы химической технологии.- 3-е изд. / П.Г. Романков, М.И. Курочкина.- Л.: Химия, 1982.- 288 с.

5. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию для вузов / Под ред. Ю.И. Дытнерского. - М.: Альянс, 2007. - 496 с.

6. Фролов, В.Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии»: учебное пособие для вузов / В. Ф. Фролов. - СПб.: Химиздат, 2003. – 608 с.
7. Справочник по производству теплоизоляционных и акустических материалов / Под ред. Ю.Л. Спирина.- М.: Стройиздат, 1975.- 421с.
8. Китайцев, В.А. Технология теплоизоляционных материалов / В.А. Китайцев.- М.: Стройиздат, 1970.- 404 с.
9. Сухарев, М.Ф. Производство теплоизоляционных материалов и изделий / М.Ф. Сухарев.- М.: Высшая школа, 1973.- 304 с.
10. Насосы и насосное оборудование [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.agrovodcom.ru.- Загл. с экрана.
11. Виды, группы и категории трубопроводов [Электронный ресурс]. - Режим доступа: www.shkval-antikor.ru/mess603. - Загл. с экрана.
12. Свойства теплоизоляционных материалов [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.tp-regent.ru/technoinfo/spravka. - Загл. с экрана.