

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

Кафедра инженерной химии и промышленной экологии

Процессы и аппараты химической технологии. Гидромеханические процессы

Методические указания к самостоятельному изучению дисциплины,
и выполнению контрольной работы для студентов
бакалавриата заочной формы обучения по направлению подготовки:
18.03.01 – Химическая технология

Составители
В. Д. Шаханов
Т. И. Маркова
Н. Ю. Бусыгин

Санкт-Петербург
2024

Утверждено
на заседании кафедры ИХПЭ
06.06.2024 г., протокол № 8

Рецензент Михайловская А. П.

Методические указания к выполнению контрольной работы по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии» по разделам «Гидравлика», «Гидравлические процессы», «Гидромеханические процессы» разработаны по методическим материалам кафедры инженерной химии и промышленной экологии в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта, учебного плана и рабочей программы дисциплины.

Приведены расчетные уравнения по гидростатике, гидродинамике, перемещению жидкостей, отстаиванию, фильтрованию и перемешиванию, позволяющие студентам выполнить контрольные задания.

Предназначены для студентов заочной формы обучения направления подготовки бакалавриата 18.03.01 – Химическая технология.

Учебное электронное издание сетевого распространения
Издано в авторской редакции

Системные требования:
электронное устройство с программным обеспечением для воспроизведения файлов формата PDF

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=2024____, по паролю. – Загл. с экрана.
Дата подписания к использованию _____.2024 г. Рег. № ____/24

ФГБОУВО «СПбГУПТД»
Юридический и почтовый адрес: 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18.
<http://sutd.ru>

Оглавление

Введение	4
Физические свойства тел.....	4
Основы технической гидравлики	5
Гидростатика	5
Гидродинамика.....	5
Перемещение жидкостей.....	6
Расчет насосной установки	9
Задания к контрольной работе по разделам «Гидравлика» и «Гидравлические процессы»	9
Гидромеханические процессы	13
Осаждение под действием силы тяжести	13
Фильтрация	15
Перемешивание	16
Задания к контрольной работе по разделу «Гидромеханические процессы»	17
Отстаивание	17
Фильтрация	18
Перемешивание	19
Литература.....	21
Приложение А. Содержание дисциплины (первый семестр изучения дисциплины)	22
Приложение Б. Перечень вопросов к зачету по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии» (первый семестр изучения дисциплины)	23

Введение

Процессы и аппараты химической технологии является одной из дисциплин профессионального цикла, имеющей большое значение для становления специалистов по направлению 18.03.01 – Химическая технология.

Целью дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии» является формирование компетенций студентов, позволяющих применить знания и умения для решения теоретических и практических задач гидромеханики.

От бакалавра, работающего в области химической технологии, требуется знание теории гидромеханических процессов, принципов устройства и методов расчета аппаратов и машин, используемых для проведения гидромеханических процессов.

Настоящие методические указания предназначены для выработки у обучающегося навыков проведения инженерных расчетов по гидростатике, гидродинамике, перемещению жидкостей и газов и гидромеханическим процессам.

Методические указания рассчитаны для обучающихся заочной формы обучения по направлению 18.03.01 – Химическая технология и предназначены для выполнения контрольной работы по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии». Они могут быть также использованы при расчетах вспомогательного оборудования, входящего в состав проектируемой установки, при выполнении курсового проекта по данной дисциплине.

Физические свойства тел

При расчете гидромеханических процессов необходимы данные о таких физических свойствах веществ, как плотность и вязкость [1].

Плотностью ρ называют массу единицы объема вещества

$$\rho = \frac{m}{v}, \quad (1)$$

где m – масса вещества, кг; v – объем вещества, м³.

Вязкость – свойство жидкости оказывать сопротивление усилию, вызывающему относительное перемещение ее частиц.

Различают вязкость динамическую μ и кинематическую ν .

Размерность динамической вязкости в СИ – Па·с.

Кинематическая вязкость связана с динамической вязкостью соотношением

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (2)$$

Единицы измерения кинематической вязкости в СИ – м²/с, в СГС – см²/с (стокс).

Значения плотности и вязкости различных веществ приводятся в справочной литературе [2]. При отсутствии опытных данных значения этих свойств веществ и их смесей могут быть рассчитаны [2].

Так, например, плотность любого газа ρ при температуре T и давлении P может быть рассчитана по уравнению

$$\rho = \frac{M}{22,4} \frac{T_0 P}{T P_0}, \quad (3)$$

где M – молярная масса газа, кг/кмоль; T_0 , P_0 – температура (273 К) и давление (1,013·10⁵ Па).

Основы технической гидравлики

Гидравлика изучает законы равновесия и движения жидкости, а также применимость этих законов к инженерной практике.

При этом законы равновесия жидкости изучаются в гидростатике, а законы движения – в гидродинамике.

Гидростатика

Сжимающее напряжение, возникающее внутри жидкости, называется гидростатическим давлением. Размерность давления в СИ – н/м² или Па (Паскаль). Кроме того, в различных областях науки и техники применяются такие единицы давления, как кгс/см² (техническая атмосфера), мм вод. ст., мм рт. ст. и др.

Основное уравнение гидростатики

$$P_{\text{абс}} = P_0 + P_{\text{изб}} = P_0 + \rho gh, \quad (4)$$

где $P_{\text{абс}}$ – абсолютное давление, Па; P_0 – давление на поверхности жидкости, Па; $P_{\text{изб}}$ – избыточное давление, создаваемое столбом жидкости, Па; h – глубина погружения данной точки; ρ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение силы тяжести, м/с².

Если давление над жидкостью ниже атмосферного, то жидкость находится при разрежении (вакууме), равном

$$P_{\text{вак}} = P_{\text{атм}} - P_{\text{абс}}, \quad (5)$$

где $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление.

Гидродинамика

Объемный расход жидкости Q , м³/с:

$$Q = W \cdot F, \quad (6)$$

где F – площадь сечения потока, м²; W – средняя скорость движения потока в этом сечении, м/с.

Уравнение неразрывности (сплошности) для несжимаемой жидкости, протекающей по трубопроводу переменного сечения

$$Q = W_1 F_1 = W_2 F_2 = \dots = W_n F_n, \quad (7)$$

где $W_1, W_2, \dots, W_n$ – скорости жидкости в сечениях, м/с; $F_1, F_2, \dots, F_n$ – площади этих сечений, м².

Режимы течения жидкости. Характеристикой режима течения жидкости служит критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{wd\rho}{\mu}, \quad (8)$$

где w – скорость потока, м/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; d – диаметр трубопровода или эквивалентный диаметр $d_{\text{э}}$ для сечения, отличного от круга, м; μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с.

$$d_{\text{э}} = \frac{4F}{\Pi}, \quad (9)$$

где F – площадь сечения, заполненного жидкостью, т. е. живого сечения, м²; Π – смоченный периметр, м.

В случае напорного движения жидкости в прямом трубопроводе режим течения жидкости устанавливается исходя из следующих условий:

при $Re \leq 2300$ – ламинарный режим;

при $Re \geq 10000$ – развитый турбулентный режим;

$2300 < Re < 10000$ – неустановившийся турбулентный режим или переходная область.

Уравнение Бернулли для вязкой несжимаемой жидкости

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{w_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{w_2^2}{2g} + h_{\text{пот}}, \quad (10)$$

где z – геометрический напор, м; $\frac{P}{\rho g}$ – пьезометрический напор, м; $\frac{w^2}{2g}$ – скоростной напор, м; $h_{\text{пот}}$ – напор, потерянный на преодоление сопротивлений, м.

$$h_{\text{пот}} = h_{\text{тр}} + h_{\text{м.с.}}, \quad (11)$$

где $h_{\text{тр}}$ – потеря напора на трение, м; $h_{\text{м.с.}}$ – потеря напора в местных сопротивлениях.

Потеря напора на трение или по длине определяется по формуле

$$h_{\text{тр}} = \lambda \frac{\ell}{d} \cdot \frac{w^2}{2g} \quad (12)$$

или в единицах давления

$$\Delta P_{\text{тр}} = \lambda \frac{\ell}{d} \cdot \frac{w^2 \rho}{2}, \quad (13)$$

где λ – коэффициент потерь на трение или коэффициент сопротивления трению; ℓ и d – соответственно длина и диаметр трубопровода.

В общем случае коэффициент λ зависит от вязкости жидкости и шероховатости. Шероховатость – высота выступов на поверхности трубопровода.

Для определения λ можно рекомендовать следующие соотношения:

ламинарный режим ($Re \leq 2300$)

$$\lambda = \frac{64}{Re}; \quad (14)$$

турбулентный режим ($Re > 2300$):

а) для гидравлически гладких труб ($2300 < Re < 10^5$) λ определяется по формуле Блазиуса

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}}. \quad (15)$$

Гидравлически гладкими называют трубы, в которых коэффициент λ не зависит от шероховатости, т. е. выступов неровности (стеклянные, медные, свинцовые и др.);

б) при $\frac{20d}{K_s} < Re \leq \frac{500d}{K_s}$ λ можно определить по формуле Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{K_s}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (16)$$

где K_s – эквивалентная абсолютная шероховатость [2];

в) при $Re > 500 \frac{d}{K_s}$ формула Альтшуля обращается в формулу Шифринсона

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{K_s}{d} \right)^{0,25}, \quad (17)$$

Потери напора в местных сопротивлениях определяются по формуле

$$h_{\text{м.с.}} = \zeta \frac{w^2}{2g} \quad (18)$$

или в единицах давления

$$\Delta P_{\text{м.с.}} = \zeta \frac{w^2 \rho}{2}, \quad (19)$$

где ζ – коэффициент местного сопротивления. Значения ζ для некоторых местных сопротивлений приведены в [2].

Перемещение жидкостей

Гидравлическая машина для преобразования механической энергии двигателя в механическую энергию потока жидкости называется насосом.

Основные параметры насоса – подача, напор, мощность и коэффициент полезного действия (к. п. д.).

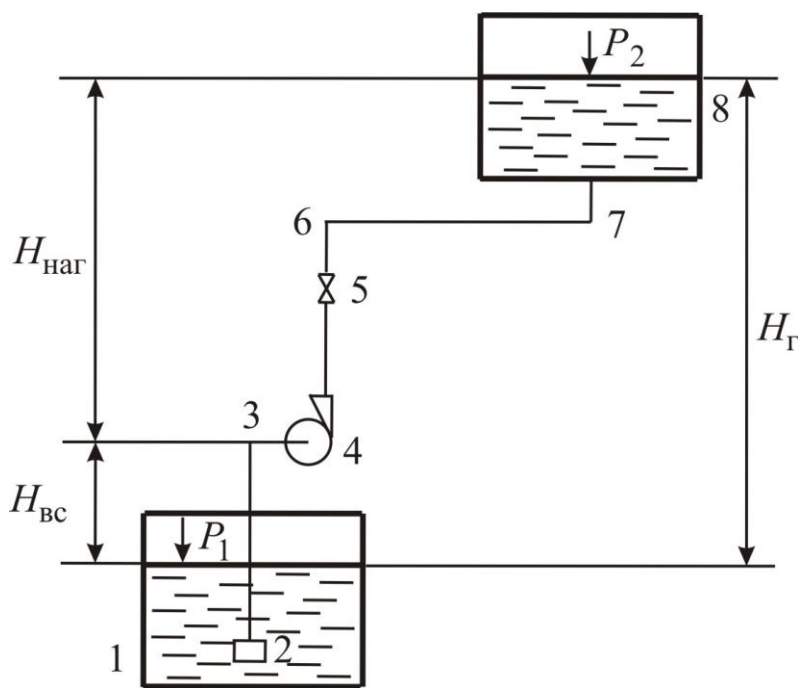
Подачей насоса называется объем жидкости Q , м³/с, подаваемой насосом в нагнетательный трубопровод в единицу времени.

Напор насоса H – энергия, сообщаемая насосом единице веса жидкости.

Напор насоса

$$H = H_{\Gamma} + \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + h_{\text{пот}}, \quad (20)$$

где H_{Γ} – расстояние между уровнями жидкости в приемном и напорном резервуарах (рис. 1), м; P_1 и P_2 – давления в приемном и напорном резервуарах, Па; ρ – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³; $h_{\text{пот}}$ – потеря напора на преодоление трения и местных сопротивлений во всасывающем и нагнетательном трубопроводах, рассчитываемая по уравнениям (12, 13, 18, 19, 21), м; g – ускорение свободного падения, м/с².



1 – приемный резервуар; 2 – приемный клапан; 3, 6, 7 – колена;
4 – насос; 5 – задвижка; 8 – напорный резервуар

Рис. 1. Схема насосной установки

$$h_{\text{пот}} = h_{\text{тр}} + h_{\text{м.с.}} = \left(\lambda \frac{\ell}{d} + \sum \zeta \right) \frac{w^2}{2g}. \quad (21)$$

Выражая в уравнении (21) скорость жидкости через расход и площадь сечения трубопровода $F = \frac{\pi d^2}{4}$, получаем

$$h_{\text{пот}} = \frac{(\lambda \frac{\ell}{d} + \sum \zeta) \cdot 16}{2g\pi^2 d^4} Q^2. \quad (22)$$

Обозначив

$$K = \frac{(\lambda \frac{\ell}{d} + \sum \zeta) \cdot 16}{2g\pi^2 d^4}, \quad (23)$$

получим видоизмененное основное расчетное уравнение

$$h_{\text{пот}} = KQ^2. \quad (24)$$

Полезная мощность, $N_{\text{п}}$ Вт

$$N_{\text{п}} = Q\rho gH. \quad (25)$$

Затраченная мощность, $N_{\text{з}}$, Вт

$$N_3 = \frac{N_n}{\eta}, \quad (26)$$

где η – коэффициент полезного действия насоса.

Связь между основными параметрами насоса устанавливается характеристикой центробежного насоса. Характеристикой насоса называется графическая зависимость напора H , мощности N_3 и к.п.д. (η) от подачи Q при постоянной частоте вращения (рис. 2).

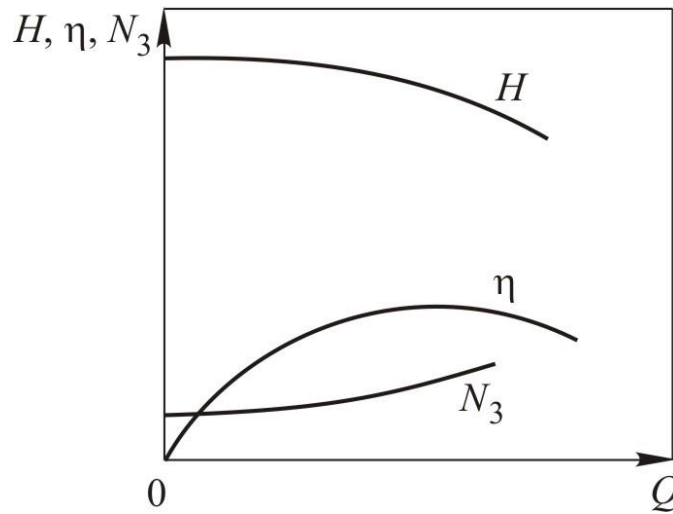


Рис. 2. Рабочая характеристика центробежного насоса

Характеристика центробежного насоса $H = f(Q)$, представленная на одном графике с характеристикой трубопровода H_T , называется совмещенной характеристикой (рис. 3).

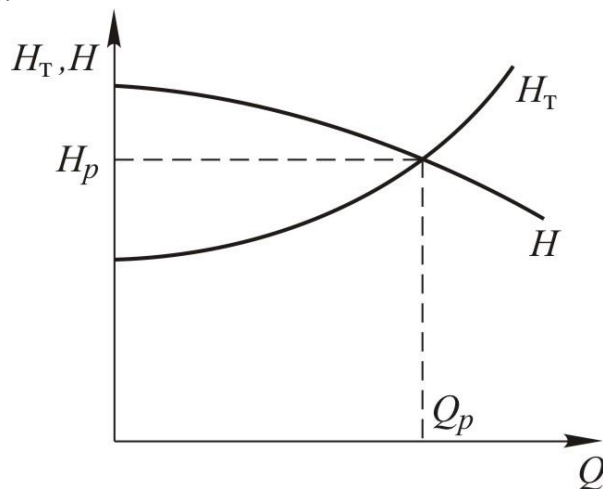


Рис. 3. Совмещенная характеристика

Пересечение кривых дает рабочую точку. Этой точке соответствуют рабочие значения подачи Q_p и напора H_p при работе насоса на данный трубопровод.

Для выбора центробежного насоса по исходному значению подачи Q и рассчитанному для этой подачи напору H по стандартам [3-5] предварительно выбирают насос, у которого подача и напор близки Q и H . Затем строится совмещенная характеристика и определяется рабочая точка. Подача Q_p и напор H_p в рабочей точке не должны быть меньше заданных Q и H . Рабочая точка должна лежать в пределах, для работы которых рекомендуется данный насос (волнистые

ограничительные линии на характеристике [1, 2]). По значениям Q_p и H_p определяют затраченную мощность.

Высота всасывания $H_{вс}$ центробежного насоса

$$H_{вс} \leq \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_{н.п.}}{\rho g} - h_{вс} - \Delta h_{кав}, \quad (27)$$

где P_1 – давление в приемном резервуаре, Па; $P_{н.п.}$ – давление насыщенных паров, Па; $h_{вс}$ – потери напора на трение и в местных сопротивлениях на линии всасывания, м (рассчитываются по уравнениям (11, 12, 18); $\Delta h_{кав}$ – кавитационный запас, м.

$$\Delta h_{кав} = 0,00125 \left(Q_p \frac{n^2}{3600} \right)^{0.67}, \quad (28)$$

где Q_p – рабочий расход, м³/ч; n – частота вращения, мин⁻¹.

Расчет насосной установки

При заданном расходе (подаче) жидкости Q необходимое для расчета значение скорости w принимают [1, 2]. Для жидкостей в напорных трубопроводах скорость составляет 0,5–2,5 м/с.

Далее рассчитывают диаметр трубопровода

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi w}}, \quad (29)$$

по которому выбирают ближайшее значение стандартного диаметра. Используя значение стандартного диаметра, определяют скорость

$$w = \frac{4Q}{\pi d^2}, \quad (30)$$

рассчитывают Re (уравнение 8), коэффициент сопротивления трению (уравнения 14 - 17), потери напора на трение и в местных сопротивлениях (уравнения 11, 12, 18) и напор насоса H (уравнение 20). По Q и H предварительно выбирают насос [3-5]. Затем, задаваясь произвольными значениями подачи (5–6 значений), рассчитывают для каждого значения Q (см. уравнения 22 - 24) напор трубопровода H_T

$$H_T = H_r + \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + KQ^2, \quad (31)$$

строят по этим данным характеристику трубопровода и на этот же рисунок наносят кривую $H = f(Q)$ для предварительно выбранного насоса.

Далее, как изложено выше, определяют координаты рабочей точки и рассчитывают затраченную мощность. Заданное значение высоты всасывания должно быть меньше $H_{вс}$, определенной по формуле (27).

Задания к контрольной работе по разделам «Гидравлика» и «Гидравлические процессы»

Варианты задач контрольных работ студент заочной формы обучения находит по двум последним цифрам шифра своей зачетной книжки.

Задача 1. Рассчитать плотность газа при известных температуре t и избыточном давлении $P_{изб}$. Атмосферное давление 760 мм рт. ст.

Таблица 1. Исходные данные к задаче 1

Последние две цифры шифра зачетной книжки	Газ	$t, ^\circ \text{C}$	$P_{\text{изб}}, \text{кПа}$
01	Азот	35	120
02	Аммиак	20	100
03	Ацетилен	30	150
04	Воздух	80	110
05	Водород	40	140
06	Диоксид серы	65	160
07	Диоксид углерода	80	190
08	Кислород	75	170
09	Метан	47	180
10	Оксид углерода	68	200

Задача 2. Манометр на трубопроводе, заполненном жидкостью с температурой t , показывает давление $P_{\text{изб}}$. На какую высоту над точкой присоединения манометра поднимется в открытом пьезометре жидкость (рис 4)?

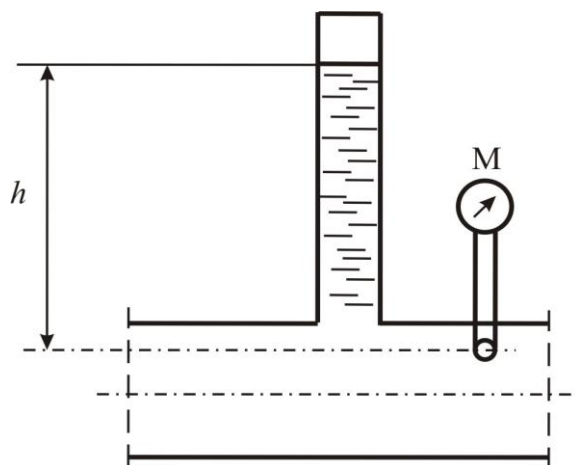


Рис 4. К задаче о водомерной трубке

Таблица 2. Исходные данные к задаче 2

Последние две цифры шифра зачетной книжки	Жидкость	$t, ^\circ \text{C}$	$P_{\text{изб}}, \text{кгс/см}^2$
01	NaOH 20 %	20	0,11
02	NaOH 40 %	40	0,12
03	Вода	15	0,16
04	Вода	30	0,19
05	Четыреххлористый углерод	20	0,17
06	H ₂ SO ₄ 30 %	25	0,16
07	Этилацетат	20	0,18
08	CH ₃ COOH 30 %	18	0,21
09	Изопропиловый спирт	23	0,15
10	Этанол 40 %	30	0,14

Задача 3. Разрежение в осушительной башне сернокислотного завода измеряется U-образным тягомером, наполненным серной кислотой плотностью ρ . Показание тягомера – h см. Каково абсолютное давление в башне, выраженное в Па, если барометрическое давление P ?

Таблица 3. Исходные данные к задаче 3

Последние две цифры шифра зачетной книжки	ρ , кг/м ³	h , см	P , мм рт. ст.
01	1820	3,1	745
02	1837	2,8	750
03	1824	2,9	755
04	1800	2,6	760
05	1670	3,2	745
06	1430	3,3	750
07	1820	3,2	755
08	1837	2,9	760
09	1824	2,8	745
10	1800	3,3	750

Задача 4. Холодильник состоит из n труб диаметром 20×2 мм. В трубное пространство холодильника поступает жидкость по трубопроводу диаметром 57×3,5 мм. Скорость жидкости в трубопроводе w , м/с. Жидкость идет снизу вверх. Определить скорость жидкости в трубах холодильника.

Таблица 4. Исходные данные к задаче 4

Последние две цифры шифра зачетной книжки	Жидкость	Скорость жидкости, w , м/с	Количество труб, n
01	Натрий едкий 40 %	2,0	19
02	Серная кислота 30 %	2,1	16
03	Этилацетат	1,9	21
04	Уксусная кислота 30 %	1,7	25
05	Вода	1,8	16
06	Четыреххлористый углерод	1,9	19
07	Натрий едкий 20 %	2,2	21
08	Изопропиловый спирт	1,6	25
09	Этиловый спирт	1,5	19
10	Вода	1,8	16

Задача 5. Холодильник состоит из двух концентрических стальных труб диаметром 29×2,5 мм и 54×2,5 мм. По внутренней трубе протекают M_1 , т/ч, рассола плотностью 1150 кг/м³. В межтрубном пространстве проходит M_2 , кг/ч, газа под давлением P , кГс/см², при средней температуре 0 °С. Плотность газа при 0 °С и 760 мм рт. ст. равна 1,2 кг/м³. Найти скорости газа и жидкости в холодильнике.

Таблица 5. Исходные данные к задаче 5

Последние две цифры шифра зачетной книжки	Массовый расход рассола, M_1 , т/ч	Массовый расход газа, M_2 , кг/ч	Давление газа, P , кГс/см ²
01	4,05	200	3,1
03	3,80	185	2,9
04	3,65	180	2,8
05	3,70	170	3,1
06	4,05	210	3,0
07	3,90	175	2,9
08	3,80	170	2,8
09	3,65	160	3,1
10	3,73	165	2,9

Задача 6. Определить режим течения воды в кольцевом пространстве теплообменника типа «труба в трубе». Наружная труба диаметром 96×3,5 мм, внутренняя – 57×3 мм, расход воды Q , м³/ч, средняя температура воды t .

Таблица 6. Исходные данные к задаче 6

Последние две цифры шифра зачетной книжки	Объемный расход воды, Q , м ³ /ч	Средняя температура воды, $t^{\circ}\text{C}$
01	3,5	18
02	3,7	25
03	4,0	20
04	4,4	25
05	4,5	18
06	4,2	23
07	4,0	25
08	3,6	22
09	3,5	24
10	3,7	25

Задача 7. Определить потерю давления на трение при протекании жидкости по трубе диаметром 19×2 мм, длиной l . Скорость жидкости w , м/с, температура жидкости t .

Таблица 7. Исходные данные к задаче 7

Последние две цифры шифра зачетной книжки	Материал трубы	Жидкость	Длина трубы, м	Скорость жидкости w , м/с	Температура, $t^{\circ}\text{C}$
01	Сталь	Натрий едкий 25 %	12	0,8	20
02	Латунь	Натрий едкий 5 %	13	0,9	30
03	Чугун	Вода	14	1,0	36
04	Алюминий	Натрий хлористый 5 %	15	1,1	20

Окончание табл. 7

Последние две цифры шифра зачетной книжки	Материал трубы	Жидкость	Длина трубы, м	Скорость жидкости w , м/с	Температура, $t^{\circ}\text{C}$
05	Медь	Изопропиловый спирт	16	1,2	35
06	Сталь	Ацетон	19	1,3	10
07	Латунь	Четыреххлористый углерод	20	1,4	20
08	Чугун	Вода	17	1,5	57
09	Алюминий	Анилин	12	1,7	30
10	Медь	Бензол	14	1,8	20

Задача 8. Рассчитать мощность и подобрать центробежный насос для подачи воды из приемной емкости в напорную (рис. 1). Принять длину линии всасывания на 3 м больше высоты всасывания.

Таблица 8. Исходные данные к задаче 8

Последние две цифры шифра зачетной книжки	Температура воды, $^{\circ}\text{C}$	Расход воды, $\text{м}^3/\text{ч}$	Высота всасывания, м	Разность уровней воды, м	Общая длина трубопровода, м	Давление в нижнем баке, кПа	Давление в верхнем баке, кПа	Материал трубы
01	5	28	5	12,5	270	140	150	Сталь
02	6	100	6	32,0	100	230	300	Алюминий
03	7	80	3	34,0	310	160	200	Чугун
04	8	60	4	30,0	290	190	270	Латунь
05	9	65	0,8	38,0	90	110	120	Сталь
06	10	70	2	20,0	260	180	200	Алюминий
07	15	80	1	13	240	300	340	Чугун
08	20	40	3	20	180	130	180	Латунь
09	25	90	5	32	125	270	295	Сталь
10	30	120	4	28	150	250	280	Алюминий

Гидромеханические процессы

Осаждение под действием силы тяжести

Силу сопротивления среды R при падении частицы шарообразной формы выражают уравнением

$$R = \xi \frac{\pi d^2 w_{oc}^2}{4} \rho_c, \quad (32)$$

где d – диаметр шарообразной частицы, м; w_{oc} – скорость осаждения, м/с; ρ_c – плотность среды, кг/м³; ξ – коэффициент сопротивления среды.

Существуют три области обтекания, каждой из которых соответствует определенный характер зависимости ξ от критерия Рейнольдса:

– ламинарный режим (область действия закона Стокса) до значений $Re = 0,2$ [1],[2]. В этой области коэффициент сопротивления

$$\xi_I = \frac{24}{Re}; \quad (33)$$

– переходный режим $0,2 < Re < 500$. В этой области

$$\xi_{II} = \frac{18,5}{Re^{0,6}}; \quad (34)$$

– область действия квадратичного закона сопротивления Ньютона ($Re > 500$).

$$\xi_{III} = 0,44 = \text{постоянная} \quad (35)$$

При $Re > 500$ имеет место автомодельный режим по отношению к Re .

Число Рейнольдса для частицы, падающей в какой-либо среде,

$$Re = \frac{w_{oc} d \rho_c}{\mu_c}, \quad (36)$$

где μ_c – вязкость среды, Па·с.

Скорость осаждения для каждого режима

$$w_{ocI} = \frac{1}{18} \frac{d^2 (\rho_q - \rho_c) g}{\mu_c}; \quad (37)$$

$$w_{ocII} = 0,78 \frac{d^{0,43} (\rho_q - \rho_c)^{0,715}}{\rho_c^{0,285} \mu_c^{0,43}}; \quad (38)$$

$$w_{ocIII} = 5,45 \sqrt{\frac{d (\rho_q - \rho_c)}{\rho_c}}, \quad (39)$$

где ρ_q – плотность частицы, кг/м³; g – 9,81 м/с².

Использование приведенных уравнений для нахождения скорости осаждения связано с применением метода последовательных приближений. Необходимо сначала задаться режимом движения, затем определить w_{oc} , а по найденному значению w_{oc} определить режим движения и проверить, правильно ли был задан режим.

Режим осаждения определяется по величине критерия Архимеда

$$Ar = \frac{d^3 \rho_c^2 g}{\mu_c^2} \cdot \frac{\rho_q - \rho_c}{\rho_c}. \quad (40)$$

При $Ar \leq 3,6$ [1, 7] имеет место ламинарный режим осаждения и зависимость между критериями Re и Ar

$$Re = \frac{Ar}{18}. \quad (41)$$

Переходной области осаждения соответствует значение критерия Ar , в пределах $3,6 < Ar < 83\,000$ и зависимость между критериями Re и Ar имеет вид

$$Re = 0,152 \cdot Ar^{0,715}. \quad (42)$$

Для автомодельной области $Ar > 83\,000$ зависимость между критериями Re и Ar имеет вид

$$Re = 1,74 \sqrt{Ar}. \quad (43)$$

Таким образом, рассчитав величину критерия Архимеда по формуле (40), определяют режим осаждения. Затем, пользуясь одним из уравнений (41, 42 или 43), отвечающим режиму осаждения, вычисляют значение Re и находят по нему скорость осаждения

$$w_{oc} = \frac{\mu_c Re}{d \rho_c}. \quad (44)$$

Для частиц неправильной формы характерным линейным размером считают эквивалентный диаметр d_3 , определяемый по уравнению

$$d_3 = 1,24 \sqrt[3]{\frac{M_q}{\rho_q}}, \quad (45)$$

где M_q – масса частицы, кг.

Скорость осаждения одиночной частицы данной формы в неограниченной среде w'_{oc} определяют по формуле

$$w'_{oc} = \varphi w_{oc}, \quad (46)$$

где φ – коэффициент формы (таблица 6.1).

Действительную скорость стесненного осаждения $w_{ст}$, учитывающую влияние на скорость осаждения явления стеснения, можно рассчитать по формуле

$$w_{ст} = 0,5w_{oc}, \quad (47)$$

Таблица 9. Значения коэффициентов формы для различных частиц

Форма частиц	Коэффициент формы
Округлая	0,77
Угловатая	0,66
Продолговатая	0,58
Пластинчатая	0,43

Поверхность осаждения F отстойника непрерывного действия определяется по формуле

$$F = \frac{G_{см}}{\rho_{осв} w_{ст}} \cdot \frac{X_{ос} - X_{см}}{X_{ос} - X_{осв}}, \quad (48)$$

где $\rho_{осв}$ – плотность осветленной жидкости, кг/м³; $G_{см}$ – количество исходной смеси, кг/с; $X_{см}$, $X_{осв}$, $X_{ос}$ – содержание вещества в исходной смеси, осветленной жидкости и осадке, масс. доли.

Фильтрация

Фильтрацией называют процесс разделения гетерогенных систем с использованием пористых перегородок, задерживающих твердую фазу и пропускающих жидкую (газовую) фазу.

Движущей силой фильтрации является разность давлений до и после фильтровальной перегородки ΔP .

При $\Delta P = \text{const}$ для расчета процесса используется уравнение

$$V^2 + 2cV = K\tau, \quad (49)$$

где V – объем фильтрата, прошедшего через 1 м² фильтрующей поверхности за время τ , м³/м²; c – константа фильтрации, характеризующая гидравлическое сопротивление фильтрующей перегородки, м³/м²; K – константа фильтрации, учитывающая режим процесса фильтрации и физико-химические свойства осадка и фильтрата, м²/с; τ – продолжительность фильтрации, с.

Константы фильтрации K и c определяются опытным путем.

Скорость фильтрации в данный момент определяется по уравнению

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{K}{2(V+c)}. \quad (50)$$

По этому уравнению может быть рассчитана и скорость промывки осадка, если вязкость промывной жидкости равна вязкости фильтрата и, если промывная жидкость проходит через фильтр тем же путем, что и фильтрат. При этих условиях скорость промывки равняется скорости фильтрации в конечный момент.

Перемешивание

Перемешивание по отношению к гетерогенным системам представляют собой процесс равномерного распределения дисперсной фазы в объеме дисперсионной среды и поддержание такого распределения в течение определенного времени.

1. Критерии подобия необходимые для расчёта мешалок.

Критерий Рейнольдса (центробежный) для процесса перемешивания жидкостей определяется по формуле

$$Re_{\Omega} = \frac{\rho n d^2}{\mu}, \quad (51)$$

где ρ – плотность перемешиваемой жидкости, кг/м³; n – частота вращения мешалки, с⁻¹; d – диаметр мешалки, м; μ – динамический коэффициент вязкости жидкости, Па·с.

Критерий мощности:

$$K_N = \frac{N_p}{\rho \cdot n^3 \cdot d^5}, \quad (52)$$

где N_p – рабочая мощность, потребляемая мешалкой, п – частота вращения, об/сек

2. Критерий мощности для геометрически подобных аппаратов с мешалками может быть вычислен:

$$K_N = \frac{C}{Re_{\Omega}^m}, \quad (53)$$

где C и m – постоянные величины для данной конструкции мешалки и определенного режима перемешивания [2].

K_N также можно определить по графику [1, 2].

После этого рабочая мощность, потребляемая мешалкой, рассчитывается по формуле

$$N_p = K_N \rho n^3 d^5. \quad (54)$$

Частота вращения мешалки рассчитывается с учетом характера приготовления растворов. При гомогенизации жидкости скорость вращения перемешивающего устройства можно определить по формуле

$$n = \frac{C_i}{\tau}, \quad (55)$$

где n – частота вращения мешалки; τ – время перемешивания (время достижения заданной гомогенизации) в аппарате диаметром D [1].

Таблица 10. Значения коэффициента C для различных видов мешалок

Тип мешалки	D/d	C_i
Турбинная: закрытого типа	3	46,0
	4	81,5
	3	56,0
	4	99,5
Лопастная	3	96,5
Пропеллерная	3	96,5

Обычно мощность в пусковой момент в два – три раза больше рабочей

$$N_{\text{пуск}} = 3N_p. \quad (568.5)$$

Установочная мощность рассчитывается по формуле

$$N_{\text{уст}} = \frac{N_{\text{пуск}} \cdot X}{\text{к.п.д.}}, \quad (578.6)$$

где x – запас мощности (20–30 %); к. п. д. – коэффициент полезного действия электродвигателя с передачей (0,94–0,95).

Задания к контрольной работе по разделу «Гидромеханические процессы»

Отстаивание

Задача 1. Определить скорость осаждения твердых шарообразных частиц дисперсного красителя диаметром d в воде, если их плотность ρ , а температура воды t .

Таблица 11. Исходные данные к задаче 1

Последние две цифры шифра зачетной книжки	Диаметр частиц d , мкм	Плотность частиц красителя, кг/м ³	Температура воды, °С
01	25	1200	10
02	26	1220	12
03	27	1240	14
04	28	1260	16
05	29	1280	18
06	25	1210	11
07	26	1310	13
08	27	1230	15
09	28	1250	17
10	29	1270	19

Задача 2. Определить диаметр отстойника для осветления водной суспензии.

Таблица 12. Исходные данные к задаче 2

Последние две цифры шифра зачетной книжки	Производительность, т/ч	Концентрация, %		Плотность частиц, кг/м ³	Диаметр частиц, мкм	Температура, °С
		x_{cm}	x_{oc}			
01	50	7	35	2000	30	20
02	60	5	30	2700	28	15
03	70	10	40	2600	30	30
04	80	6	30	1400	40	18
05	90	8	50	1700	32	25
06	100	7	28	1600	25	48
07	55	9	37	1800	34	38
08	65	6	34	2100	20	50
09	75	5	35	2200	30	22
10	85	15	27	2400	18	28

Фильтрация

Задача 3. Какое количество влажного осадка будет собрано на фильтре в результате фильтрации v , м³ суспензии относительной плотностью $\rho_{\text{отн}}$, содержащей x % твердой фазы? Влажного осадка u %.

Таблица 13. Исходные данные к задаче 3

Последние две цифры шифра зачетной книжки	Объем суспензии, м ³	Относительная плотность суспензии	Содержание твердой фазы в суспензии, %	Влажность осадка, %
01	8	1,12	20	31
02	9	1,14	18	22
03	10	1,16	15	30
04	13	1,18	21	24
05	15	1,21	23	28
06	18	1,32	19	23
07	7	1,11	22	32
08	11	1,19	14	35
09	20	1,20	18	25
10	16	1,12	15	29

Задача 4. В результате фильтрации водной суспензии, содержащей x % твердой фазы, собрано v , м³, фильтрата. Влажность осадка u %. Содержание твердой фазы в фильтрате 1 %. Сколько получено осадка, считая на сухое вещество? Задачу решить с использованием уравнений материального баланса по общему количеству веществ и по твердой фазе.

Таблица 14. Исходные данные к задаче 4

Последние две цифры шифра зачетной книжки	Содержание твердой фазы в суспензии, %	Объем фильтрата, м ³	Влажность осадка, %
01	13	11	29
02	19	17	25
03	31	12	32
04	24	18	35
05	30	19	27
06	18	22	23
07	20	13	28
08	19	24	31
09	28	15	22
10	30	25	32

Задача 5. Продолжительность фильтрации v_1 , м³, раствора на рамном фильтр-прессе τ . Найти примерное время промывки осадка объемом воды v_2 , полагая приближенно, что скорость промывки в n раз меньше скорости фильтрации. Сопротивлением ткани пренебречь. Динамические коэффициенты вязкости фильтрата и промывной воды одинаковы.

Таблица 15. Исходные данные к задаче 5

Последние две цифры шифра зачетной книжки	Объем раствора v_1 , м ³	Объем промывной воды v_2 , м ³	Отношение скорости фильтрования к скорости промывки, n
01	20	3	2
02	24	2,8	3
03	22	2,2	4
04	28	2,4	3
05	26	2,6	2
06	30	2,1	2
07	21	3,1	3
08	23	2,9	4
09	27	2,2	3
10	29	2,4	2

Задача 6. При разделении суспензии волокнисто-пленочных полимерных связующих на лабораторном фильтр-прессе с поверхностью F было получено v_1 , м³, фильтрата за время τ_1 и v_2 , м³, фильтрата за время τ_2 . Определить константы фильтрования K и C .

Таблица 16. Исходные данные к задаче 6

Последние две цифры шифра зачетной книжки	Поверхность фильтрования F , м ²	Объем фильтрата, $v_1 \cdot 10^3$, м ³	Время фильтрования τ_1 , с	Объем фильтрата, $v_2 \cdot 10^3$, м ³	Время фильтрования τ_2 , с
01	0,20	4	300	10	1100
02	0,16	3,5	320	8,5	1200
03	0,18	4,2	280	11	1300
04	0,15	7,9	160	9,1	1400
05	0,11	5	350	12	1000
06	0,12	3,9	180	8,9	810
07	0,20	4,5	510	9	1500
08	0,15	6,1	410	16	2000
09	0,17	7,0	120	14	600
10	0,11	8,0	170	20	850

Перемешивание

Задача 7. Рассчитать рабочую, пусковую и установочную мощности мешалки, установленной в аппарате диаметром D , при скорости вращения мешалки n , температуре жидкости t . Использовать при расчете табл. XXI [2].

Таблица 17. Исходные данные к задаче 7

Последние две цифры шифра зачетной книжки	Тип мешалки	Диаметр аппарата D , м	Жидкость	Скорость вращения мешалки n , мин ⁻¹	Температура жидкости t , °C
01	Четырехлопастная с лопастями под углом 60°	1,9	Глицерин	800	180
02	Четырехлопастная якорная	2,1	Вода	50	70
03	Шестилопастная турбинная	1,3	Бензол	200	20
04	Трехлопастная турбинная	1,1	Глицерин	150	100
05	Двухлопастная с лопастями под углом 45°	1,8	Уксусная кислота 100 %	120	18
06	Двухлопастная	1,5	Изопропиловый спирт	60	15
07	Четырехлопастная	1,3	Бензол	70	20
08	Шестилопастная турбинная	1,6	Изопропиловый спирт	180	17
09	Двухлопастная якорная	2,0	Вода	100	5
10	Четырехлопастная якорная	1,7	Глицерин	50	20

Литература

1. **Касаткин, А. Г.** Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов / А. Г. Касаткин. – Москва : Альянс, 2005.
2. **Павлов, К. Ф.** Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учебное пособие / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков – Москва : Альянс, 2006.
3. ГОСТ 22247–96. Насосы центробежные консольные для воды. Межгосударственный стандарт. – Москва : Госстандарт России: Изд-во стандартов.
4. Насосное оборудование Calpeda. – 2013. – URL: www.calpeda.ru. – Текст : электронный.
5. Центробежные насосы – устройство, выбор, характеристики. – 2013. – URL: www.pumps.net.ru. – Текст : электронный.
6. ГОСТ 3262–75. Трубы стальные водопроводные. Межгосударственный стандарт. – Москва : Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2007.
7. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч. 2. – Санкт-Петербург : АНО НПО «Профессионал», 2006.
8. **Багров, И. В.** Процессы и аппараты химической технологии. Лабораторный практикум / И. В. Багров, Э. Н. Чулкова, В. Д. Шаханов. – Санкт-Петербург : СПГУТД, 2013.
9. **Багров, И. В.** Курсовое проектирование по дисциплине "Процессы и аппараты химической технологии" : учебное пособие / И. В. Багров, В. Д. Шаханов, Э. Н. Чулкова,. – Санкт-Петербург : СПГУТД, 2012. – 117 с. – Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_ext_inf_publish.php?id=1136, по паролю. – Текст : электронный.

Содержание дисциплины (первый семестр изучения дисциплины)

Раздел 1. Гидравлика
Тема 1. Введение. Предмет дисциплины и его задачи. Классификация процессов химической технологии.
Тема 2. Основы теории переноса. Жидкость. Определение. Свойства жидкости. Лабораторная работа. Определение вязкости технологических растворов
Тема 3. Гидростатика. Гидростатическое давление. Основное уравнение гидростатики. Лабораторная работа. Определение силы гидростатического давления.
Тема 4. Уравнения движения жидкости. Лабораторная работы. Определение режима течения жидкости. Определение коэффициентов расхода при истечении жидкости из отверстий и насадков. Экспериментальное определение коэффициентов местных сопротивлений и трения.
Тема 5. Физическое моделирование химико-технологических процессов
Раздел 2. Гидравлические процессы
Тема 6. Течение жидкости через зернистый слой. Гидродинамика взвешенного слоя. Лабораторная работа. Испытание гидродинамики зернистого слоя.
Тема 7. Классификация насосов. Основные параметры работы. Устройство и принцип действия центробежного и объемных насосов. Лабораторные работы. Испытание центробежного насоса. Испытание шестерённого насоса.
Тема 8. Сжатие и перемещение газов. Основные закономерности сжатия газов. Устройство и принцип действия
Раздел 3. Гидромеханические процессы
Тема 9. Классификация неоднородных систем и способы их разделения. Процесс отстаивания. Конструкции отстойников.
Тема 10. Процесс фильтрования. Конструкции фильтров. Лабораторная работа. Экспериментальное определение констант фильтрования.
Тема 11. Процесс центрифугирования. Конструкции центрифуг.
Тема 12. Очистка газов от твёрдых и жидких частиц. Конструкции пылеуловителей.
Тема 13. Перемешивание. Мощность, потребляемая мешалкой. Конструкции мешалок.

**Перечень вопросов к экзамену по дисциплине
«Процессы и аппараты химической технологии»
(первый семестр изучения дисциплины)**

№ вопроса	Формулировки теоретических вопросов
1	Методы подобия. Причины возникновения, основные принципы. Подобное преобразование уравнений Навье-Стокса, критерии подобия Эйлера, Рейнольдса, Фруда и их физический смысл.
2	Истечение жидкостей из отверстий и насадков. Расчёт скорости и расхода, явления сжатия струи.
3	Уравнение Эйлера движения невязкой, несжимаемой жидкости. Стационарные и нестационарные течения. Уравнение Бернулли.
4	Предмет, цели и задачи гидравлики.
5	Насосы и трубопроводы, принципы расчёта насосных установок, характеристики объёмных, инерционных насосов, трубопроводов, совмещённая графическая характеристика насоса и трубопровода.
6	Графическая характеристика трубопровода, что это такое, как рассчитывается, зачем нужна.
7	Определения и основные свойства жидких сред, сжимаемые и несжимаемые (капельные) жидкости.
8	Параметры течения жидкости в трубе. Расход, средняя скорость, гидравлический радиус трубы, эквивалентный диаметр, уравнение сплошности (неразрывности) потока.
9	Параметры жидкой среды, плотность, вязкость, скорость, гидростатическое давление – определения и основные свойства.
10	Правила расчёта сил давления, действующих на произвольно ориентированные плоские поверхности. Примеры расчёта сил давления на вертикальную и горизонтальную крышку заданной площади и глубины погружения.
11	Гидравлические сопротивления. Определения, типы, физический смысл, способы расчёта сопротивлений на участке трубы, коэффициенты сопротивлений, уравнения Дарси – Вейсбаха и Альштуля.
12	Уравнение равновесия неподвижной жидкости и основное уравнение гидростатики.
13	Дисперсные системы, эмульсии, дымы и туманы, пыли. Параметры дисперсных систем, распределение частиц по размерам, концентрация, насыпная и действительная плотность, порозность. Методы определения параметров дисперсных систем.
14	Отстаивание, горизонтальные, радиальные и вертикальные отстойники, особенности, области применения, плюсы и минусы
15	Перемешивание, типы мешалок, критерии мощности, Рейнольдса, Фруда и способ подбора мешалки
16	Фильтрование, предназначение, принцип действия, фильтрующие материалы, плюсы и минусы. Скорость фильтрование и уравнение фильтрования
17	Установки кипящего слоя, конструкция, предназначение, плюсы и минусы, гидравлическая характеристика кипящего слоя, критические скорости и способы их расчёта
18	Мокрая очистка газов от пыли. Основные принципы, особенности, конструкции плюсы и минусы, скрубберы, пенные аппараты, газопромыватели, трубы Вентури
19	Решение уравнения Навье-Стокса в случае стационарного ламинарного потока в круглой трубе, законы течения Пуазейля.
20	Закон Стокса движения гладкого шарика в вязкой жидкости
21	Закон сохранения энергии в движущейся несжимаемой жидкости. Напор, определение, скоростная, пьезометрическая и геометрическая составляющая напора.
22	История гидравлики, инженерные конструкции, аппараты и законы, открытые в древности.
23	Определение и смысл элементарного объёма жидкости. Вывод объёмных плотностей сил тяжести, инерции, давления, вязкости. Уравнения неразрывности потока. Уравнение Навье-Стокса движения вязкой несжимаемой жидкости.
24	Расчёт разрежения, создаваемого водоструйным насосом, исходя из уравнения Бернулли.
25	Местные сопротивления, их типы, способы расчёта падения напора, что такое напор
26	Режимы течения жидкости, характеристика, причины возникновения, формальное описание с помощью критерия Рейнольдса, его физический смысл и простейший вывод.
27	Расчёт усилия, развиваемого гидравлическим прессом
28	Гидравлический удар, почему возникает, полезные и вредные свойства, способы использования и предотвращения
29	Геометрические параметры трубопроводов, внутренний и внешний диаметр, шероховатость, эквивалентный диаметр
30	Режимы течения воды в трубопроводах в зависимости от скорости и шероховатости, гидравлически

	гладкие и шероховатые трубы
31	Кинетика осаждения частиц близких к сферическим в вязких средах, числа Рейнольдса, Архимеда и их связь в ламинарной и турбулентной области
32	Способы расчёта и подбора отстойников
33	Циклоны, центрифуги, вихревые камеры, предназначение, принцип работы, достоинства и недостатки
34	Электрофилтры, назначение, конструкция, принцип действия, плюсы и минусы, способы подбора и расчёта размеров
35	Гравитационная очистка газов от пыли, пылевые мешки и камеры, принцип действия, особенности, плюсы и минусы, способы расчёта и подбора
36	Способы расчёта и подбора центрифуг
37	Гидроприводы, типы, конструкции, принцип действия, достоинства и недостатки.
38	Устройства для измерения скорости и расхода жидкости и газа, лопастные, поплавковые, Пито-Прандтля и др, конструкции, принцип действия, плюсы и минусы.
39	Устройства для измерения давления, манометры, U образники, конструкции, принцип действия, достоинства и недостатки.
40	Водонапорные башни, устройство, зачем нужны, плюсы и минусы
41	Водопроводная арматура, вентили, задвижки, переходники, соединения, тройники, конструкции, особенности, плюсы и минусы
42	Поршневой насос односторонний, устройство, достоинства и недостатки.
43	Поршневой насос двухсторонний принцип действия, устройство, достоинства и недостатки.
44	Плунжерный насос, принцип действия, устройство, достоинства и недостатки.
45	Мембранный насос, принцип действия, устройство, достоинства и недостатки.
46	Способы сглаживания пульсаций при работе поршневых насосов, многоцилиндровые насосы, воздушные колпаки
47	Ротационный пластинчатый насос, принцип действия, устройство, достоинства и недостатки.
48	Водокольцевой насос, принцип действия, устройство, достоинства и недостатки.
49	Шестерённый насос, принцип действия, устройство, достоинства и недостатки.
50	Винтовой насос, принцип действия, устройство, достоинства и недостатки.
51	Гидравлические прессы, назначение, конструкции, плюсы и минусы.
52	Осевой вентилятор конструкция, особенности, плюсы и минусы
53	Центробежный насос, устройство, принцип действия, особенности, плюсы и минусы
54	Многоступенчатая турбогазодувка, устройство, работа, плюсы и минусы
55	Вихревой насос, устройство, принцип действия, особенности, плюсы и минусы
56	Струйные насосы, конструкции, принцип действия, особенности, плюсы и минусы
57	Эрлифты, конструкции, принцип действия, особенности, плюсы и минусы
58	Монтежю, конструкции, принцип действия, особенности, плюсы и минусы
59	Гидравлический таран, конструкции, принцип действия, особенности, плюсы и минусы
60	Щековая дробилка, конструкция, принцип действия, достоинства и недостатки
61	Шаровые мельницы, конструкция, особенности, плюсы и минусы
62	Вибромельницы, устройство, принцип работы, особенности, плюсы и минусы
63	Коллоидная мельница, конструкция, особенности, плюсы и минусы