

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Методические указания к практическим работам**  
**ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ БИОТЕХНОЛОГИИ /**  
**PROCESSES AND APPARATUS OF BIOTECHNOLOGY**

Направление подготовки 19.03.01 Биотехнология  
Направленность (профиль) Промышленная биотехнология

Ставрополь 2026

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                     |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4 семестр</b>                                                                                    | <b>стр</b> |
| Практическая работа № 1. Трубопроводы и насосы                                                      | 6          |
| Практическая работа № 2. Гидростатика                                                               | 11         |
| Практическая работа № 3. Гидродинамика                                                              | 13         |
| Практическая работа № 4. Расчет осадительного отстойника                                            | 15         |
| Практическая работа № 5. Расчет осадительной центрифуги                                             | 17         |
| Практическая работа № 6. Расчет рамного фильтр-пресса                                               | 19         |
| Практическая работа № 7. Расчет мешалок                                                             | 22         |
| Практическая работа № 8. Расчет теплообменника «труба в трубе»                                      | 25         |
| Практическая работа № 9. Расчет кожухотрубного теплообменника                                       | 29         |
| Практическая работа № 10. Расчет пластинчатого теплообменника                                       | 34         |
| Практическая работа № 11. Изучение неоднородных полидисперсных пищевых систем в биотехнологии       | 39         |
| Практическая работа № 12. Расчет абсорбера                                                          | 44         |
| <b>5 семестр</b>                                                                                    |            |
| Практическая работа № 13. Расчет адсорбера                                                          | 47         |
| Практическая работа № 14. Исследование гомогенизации пищевого сырья и гомогенизации молочного сырья | 51         |
| Практическая работа № 15. Расчет распылительной сушилки                                             | 57         |
| Практическая работа № 16. Расчет однокорпусного вакуум-аппарата                                     | 63         |
| Практическая работа № 17. Расчет многокорпусного вакуум-аппарата                                    | 65         |
| Практическая работа № 18. Аппаратура для проведения процессов ферментации                           | 70         |

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Целью курса дисциплины специализации «Процессы и аппараты биотехнологии» является формирование у обучающихся общекультурных и профессиональных компетенций.

В задачи курса входит изучение следующих вопросов:

организация проектных работ; основные задачи технологического проектирования; составление ТЭО; технический проект; основные блоки технологической схемы и их назначение; основные методы исследования типовых процессов и аппаратов в биотехнологическом производстве; стерилизация технологических потоков и оборудования; расчет режимов стерилизации; материальный и энергетический балансы биотехнологических процессов; тепло - и массообменные процессы стадии ферментации и их расчет.

## **1. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ**

### **Указания по технике безопасности к выполнению лабораторных работ**

#### **Общие правила техники безопасности в химической лаборатории**

1. Работать в лаборатории необходимо в халате из хлопковой или хлопчатобумажной ткани (но не из синтетики!). Рабочий халат должен быть по длине ниже колен и застегиваться спереди. В кармане халата должно быть маленькое чистое сухое полотенце или платок для быстрого удаления попавших на кожу твердых или жидких реагентов. При работе с особо опасными веществами дополнительно надевают длинный фартук из поливинилхлорида и нарукавники. При необходимости для защиты лица и глаз используют защитные маски и защитные очки, для защиты рук – специальные защитные перчатки, а для защиты дыхательных путей – респираторы. Волосы должны быть тщательно убраны (используют шапочку или платок) или закреплены и не свисать по сторонам.

2. Рабочее место следует поддерживать в чистоте, не загромождать его посудой и побочными вещами.

3. Студентам запрещается работать в лаборатории без присутствия преподавателя или лаборанта, а также в неустановленное время без разрешения преподавателя.

4. До выполнения каждой лабораторной работы можно приступить только после получения инструктажа по технике безопасности и разрешения преподавателя.

5. Приступая к работе, необходимо: изучить методику работы, правила ее безопасного выполнения; проверить соответствие взятых веществ тем веществам, которые указаны в методике работы.

#### **Правила техники безопасности в лаборатории с электрооборудованием и электроприборами**

1. Химические лаборатории согласно степени опасности поражения электрическим током относятся к помещениям с повышенной или особой опасностью, которая обусловлена возможностью воздействия на электрооборудование химически активных сред.

2. Все работы, связанные с применением электроприборов должны проходить под наблюдением преподавателя (лаборанта).

3. При работе с водяной баней нельзя пробовать степень нагрева воды рукой.

4. При неисправности в работе электроприбора необходимо обратиться к преподавателю. Чинить самостоятельно приборы запрещается.

5. При поражении электрическим током, если пострадавший остается в соприкосновении с токоведущими частями, необходимо немедленно выключить ток с помощью пускателя или вывернуть охранную пробку или перерубить токопроводящий провод изолированным инструментом. К пострадавшему, пока он находится под током, нельзя касаться незащищенными руками (без резиновых перчаток). Если пострадавший потерял сознание, после выключения тока нужно немедленно, не дожидаясь врача, делать искусственное дыхание.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1

### ТРУБОПРОВОДЫ И НАСОСЫ

#### Теоретическое обоснование

На предприятиях АПК коммуникации трубопроводов, по которым жидкие продукты поступают из одного аппарата или резервуара в другой, достигают длины, измеряемой десятками и сотнями метров. При этом трубопроводы подбирают и монтируют так, чтобы по возможности обеспечить минимальное сопротивление движению жидкости и исключить отрицательное влияние трубопроводов на качество продукта. В случае неправильного монтажа трубопроводов в углах коммуникаций может скапливаться воздух, вследствие чего молоко вспенивается и изменяется дисперсность продукта. На дисперсность и качество продукта отрицательно влияет чрезмерное повышение скорости движения жидкости по трубопроводам.

Трубопроводы, применяемые в пищевой промышленности, изготавливают преимущественно из нержавеющей стали. Диаметр металлических трубопроводов 25, 35, 50, 76 мм, толщина стенок 1—2 мм.

При подборе трубопроводов необходимо определить диаметр трубопроводов, потери напора и давление, создаваемое вакуум-компрессионной системой.

Диаметр трубопровода  $d$  (в мм) рассчитывают по формуле

$$d = \sqrt{4M / \pi v} \quad (1.1)$$

где  $v$  — скорость движения жидкости, м/с,  $M$  — количество жидкости, м<sup>3</sup>/с

Скорость движения жидких молочных продуктов принимают в следующих пределах: молока - 0,5—1,5 м/с; сливок, сгущенного молока и сметаны - 0,3—0,5; обезжиренного молока, пахты, сыворотки - 1—2 м/с.

Потери напора, или гидравлическое сопротивление движению жидкости  $H_c$  (в м) в трубопроводах, определяют по формуле

$$H_c = (v^2 / 2g) (\xi_{тр} l / d + \Sigma \xi_{м.с} + 1), \quad (1.2)$$

где  $l$  — длина трубопровода, м;

$\xi_{тр}$  — коэффициент сопротивления трения;

$\xi_{м.с}$  — коэффициент местных сопротивлений.

Коэффициент сопротивления трения зависит от режима движения жидкости:

при турбулентном режиме

$$\xi_{тр} = 0,3164 / \sqrt[4]{Re} \quad (1.3)$$

при ламинарном режиме

$$\xi_{тр} = 64 / Re \quad (1.4)$$

Критерий Рейнольдса вычисляется по формуле

$$Re = v^* d / \nu$$

где  $\nu$  — кинематическая вязкость продукта,  $m^2/c$

Коэффициент местных сопротивлений  $\xi_{мс}$  зависит от вида сопротивления.

1. При входе жидкости в трубу коэффициент местных сопротивлений  $\xi_{мс}$  зависит от формы входной кромки трубы. Если края острые,  $\xi_{мс} = 0,5$ , если края тупые,  $\xi_{мс} = 0,25$ . При закругленной кромке трубы  $\xi_{мс} = 0,06—0,005$ .

2. При выходе из трубы  $\xi_{мс} = 1$

3. При внезапном расширении трубы коэффициент местных сопротивлений зависит от отношения квадрата диаметра узкой трубы к квадрату диаметра широкой трубы:

|                 |      |      |      |      |     |      |      |      |      |   |
|-----------------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|---|
| $d_1^2 / d_2^2$ | 0,1  | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5 | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9  | 1 |
| $\xi_{мс}$      | 0,81 | 0,64 | 0,49 | 0,36 | 0,3 | 0,16 | 0,09 | 0,04 | 0,01 | 0 |

4. При внезапном сужении трубы коэффициент местных сопротивлений  $\xi_{мс}$  также зависит от отношения квадрата диаметра узкой трубы к квадрату диаметра широкой:

|                 |      |      |      |      |      |     |      |     |      |      |   |
|-----------------|------|------|------|------|------|-----|------|-----|------|------|---|
| $d_1^2 / d_2^2$ | 0,01 | 0,1  | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5 | 0,6  | 0,7 | 0,8  | 0,9  | 1 |
| $\xi_{мс}$      | 0,5  | 0,47 | 0,45 | 0,38 | 0,34 | 0,3 | 0,25 | 0,2 | 0,15 | 0,09 | 0 |

5. При наличии колен в трубах (рис. 1, а) коэффициент местных сопротивлений зависит от угла колена  $\alpha$ :

|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\alpha$   | 5    | 10   | 15   | 30   | 45   | 60   | 90   |
| $\xi_{мс}$ | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,38 | 0,13 | 0,47 | 1,13 |

6. При отводах (рис. 1, б), устанавливаемых на коммуникациях трубопроводов, коэффициент местных сопротивлений определяют по формуле

$$\xi_{мс} = [0,131 + 0,16(d / R)^{3,5}] \alpha / 90, \quad (1.5)$$

где  $d$ —диаметр трубы, м;  $R$ — радиус закругления, м

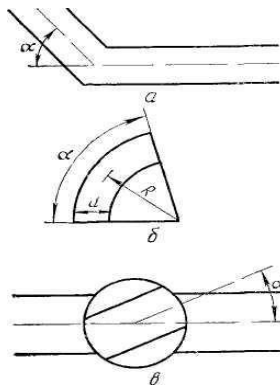


Рисунок 1 - Схема элементов трубопроводов:

$a$  — колен;  $b$  — отводов;  $в$ —кранов.

7. В кранах (рис. 1, в) коэффициент местных сопротивлений зависит от угла поворота крана  $\alpha$ :

|            |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| $\alpha$   | 5    | 10   | 20   | 30   | 40   | 45   | 50   | 60   | 65   | 70  |
| $\xi_{мс}$ | 0,05 | 0,29 | 1,56 | 5,47 | 17,3 | 31,2 | 52,6 | 20,6 | 48,6 | 675 |

Необходимое избыточное давление  $p_{ж}$  (в Па) для подъема жидкости при вакуум-компрессионной системе подачи определяют по формуле

$$p_{и} = (H_n + H_c) \rho_{ж} g, \quad (1.6)$$

где  $H_n$  — высота подъема жидкости, м;

$H_c$  — гидравлическое сопротивление движению жидкости в трубопроводе, м.

Гидравлическое сопротивление движению жидкости  $H_c$  рассчитывают по формуле (1.2). При этом скорость движения жидкости в трубопроводе определяют по формуле

$$v = \sqrt{2 (p_{и} - H_n^* \rho_{ж} g) / H_c \rho_{ж}} \quad (1.7)$$

Вакуум, необходимый для подъема жидкости на заданную высоту, (в Па) определяют по формуле

$$P_v = 10 \rho_v g - p_0 = 10 \rho_v g - (H_n^* \rho_{ж} g + H_c^* \rho_{ж} g), \quad (1.8)$$

где  $p_0$  — остаточное давление в резервуаре, Па.

В молочной промышленности применяют плунжерные, центробежные, роторные, шестеренные, диафрагменные, винтовые, шланговые насосы. Наибольшее распространение получили центробежные насосы.

Известны центробежные насосы для перекачивания высоковязких и пластических продуктов (сливок, сметаны, сгущенного молока). Принцип действия всех центробежных насосов одинаков.

Основными показателями, характеризующими работу центробежных насосов, являются высота подачи жидкости и потребляемая мощность. Высота подачи жидкости от уровня всасываемой жидкости до наивысшей точки подъема ее, называемая полным напором  $H^*$  (в м), зависит от расположения оси вращения (горизонтально или вертикально) рабочего колеса центробежного насоса.

Для горизонтального насоса

$$H = (p_d - p_s) / \rho_{ж} g + (v_d^2 - v_s^2) / 2g \quad (1.9)$$

Для вертикального насоса

$$H = H_s + p_d / \rho_{ж} g + v_d^2 / 2g \quad (1.10)$$

где  $p_d$  - гидростатическое давление продукта, измеряемое у выходного патрубка, Па;

$p_s$  - гидростатическое давление, измеряемое у входного патрубка, Па;

$H_s$  — расстояние от уровня жидкости до оси колена нагнетательного патрубка, м;

$v_d$  - скорость движения жидкости в нагнетательном патрубке, м/с;

$v_s$  - скорость движения жидкости во всасывающем патрубке, м/с.

Высоту подачи жидкости, или полный напор  $H$ , создаваемый рабочим колесом насоса, чаще всего определяют по формуле

$$H = v_0^2 / g = \pi^2 n^2 D^2 / g \quad (1.11)$$

где  $v_0$  — окружная скорость рабочего колеса насоса, м/с;

$n$  — частота вращения рабочего колеса, 1/с;

$D$  — диаметр рабочего колеса, м

Мощность, потребляемую центробежными насосами,  $N$  (в кВт) определяют по формуле:

$$N = M \cdot n \cdot \rho_{\text{ж}} / 10^2 \cdot \eta \quad (1.12)$$

где  $M$  — производительность насоса, м<sup>3</sup>/с;

$\eta$  - коэффициент полезного действия центробежного насоса ( $\eta = 0,2—0,4$ ).

## 1.2 Индивидуальные задания

Определить диаметр трубопровода для транспортировки  $M$  м<sup>3</sup> молока в час при температуре  $t^\circ \text{C}$  из приемных резервуаров к универсальным пластинчатым установкам. Вычислить минимальный напор, создаваемый насосом, достаточный для преодоления гидравлических сопротивлений в трубопроводе, если общая длина его  $L$  м. На трубопроводе имеются  $n$  проходных кранов (с углом поворота  $\alpha^\circ$ ), радиусом  $R$  см.

Данные своего варианта взять из таблицы 1.1

Таблица 1.1 – Данные для расчета по индивидуальным заданиям

| Вариант | $M$ , м <sup>3</sup> /ч | $L$ м | $n$ | $\alpha^\circ$ | $R$ см |
|---------|-------------------------|-------|-----|----------------|--------|
| 0       | 12                      | 15    | 5   | 90             | 45     |
| 1       | 15                      | 20    | 6   | 20             | 60     |
| 2       | 10                      | 16    | 4   | 25             | 90     |
| 3       | 14                      | 15    | 5   | 30             | 50     |
| 4       | 16                      | 18    | 4   | 90             | 45     |
| 5       | 18                      | 16    | 5   | 45             | 50     |
| 6       | 20                      | 12    | 6   | 60             | 45     |
| 7       | 12                      | 16    | 4   | 90             | 50     |
| 8       | 18                      | 22    | 5   | 45             | 45     |
| 9       | 16                      | 20    | 6   | 60             | 50     |
| 10      | 14                      | 16    | 4   | 90             | 45     |
| 11      | 20                      | 16    | 5   | 60             | 50     |
| 12      | 18                      | 20    | 6   | 90             | 45     |
| 13      | 12                      | 16    | 4   | 90             | 40     |
| 14      | 16                      | 22    | 5   | 60             | 60     |
| 15      | 12                      | 15    | 6   | 45             | 45     |
| 16      | 15                      | 18    | 4   | 60             | 60     |
| 17      | 10                      | 22    | 5   | 90             | 90     |

### 1.3 Пример расчета

1. Из аппаратного цеха в один из резервуаров молокохранилища в 1 ч поступает  $12 \text{ м}^3$  молока при  $5^\circ \text{ С}$ . Длина трубопровода 15 м. Трубопровод имеет 5 отводов  $R = 50 \text{ см}$ , расположенных под углом  $90^\circ$ . Определить диаметр трубопровода и гидравлические сопротивления.

Диаметр трубопровода определяют по формуле (1.1), принимая  $V = 1 \text{ м/с}$ ,

$$d = \sqrt{(12 \cdot 4) / (3600 \cdot 3,14 \cdot 1)} = 0,065 \text{ м.}$$

Стандартных трубопроводов такого диаметра нет, поэтому необходимо установить трубопровод диаметром 76 мм. Далее по формуле (1.5) вычисляют скорость движения молока в трубопроводе диаметром 76 мм

$$V = (12 \cdot 4) / (3600 \cdot 3,14 \cdot 0,076^2) = 0,8 \text{ м/с.}$$

Затем устанавливают режим движения жидкости. Для этого по формуле (III—6) определяют критерий  $Re$

$$Re = (0,8 \cdot 0,076) / (0,028 \cdot 10^{-4}) = 21700$$

Следовательно, режим движения жидкости турбулентный. Исходя из этого, коэффициент трения определяют по формуле (1.3)

$$\xi_{\text{тр}} = 0,3164 / \sqrt[4]{21700} = 0,026$$

Суммарный коэффициент местных сопротивлений складывается из следующих величин:

$$\Sigma \xi_{\text{тр}} = \xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{вых}} + \xi_{\text{отв}}, \quad (1.13)$$

где  $\xi_{\text{вх}}$ —коэффициент местных сопротивлений на входе продукта в трубопровод;  $\xi_{\text{вых}}$  — коэффициент местных сопротивлений на выходе продукта из трубопровода;  $\xi_{\text{отв}}$ — коэффициент местных сопротивлений в отводах.

В соответствии с формулой (1.7) коэффициент местного сопротивления в отводах составит

$$\xi_{\text{отв}} = [0,131 + 0,16(0,076 / 0,5)^{3,5}] = 0,000128$$

Если принять, что края входной кромки трубы тупые, то суммарный коэффициент местных сопротивлений можно вычислить по формуле (1.13)

$$\Sigma \xi_{\text{мс}} = 0,25 + 1 + 5 \cdot 0,1311 = 1,9$$

Пользуясь формулой (1.2) можно установить общие гидравлические сопротивления в трубопроводе

$$H = (0,8^2 / 2 \cdot 9,81) \cdot [0,026(15 / 0,076) + 1,9 + 1] = 0,27 \text{ м}$$

## Практическая работа № 2

## ГИДРОСТАТИКА

## Контрольные вопросы к разделу

1. Какие законы жидкостей изучаются в разделах «Гидростатика» и «Гидродинамика»?
2. Какими свойствами обладает каплярная жидкость?
3. Какие силы действуют на жидкость в случае абсолютного и относительного покоя?
4. Какими свойствами обладает гидростатическое давление?
5. В каких единицах измерения выражается гидростатическое давление?
6. Какие приборы используют для измерения давления?
7. Что выражает основное уравнение гидростатики?
8. От чего зависит выигрыш в силе в гидравлических прессах?

## Задача № 2.1

Определить абсолютное и избыточное давление на дно открытого резервуара, заполненного водой. Высота жидкости в резервуаре  $h$  м.

Таблица 2.1 – Индивидуальные задания к задаче 2.1

| № вар. | среда | $\rho_{\text{ср}}, \text{кг/м}^3$ | $h, \text{м}$ |
|--------|-------|-----------------------------------|---------------|
| 1      | вода  | 1000                              | 2             |
| 2      | вода  | 1000                              | 4             |
| 3      | вода  | 1000                              | 6             |
| 4      | вода  | 1000                              | 8             |
| 5      | вода  | 1000                              | 10            |
| 6      | масло | 880                               | 2             |
| 7      | масло | 880                               | 4             |
| 8      | масло | 880                               | 6             |
| 9      | масло | 880                               | 8             |
| 10     | масло | 880                               | 10            |
| 11     | сироп | 1250                              | 2             |
| 12     | сироп | 1350                              | 4             |
| 13     | сироп | 1150                              | 6             |
| 14     | сироп | 1200                              | 8             |
| 15     | сироп | 1400                              | 10            |
| 16     | сироп | 1300                              | 2             |
| 17     | сироп | 1400                              | 4             |

## Пример выполнения задания

Абсолютное давление определяется по формуле

$$P_{\text{абс}} = P_0 + \rho \cdot g \cdot h,$$

где давление  $P_0$  – давление над поверхностью жидкости, а так как резервуар открыт, то

$$P_0 = P_{\text{атм}} = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па, тогда}$$

$$P_{\text{абс}} = 9,81 \cdot 10^4 + 1000 \cdot 9,81 \cdot 3 = 127530 \text{ Па,}$$

$$P_{\text{изб}} = P_{\text{абс}} - P_{\text{атм}} = P_0 + \rho \cdot g \cdot h - P_0 = \rho \cdot g \cdot h \cdot$$

$$P_{\text{изб}} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 3 = 29430 \text{ Па.}$$

**Задача № 2.1**

Вакуумметр показывает вакуум в аппарате, равный  $P_{\text{ВАК}}$  мм. рт. ст.,

$P_{\text{АТМ}} = 750$  мм. рт. ст. (98100 Па).

Определить абсолютное давление в аппарате (в Па). На какую высоту (h) поднимается вода в барометрической трубе?

Таблица 2.2 – Индивидуальные задания к задаче 2.1

| № вар. | $P_{\text{ВАК}}$ , мм. рт. ст. |
|--------|--------------------------------|
| 1      | 100                            |
| 2      | 200                            |
| 3      | 300                            |
| 4      | 400                            |
| 5      | 600                            |
| 6      | 150                            |
| 7      | 250                            |
| 8      | 350                            |
| 9      | 450                            |
| 10     | 550                            |
| 11     | 652                            |
| 12     | 160                            |
| 13     | 180                            |
| 14     | 220                            |
| 15     | 240                            |
| 16     | 280                            |
| 17     | 320                            |

**Пример выполнения задания**

Абсолютное давление в аппарате для нашего случая будет равно

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{атм}} - P_{\text{вак}}; \quad P_{\text{абс}} = 750 - 500 = 250 \text{ мм. рт. ст. или}$$

$$P_{\text{абс}} = 250 \cdot 133,3 = 33325 \text{ Па,}$$

где 133,3 – коэффициент перевода из мм. рт. ст. в Па.

Высота столба воды в барометрической трубе рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{атм}} = P_{\text{абс}} + \rho \cdot g \cdot h, \text{ отсюда}$$

$$h = \frac{P_{\text{атм}} - P_{\text{абс}}}{\rho \cdot g} = \frac{98100 - 33325}{1000 \cdot 9,81} = 6,6$$

## ГИДРОДИНАМИКА

## Контрольные вопросы к разделу

1. Под действием, каких сил жидкость движется по трубопроводам?
2. Когда за расчетный линейный размер принимают эквивалентный размер?
3. В чем сущность закона неразрывности потока жидкости?
4. Какие выводы можно сделать из рассмотрения уравнения Бернулли?
5. Для каких расчетов используют уравнения Дарси, Вейсбаха?
6. Как рассчитывается коэффициент гидравлического сопротивления, и от каких факторов он зависит?
7. Как определить коэффициенты местных сопротивлений?
8. В чем заключается расчет трубопроводов?

## Задача № 1.

Определить режим течения воды в межтрубном пространстве теплообменника типа «труба в трубе» при следующих условиях: наружный диаметр внутренней трубы  $d_H \times \delta$  ст мм, наружный диаметр наружной трубы  $D_H \times \delta$  ст мм, массовый расход воды  $G$  кг/ч, плотность  $\rho$  кг/м<sup>3</sup>, динамический коэффициент вязкости  $\mu$  Па\*с.

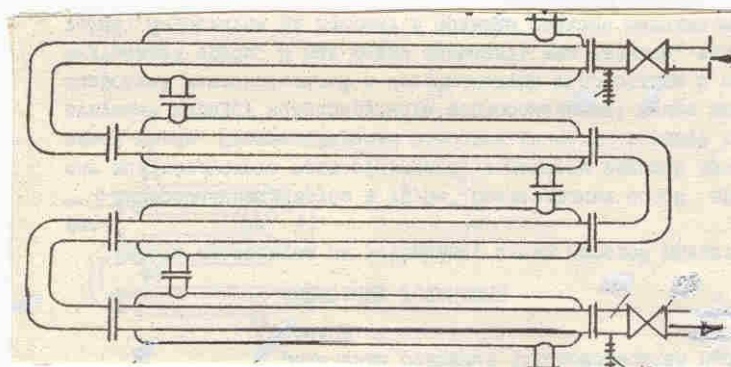


Рис. 3.1 – Схема теплообменника

Таблица 2.1 – Индивидуальные задания к задаче 2.1

| № вар. | $D_H \times \delta$ ст, мм | $d_H \times \delta$ ст, мм | $G$ , кг/ч | $\rho$ , кг/м | $\mu$ , Па*с          |
|--------|----------------------------|----------------------------|------------|---------------|-----------------------|
| 1      | 57x2,5                     | 27x2,0                     | 2000       | 1100          | $1,10 \times 10^{-3}$ |
| 2      | 53x2,0                     | 22x1,5                     | 2500       | 1150          | $1,20 \times 10^{-3}$ |
| 3      | 75x2,5                     | 38x2,0                     | 3500       | 1050          | $1,30 \times 10^{-3}$ |
| 4      | 105x2,5                    | 42x2,5                     | 4000       | 1040          | $1,05 \times 10^{-3}$ |
| 5      | 53x1,5                     | 22x1,5                     | 4500       | 1020          | $1,07 \times 10^{-3}$ |
| 6      | 57x2,5                     | 57x2,5                     | 3600       | 1070          | $1,25 \times 10^{-3}$ |
| 7      | 53x2,0                     | 53x2,0                     | 3200       | 1150          | $1,15 \times 10^{-3}$ |
| 8      | 75x2,5                     | 75x2,5                     | 2000       | 1100          | $1,17 \times 10^{-3}$ |
| 9      | 105x2,5                    | 42x2,5                     | 2500       | 1150          | $1,20 \times 10^{-3}$ |
| 10     | 53x1,5                     | 22x1,5                     | 3500       | 1050          | $1,10 \times 10^{-3}$ |
| 11     | 57x2,5                     | 27x2,0                     | 3600       | 1040          | $1,20 \times 10^{-3}$ |
| 12     | 53x2,0                     | 22x1,5                     | 3800       | 1020          | $1,30 \times 10^{-3}$ |
| 13     | 75x2,5                     | 38x2,0                     | 4200       | 1050          | $1,17 \times 10^{-3}$ |
| 14     | 105x2,5                    | 42x2,5                     | 4800       | 1100          | $1,22 \times 10^{-3}$ |
| 15     | 57x2,5                     | 57x2,5                     | 4500       | 1050          | $1,10 \times 10^{-3}$ |
| 16     | 53x2,0                     | 53x2,0                     | 3600       | 1040          | $1,20 \times 10^{-3}$ |
| 17     | 75x2,5                     | 75x2,5                     | 3200       | 1020          | $1,30 \times 10^{-3}$ |

**Пример решения**

Определить режим течения воды в межтрубном пространстве теплообменника типа «труба в трубе» при следующих условиях: наружный диаметр внутренней трубы  $d_H \times \delta_{ст} = 25 \times 2$  мм, наружный диаметр наружной трубы  $D_H \times \delta_{ст} = 51 \times 2,5$  мм, массовый расход воды  $G = 4000$  кг/ч, плотность  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, динамический коэффициент вязкости  $\mu = 1,0 \times 10^{-3}$  Па·с.

1. Определяем скорость движения воды в межтрубном пространстве

$$v = \frac{V}{f} = \frac{G}{\rho \cdot f \cdot 3600} = \frac{4000}{1000 \cdot 3600 \cdot 0,785 \cdot (0,046^2 - 0,025^2)} = 0,949 \text{ м/с},$$

$$f = \frac{\pi \cdot (D_{ВН}^2 - d_H^2)}{4} \cdot \pi = 0,785;$$

где  $V = G/\rho$  - объемный расход воды, м<sup>3</sup>/с;

$f$  - площадь сечения кольцевого пространства, м<sup>2</sup>,

$$f = \frac{\pi \cdot (D_{ВН}^2 - d_H^2)}{4} \cdot \pi = 0,785;$$

$D_{ВН}$  - внутренний диаметр наружной трубы, м.  $D_{ВН} = D_H - 2\delta_{ст}$

2. Эквивалентный диаметр кольцевого сечения рассчитывается по формуле:

$$d_{\text{эк}} = \frac{4 \cdot f}{\pi} = \frac{4 \cdot \pi \cdot (D_{ВН}^2 - d_H^2)}{4 \cdot \pi \cdot (D_{ВН} + d_H)} = D_{ВН} - d_H = 0,046 - 0,025 = 0,021 \text{ м}.$$

3. Находим значение критерия Рейнольдса (Re):

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{0,949 \cdot 0,021 \cdot 1000}{1 \cdot 10^{-3}} = 19929.$$

Таким образом, режим турбулентный.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №4

### Расчет осадительного отстойника

**Задание.** Определить диаметр отстойника производительностью по водной суспензии  $G_H$ , т/ч с содержанием твердой фазы  $x_H$ , % (масс.). Диаметр наименьших частиц, подлежащих осаждению,  $d$ , мкм.

Температура суспензии  $15^\circ\text{C}$ . Влажность шлама (осадка)  $v_{OC}$ , %. Плотность твердых частиц  $\rho_T$ ,  $\text{кг/м}^3$ , плотность воды при температуре  $15^\circ\text{C}$   $\rho_{\text{среды}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ , динамический коэффициент вязкости  $\mu_{\text{среды}} = 1,14 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

Индивидуальные задания приведены в таблице 2

| № варианта | $G_H$ , т/ч | $x_H$ , % | $d$ , мкм | $\rho_T$ |
|------------|-------------|-----------|-----------|----------|
| 1          | 60          | 6         | 25        | 2400     |
| 2          | 40          | 7         | 30        | 2600     |
| 3          | 50          | 9         | 35        | 2800     |
| 4          | 25          | 10        | 40        | 2300     |
| 5          | 30          | 11        | 45        | 2200     |
| 6          | 45          | 9         | 50        | 2700     |
| 7          | 55          | 12        | 55        | 1900     |
| 8          | 70          | 14        | 60        | 2000     |
| 9          | 75          | 16        | 65        | 2100     |
| 10         | 65          | 12        | 70        | 1800     |
| 11         | 35          | 14        | 12        | 2400     |
| 12         | 50          | 10        | 16        | 2100     |
| 13         | 25          | 6         | 60        | 2800     |
| 14         | 30          | 7         | 65        | 2300     |
| 15         | 45          | 9         | 70        | 2200     |
| 16         | 55          | 10        | 12        | 2700     |
| 17         | 70          | 12        | 16        | 1900     |

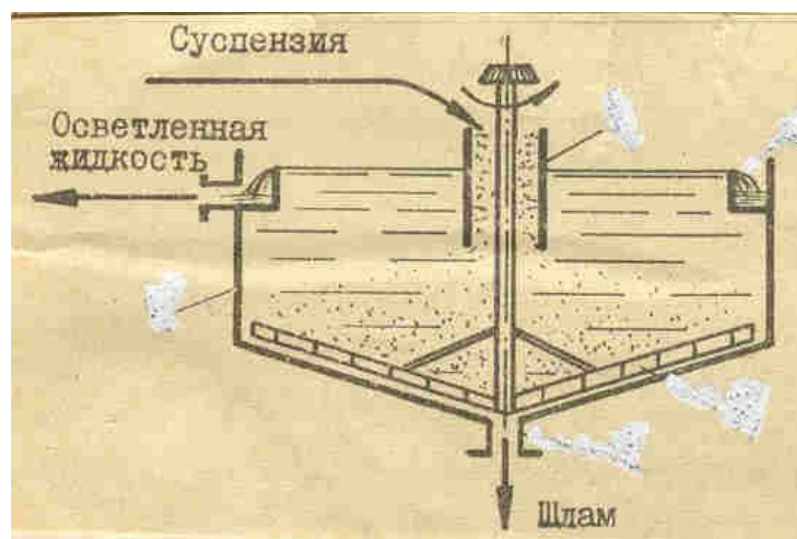


Рисунок 4.1 - Схема отстойника

**Пример выполнения задания**

Определить диаметр отстойника производительностью по водной суспензии  $G_H = 80$  т/ч с содержанием твердой фазы  $x_H = 8\%$  (масс.). Диаметр наименьших частиц, подлежащих осаждению,  $d = 35$  мкм.

Температура суспензии  $15^\circ\text{C}$ . Влажность шлама (осадка)  $v_{OC} = 70\%$ . Плотность твердых частиц  $\rho_T = 2710$  кг/м<sup>3</sup>, плотность воды при температуре  $15^\circ\text{C}$ ,  $\rho_{СРЕДЫ} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, динамический коэффициент вязкости  $\mu_{СРЕДЫ} = 1,14 \cdot 10^{-3}$  Па·с.

**Решение.**

1. Определяют скорость осаждения частиц по формуле Стокса для ламинарного режима

$$v_{OC} = \frac{g \cdot d^2 \cdot (\rho_T - \rho_C)}{18 \cdot \mu_C} = \frac{9,81 \cdot (35 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (2710 - 1000)}{18 \cdot 1,14 \cdot 10^{-3}} = 0,001 \text{ м/с.}$$

2. Проверяют значение критерия Re (правильность выбора формулы Стокса)

$$Re = \frac{v_{OC} \cdot d \cdot \rho_C}{\mu_C} = \frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 35 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3}{1,14 \cdot 10^{-3}} = 0,0307$$

$Re < 0,2$ , режим осаждения ламинарный.

3. Находят действительную скорость осаждения

$$v'_{OC} = \varphi \cdot v_{OC}$$

где  $\varphi = 0,5$ , учитывающий стесненность движения частиц и природу суспензии

$$v'_{OC} = 0,5 \cdot 0,001 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с.}$$

4. Рассчитывают площадь осаждения отстойника

$$F_{OC} = \frac{G_H \cdot \left(1 - \frac{x_H}{x_K}\right)}{3600 \cdot \rho_C \cdot v'_{OC}} = \frac{80 \cdot 10^3 \cdot \left(1 - \frac{8}{30}\right)}{3600 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 32,5 \text{ м}^2,$$

где  $x_K = 100 - \omega_{ШЛ} = 100 - 70 = 30$  % (масс.).

5. Определяют диаметр отстойника, м

$$D = \sqrt{\frac{F}{0,785}} = \sqrt{\frac{32,5}{0,785}} = 6,4$$

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №5

## Расчет осадительной центрифуги

**Задание.** Определить часовую производительность осадительной центрифуги по следующим данным: наименьший диаметр частиц  $d = 5$  мкм, плотность частиц  $\rho_T$ , кг/м<sup>3</sup>, температура суспензии 30<sup>0</sup>С. Характеристики центрифуги: диаметр барабана  $D_B$ , мм, длина барабана  $L$ , мм, диаметр борта барабана  $D_{БР}$ , мм, частота вращения барабана  $n$ , об/мин. Цикл работы центрифуги составляет  $\tau_{Ц}$ , мин, из них  $\tau_{П}$  - подача суспензии, 2 мин – разгрузка осадка.

Индивидуальные задания приведены в таблице 3

Таблица 3 – Индивидуальные задания

| № варианта | $\rho_T$ , кг/м <sup>3</sup> | $D_B$ , мм | $L$ , мм | $D_{БР}$ , мм | $\tau_{Ц}$ , мин |
|------------|------------------------------|------------|----------|---------------|------------------|
| 1          | 1800                         | 830        | 420      | 510           | 21               |
| 2          | 1900                         | 630        | 510      | 520           | 22               |
| 3          | 2100                         | 730        | 470      | 490           | 23               |
| 4          | 2200                         | 600        | 490      | 470           | 24               |
| 5          | 2300                         | 800        | 530      | 500           | 25               |
| 6          | 1700                         | 700        | 510      | 480           | 26               |
| 7          | 1600                         | 750        | 560      | 520           | 27               |
| 8          | 1400                         | 800        | 570      | 510           | 28               |
| 9          | 1500                         | 810        | 600      | 540           | 29               |
| 10         | 2200                         | 900        | 610      | 560           | 30               |
| 11         | 2300                         | 1100       | 630      | 590           | 31               |
| 12         | 2100                         | 1000       | 590      | 550           | 32               |
| 13         | 1800                         | 700        | 510      | 490           | 25               |
| 14         | 1900                         | 750        | 470      | 470           | 26               |
| 15         | 2100                         | 800        | 490      | 500           | 27               |
| 16         | 2200                         | 810        | 530      | 480           | 28               |
| 17         | 2300                         | 900        | 510      | 520           | 29               |

## Пример выполнения задания

Определить часовую производительность осадительной центрифуги по следующим данным: наименьший диаметр частиц  $d = 5$  мкм, плотность частиц  $\rho_T = 2000$  кг/м<sup>3</sup>, температура суспензии 30<sup>0</sup>С. Характеристики центрифуги: диаметр барабана  $D_B = 800$  мм, длина барабана  $L = 400$  мм, диаметр борта барабана  $D_{БР} = 570$  мм, частота вращения барабана  $n = 1200$  об/мин. Цикл работы центрифуги составляет  $\tau_{Ц} = 22$  мин, из них  $\tau_{П} = 20$  мин – подача суспензии, 2 мин – разгрузка осадка.

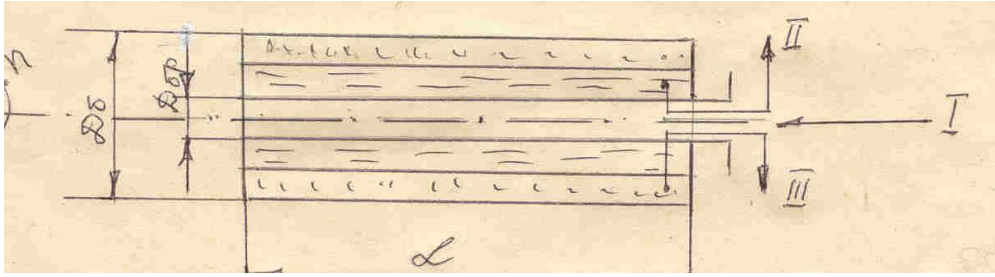


Рисунок 5.1 - Схема осадительной центрифуги

I – ввод суспензии; II – вывод осветленной жидкости; III – вывод осадка

### Решение

Производительность центрифуги определяется по формуле

$$V_{\text{ч}} = 25,3 \cdot \eta \cdot L \cdot n^2 \cdot R_{\text{бр}}^2 \cdot v_{\text{ос}} \cdot k$$

1. Для этого сначала рассчитывается скорость осаждения частиц по формуле Стокса

$$v_{\text{ос}} = \frac{g \cdot d^2 \cdot (\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{с}})}{18 \cdot \mu_{\text{с}}} = \frac{9,81 \cdot (5 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (2000 - 1000)}{18 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}} = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$$

где:  $\mu_{\text{с}} = 0,8 \cdot 10^{-3}$  Па·с,  $\rho_{\text{с}} = 1000$  кг/м<sup>3</sup> – параметры воды соответственно динамический коэффициент вязкости и плотность при 30°C.

2. Находится скорость осаждения частиц под действием центробежной силы

$$v_{\text{ц}} = v_{\text{ос}} \cdot \frac{R_{\text{бр}} \cdot n^2}{900} = 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{0,285 \cdot 1200^2}{900} = 7,75 \cdot 10^{-3} \text{ м/с.}$$

3. Проверяется режим осаждения

$$\text{Re} = \frac{v_{\text{ц}} \cdot d \cdot \rho_{\text{с}}}{\mu_{\text{с}}} = \frac{7,75 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3}{0,8 \cdot 10^{-3}} = 0,048$$

$\text{Re} < 0,2$ , режим ламинарный.

$$4. \quad V_{\text{ч}} = 25,3 \cdot 0,45 \cdot 0,4 \cdot 1200^2 \cdot 0,285^2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot 0,909 = 8,24 \text{ м}^3/\text{ч},$$

причем принимается  $\eta = 0,45$ ;  $k = \tau_{\text{II}} / \tau_{\text{ц}} = 20/22 = 0,909$ .

**Расчет рамного фильтр-пресса**

Площадь поверхности фильтрования для разделения суспензии в количестве  $V_\phi$  определяем, используя экспериментальные данные  $K$  и  $C$ . На основании эксперимента известно, что  $K = 20 \cdot 10^{-4}$ , м<sup>2</sup>/час, константа фильтрования  $C = 1,4 \cdot 10^{-3}$ , м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>.

Продолжительность фильтрования  $\tau_\phi$ , час.

Количество фильтрата  $V_\phi = V_c \cdot \tau_\phi$ , м<sup>3</sup>.

Площадь поверхности фильтрования  $F_\phi$  находим из уравнения (4.1):

$$V_\phi^2 + 2C \cdot F_\phi \cdot V_\phi = K \cdot F_\phi^2 \cdot \tau_\phi \quad (6.1)$$

Отсюда:

$$F_\phi = \frac{C \cdot V_\phi}{K \cdot \tau_\phi} + \sqrt{\left( \frac{C \cdot V_\phi}{K \cdot \tau_\phi} \right)^2 + \frac{V_\phi^2}{K \cdot \tau_\phi}}, \text{ м}^2$$

Размер плит и рам принимаем по заданию (А\*В).

Толщина плиты и рамы 60 - 70 мм каждой.

Определяем число плит:

$$n = \frac{F_\phi}{2 \cdot f_{\text{пл}}} \quad (6.2)$$

где  $f_{\text{пл}}$  - площадь поперечного сечения плиты, м<sup>2</sup>;

$\phi$  - коэффициент, принимается по заданию

Если в результате расчета получают более 50 плит, то устанавливают два или три фильтра.

Расчет диаметра патрубка для загрузки сортировки:

$$d = \sqrt{\frac{V_c}{3600 \cdot 0,785v}},$$

$v$  - скорость жидкости, м/с.

Индивидуальные задания приведены в таблице 4.1.

Таблица 6.1 – Данные для расчета фильтр – пресса

| №<br>варианта | $V_c, м^3$ | $\phi$ | $\tau_{\phi, час}$ | A*B, мм   | $v, м/с$ |
|---------------|------------|--------|--------------------|-----------|----------|
| 1             | 2,0        | 1,05   | 3,0                | 500*500   | 0,5      |
| 2             | 2,1        | 1,06   | 2,8                | 630*630   | 0,55     |
| 3             | 2,2        | 1,07   | 2,6                | 1000*1000 | 0,6      |
| 4             | 2,3        | 1,08   | 2,5                | 500*500   | 0,7      |
| 5             | 2,4        | 1,09   | 2,4                | 630*630   | 0,65     |
| 6             | 2,5        | 1,10   | 2,8                | 1000*100  | 0,55     |
| 7             | 2,6        | 1,12   | 3,0                | 500*500   | 0,5      |
| 8             | 2,7        | 1,14   | 3,2                | 630*630   | 0,55     |
| 9             | 2,8        | 1,15   | 2,9                | 1000*1000 | 0,6      |
| 10            | 2,9        | 1,16   | 2,7                | 500*500   | 0,7      |
| 11            | 3,0        | 1,18   | 2,8                | 630*630   | 0,65     |
| 12            | 3,1        | 1,20   | 2,9                | 1000*1000 | 0,55     |
| 13            | 2,0        | 1,08   | 3,2                | 500*500   | 0,6      |
| 14            | 2,1        | 1,09   | 2,9                | 630*630   | 0,7      |
| 15            | 2,2        | 1,10   | 2,7                | 1000*100  | 0,65     |
| 16            | 2,3        | 1,12   | 2,8                | 500*500   | 0,55     |
| 17            | 2,4        | 1,08   | 2,9                | 630*630   | 0,5      |

### ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

- Рамный фильтр-пресс предназначен для очистки сахарного сиропа от активированного угля
- Производительность фильтра  $G_c =$  кг/ч
- Площадь фильтрующей поверхности  $F_{\phi} =$  м<sup>2</sup>
- Количество плит шт.
- Количество рам шт.
- Размеры плит, рам мм
- Фильтрующая перегородка-бельтинг
- Плиты и рамы изготовлены из стали 12Х18Н9Т
- Станина изготовлена из чугуна
- Фильтрация проводится при постоянном давлении

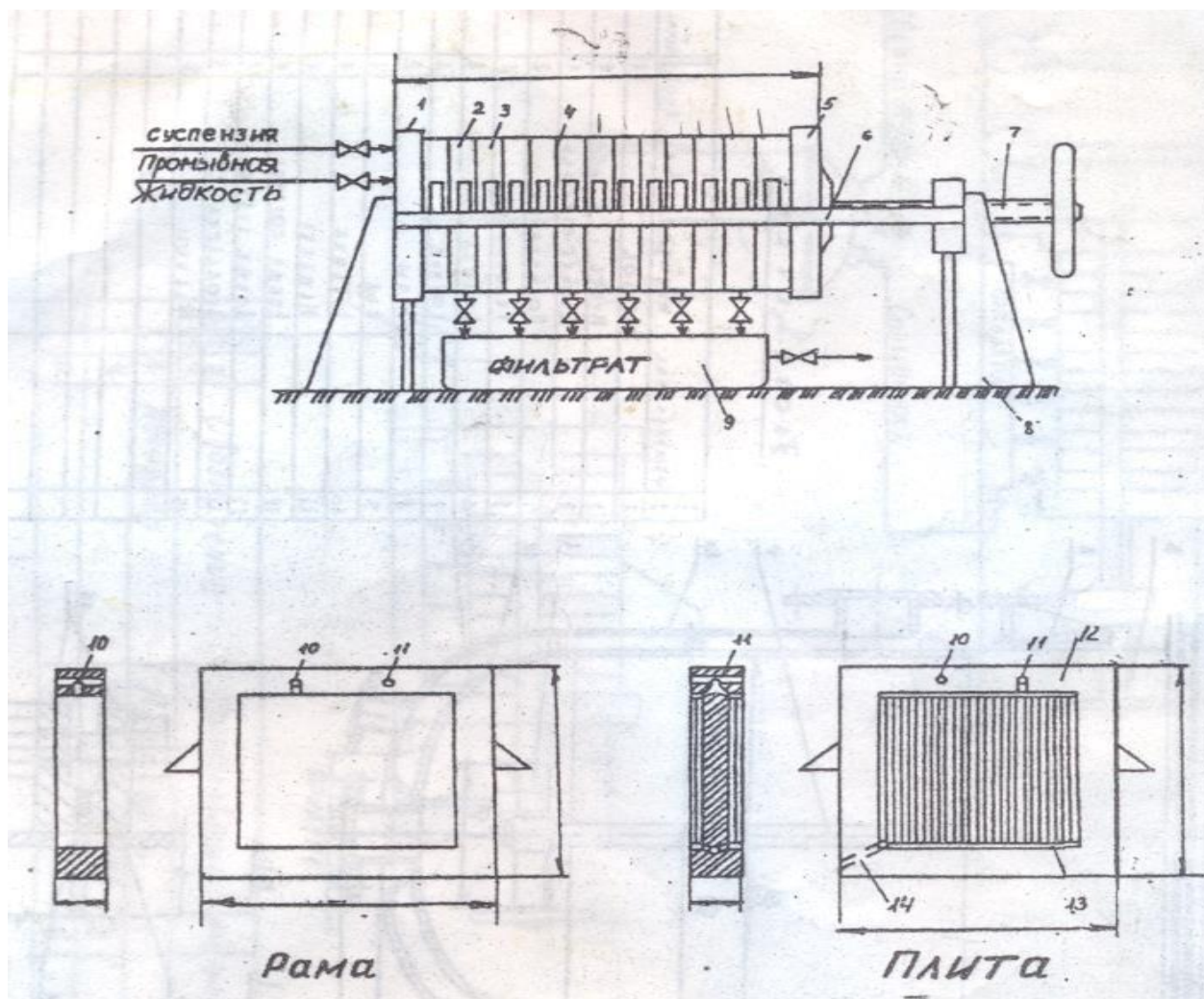


Рисунок 6.1 – Схема рамного фильтр - пресса

## Практическое занятие №7

### Расчет мешалок

#### Контрольные вопросы

1. С какой целью применяется перемешивание?
2. Какие существуют способы перемешивания в жидких средах?
3. Какие конструкции мешалок применяют в пищевой технологии?
4. От каких параметров зависит мощность, потребляемая мешалкой?
5. Почему в критериальное уравнение, описывающее процесс перемешивания, входят модифицированные критерия подобия?
6. Как определить мощность, потребляемую мешалкой?

#### Задача № 7.1.

С какой частотой будет вращаться пропеллерная мешалка диаметром  $d$ , мм при перемешивании суспензии плотностью  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>, если потребляемая мощность в рабочий период  $N_p = 7$  кВт,  $Re_M = 800$  (при этих условиях коэффициент мощности для пропеллерной мешалки будет равен 0,35).

#### Индивидуальные задания к задаче 7.1

| № варианта | $d$ , мм | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> |
|------------|----------|----------------------------|
| 1          | 300      | 1300                       |
| 2          | 320      | 1250                       |
| 3          | 330      | 1240                       |
| 4          | 340      | 1230                       |
| 5          | 350      | 1320                       |
| 6          | 360      | 1340                       |
| 7          | 370      | 1350                       |
| 8          | 380      | 1100                       |
| 9          | 390      | 1200                       |
| 10         | 400      | 1240                       |
| 11         | 290      | 1260                       |
| 12         | 280      | 1280                       |
| 13         | 300      | 1340                       |
| 14         | 320      | 1350                       |
| 15         | 330      | 1100                       |
| 16         | 340      | 1200                       |
| 17         | 350      | 1240                       |

#### Решение

1. Определяется частота вращения пропеллерной мешалки по формуле

$$N_p = K_N \cdot d^5 \cdot n^3 \cdot \rho \Rightarrow n = \sqrt[3]{\frac{N_p}{K_N \cdot d^5 \cdot \rho}} = \sqrt[3]{\frac{7000}{0,35 \cdot 0,3^5 \cdot 1250}} = 18,8 \text{ об/с.}$$

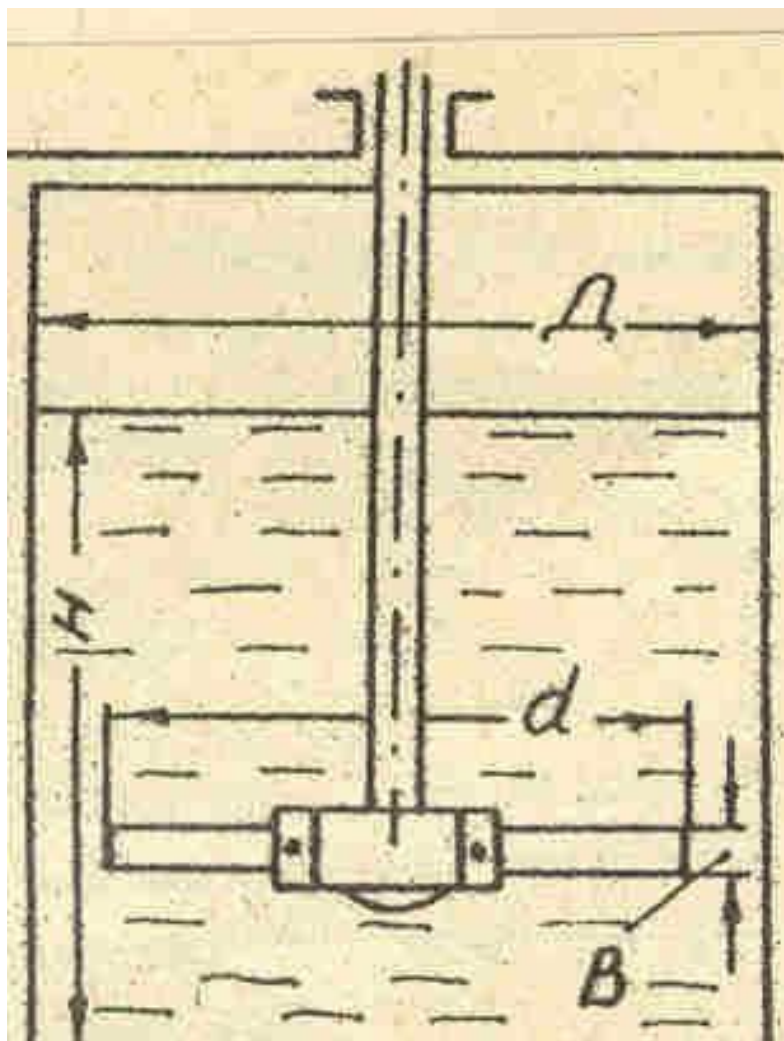


Рисунок 7.1 – Схема пропеллерной мешалки

### Задача № 7.2

Рассчитать мощность, потребляемую турбинной мешалкой диаметром  $d$ , мм в рабочий период, для перемешивания суспензии плотностью  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>,  $\mu$ , Па·с, если окружная скорость вращения мешалки  $\omega$ , м/с.

### Решение

1. Рассчитывается частота вращения мешалки  $\omega = \pi \cdot d \cdot n$ , отсюда

$$n = \frac{\omega}{\pi \cdot d} = \frac{7}{3,14 \cdot 0,3} = 7,4 \text{ об/с.}$$

2. Определяется модифицированный критерий Re

$$Re_M = \frac{\rho \cdot d \cdot n^2}{\mu} = \frac{1300 \cdot 0,3 \cdot 7,4^2}{0,12} = 179464$$

При данном значении  $Re_M$  и типе мешалки коэффициент мощности  $K_N = 1,1$ .

3. Затем рассчитывается мощность, потребляемая турбинной мешалкой

$$N_p = K_N \cdot d^5 \cdot n^3 \cdot \rho;$$

$$N_p = 1,1 \cdot 0,3^5 \cdot 7,4^3 \cdot 1300 = 1390 \text{ Вт.}$$

### Индивидуальные задания к задаче 7.2

| № варианта | d, мм | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | $\mu$ , Па·с | $\omega$ , м/с |
|------------|-------|----------------------------|--------------|----------------|
| 1          | 300   | 1300                       | 0,13         | 4              |
| 2          | 320   | 1250                       | 0,12         | 5              |
| 3          | 330   | 1240                       | 0,14         | 6              |
| 4          | 340   | 1230                       | 0,15         | 7              |
| 5          | 350   | 300                        | 0,16         | 8              |
| 6          | 360   | 320                        | 0,13         | 9              |
| 7          | 370   | 330                        | 0,14         | 10             |
| 8          | 380   | 340                        | 0,15         | 5              |
| 9          | 390   | 350                        | 0,16         | 6              |
| 10         | 400   | 1240                       | 0,11         | 7              |
| 11         | 290   | 1260                       | 0,12         | 8              |
| 12         | 280   | 1280                       | 0,13         | 9              |
| 13         | 300   | 300                        | 0,15         | 5              |
| 14         | 320   | 320                        | 0,16         | 6              |
| 15         | 330   | 330                        | 0,13         | 7              |
| 16         | 340   | 340                        | 0,14         | 8              |
| 17         | 350   | 350                        | 0,15         | 9              |

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №8**  
**Расчет теплообменника «труба в трубе»**

**Задание**

Определить необходимую поверхность теплопередачи теплообменника «труба в трубе» для нагревания  $G$  кг/ч продукта от  $t_1$  °С до  $t_2$  °С водяным паром давлением  $P_{\text{п}}$  Мпа. Средняя теплоемкость массы  $C$  Дж/кг·К, коэффициент теплоотдачи от стенки к продукту  $\alpha_2$  Вт/м²·К, температура стенки  $t_{\text{ст}}$  °С потери тепла в окружающую среду 3%.

Индивидуальные задания приведены в таблице 8.1

Таблица 8.1 – Индивидуальные задания

| Вариант | $G$ , кг/ч | $C$ , Дж/кг·К | $t_1$ | $t_2$ | $\alpha_2$<br>Вт/м²·К | $t_{\text{п}}$ °С | $t_{\text{ст}}$ °С |
|---------|------------|---------------|-------|-------|-----------------------|-------------------|--------------------|
| 1       | 1800       | 3600          | 21    | 73    | 750                   | 81,33             | 56                 |
| 2       | 2000       | 3800          | 24    | 69    | 760                   | 85,94             | 57                 |
| 3       | 2200       | 4200          | 8     | 72    | 780                   | 89,95             | 58                 |
| 4       | 2500       | 3400          | 28    | 74    | 800                   | 93,50             | 60                 |
| 5       | 3400       | 3200          | 23    | 85    | 820                   | 96,71             | 61                 |
| 6       | 3000       | 3600          | 25    | 90    | 840                   | 99,62             | 62                 |
| 7       | 2800       | 3800          | 21    | 100   | 880                   | 104,80            | 63                 |
| 8       | 3400       | 4200          | 23    | 102   | 750                   | 109,31            | 64                 |
| 9       | 1800       | 3600          | 16    | 104   | 760                   | 113,31            | 65                 |
| 10      | 1200       | 4000          | 8     | 72    | 780                   | 116,93            | 66                 |
| 11      | 2200       | 4500          | 28    | 74    | 800                   | 120,23            | 67                 |
| 12      | 1400       | 3500          | 24    | 82    | 820                   | 99,62             | 62                 |
| 13      | 2500       | 3400          | 21    | 73    | 840                   | 104,80            | 63                 |
| 14      | 3200       | 3200          | 24    | 69    | 780                   | 109,31            | 64                 |
| 15      | 4000       | 3600          | 18    | 90    | 800                   | 113,31            | 65                 |
| 16      | 4200       | 3800          | 22    | 92    | 820                   | 116,93            | 66                 |
| 17      | 5000       | 4000          | 23    | 88    | 840                   | 120,23            | 67                 |

**Пример выполнения задания**

Определить необходимую поверхность теплопередачи одноходового кожухотрубного теплообменника для нагревания томатной массы в количестве  $G=4000$  кг/ч от  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 90^\circ\text{C}$  водяным паром температурой  $t_{\text{п}} = 106^\circ\text{C}$ .

Средняя теплоемкость массы  $C = 4000$  Дж/кг·К, коэффициент теплоотдачи от стенки к продукту  $\alpha_2 = 800$  Вт/м²·К,  $t_{\text{ст}} = 62,4$  °С потери тепла в окружающую среду принять равными 3%.

**Решение**

1. Определяется тепловая нагрузка теплообменника с учетом теплотерь

$$Q_{\tau} = 1,03 \cdot C \cdot \frac{G}{3600} \cdot (t_2 - t_1)$$

$$Q_{\tau} = 1,03 \cdot 4000 \cdot \frac{4000}{3600} \cdot (90 - 20) = 320444 \text{ Вт}$$

2. Находится средняя движущая сила процесса

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\sigma} - \Delta t_{\text{М}}}{\ln \frac{\Delta t_{\sigma}}{\Delta t_{\text{М}}}}$$

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{(106 - 20) - (106 - 90)}{\ln \frac{(106 - 20)}{(106 - 90)}} = 41,7^{\circ}\text{C} = 41,7 \text{ К}$$

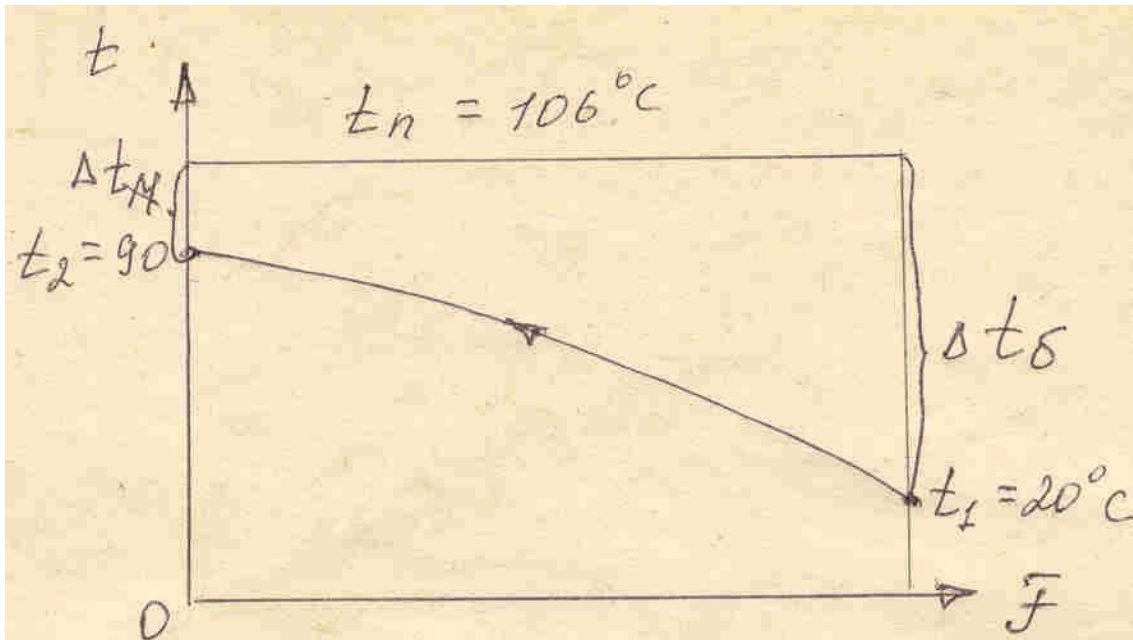


Рис.8 – Температурный график

3. Рассчитывается температура пленки конденсата

$$\Delta t = t_{\text{пл}} = t_{\text{п}} - t_{\text{СТ}} = 106 - 62,4 = 43,6^{\circ}\text{C}.$$

4. Определяется коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1$  при конденсации водяного пара

$$\alpha_1 = 2,04 \cdot 4 \sqrt{\frac{\lambda^3 \cdot \rho^2 \cdot r}{\mu \cdot H \cdot \Delta t}},$$

где  $\lambda$  – теплопроводность пленки конденсата, Вт/мК;

$\rho$  – плотность конденсата, кг/м<sup>3</sup>;

$\gamma$  – теплота конденсации, Дж/кг;

$H$  – рабочая высота вертикальной трубки, м;

$\mu$  – динамический коэффициент вязкости конденсата Па·с;

$\Delta t(\Delta t_{пл})$  – разность температур пара и стенки, К.

Параметры  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $\mu$  выбираются из таблицы физических свойств воды по температуре пленки.

Параметр  $\gamma$  – из таблицы насыщенного водяного пара

Все параметры пленки конденсата принять по таблицам приложения 10.1.

Но так как, у нас температура пленки  $t_{пл} < 120^\circ\text{C}$ , то для определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha_1$  можно воспользоваться формулой:

$$\alpha_1 = 1163 \cdot (1,9 + 0,04 \cdot t_{пл}) = 1163 \cdot (1,9 + 0,04 \cdot 43,6) = 4238 \text{ Вт/ м}^2\text{К}.$$

3. Находится коэффициент теплопередачи (Вт/ м<sup>2</sup>К)

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{4238} + \frac{2 \cdot 10^{-3}}{380} + \frac{1}{800}} = 670,5$$

3. Рассчитывается необходимая поверхность теплопередачи из основной кинетической закономерности

4.

$$Q_\tau = K \cdot F \cdot \Delta t_{ср};$$

$$F = \frac{Q_\tau}{K \cdot \Delta t_{ср}};$$

$$F = \frac{320444}{800 \cdot 41,7} = 9,6 \text{ м}^2.$$

## Приложение 8.1

## Параметры сухого насыщенного пара по линии насыщения (по давлениям)

| Давление<br>МПа | Температура<br>насыщения<br>°C | Удельный<br>объем<br>м³/кг | Плотность в<br>кг/м³ | Энтальпия кДж/кг |              | Теплота<br>парообразования<br>кДж/кг |
|-----------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------|------------------|--------------|--------------------------------------|
|                 |                                |                            |                      | вода<br>$i'$     | пар<br>$i''$ |                                      |
| P               | t                              | v                          | ρ                    |                  |              | r                                    |
| 0,005           | 32,89                          | 28,24                      | 0,03541              | 137,79           | 2560,9       | 2423,1                               |
| 0,010           | 45,82                          | 14,70                      | 0,06805              | 191,84           | 2583,9       | 2392,1                               |
| 0,014           | 52,57                          | 10,69                      | 0,09358              | 220,05           | 2596,1       | 2376,0                               |
| 0,016           | 55,34                          | 9,437                      | 0,10600              | 231,63           | 2601,1       | 2369,5                               |
| 0,018           | 57,82                          | 8,448                      | 0,1184               | 242,03           | 2605,4       | 2363,3                               |
| 0,020           | 60,08                          | 7,652                      | 0,1307               | 251,48           | 2609,2       | 2357,7                               |
| 0,025           | 64,99                          | 6,201                      | 0,1613               | 272,03           | 2617,6       | 2345,5                               |
| 0,030           | 69,12                          | 5,232                      | 0,1911               | 269,30           | 2624,6       | 2335,3                               |
| 0,040           | 75,87                          | 3,999                      | 0,2501               | 317,62           | 2636,3       | 2318,7                               |
| 0,050           | 81,33                          | 3,243                      | 0,3083               | 340,53           | 2645,2       | 2304,7                               |
| 0,060           | 85,94                          | 2,734                      | 0,3558               | 359,90           | 2653,1       | 2293,2                               |
| 0,070           | 89,95                          | 2,367                      | 0,4224               | 376,79           | 2659,8       | 2283,1                               |
| 0,080           | 93,50                          | 2,089                      | 0,4707               | 391,75           | 2665,3       | 2273,5                               |
| 0,090           | 96,71                          | 1,871                      | 0,5345               | 405,19           | 2670,2       | 2265,1                               |
| 0,10            | 99,62                          | 1,696                      | 0,5896               | 417,47           | 2674,9       | 2257,5                               |
| 0,12            | 104,80                         | 1,430                      | 0,6992               | 439,34           | 2683,0       | 2243,6                               |
| 0,14            | 109,31                         | 1,237                      | 0,8083               | 458,42           | 2690,1       | 2231,7                               |
| 0,16            | 113,31                         | 1,092                      | 0,9160               | 475,41           | 2696,3       | 2220,8                               |
| 0,18            | 116,93                         | 0,9782                     | 1,022                | 490,68           | 2701,8       | 2211,1                               |
| 0,20            | 120,23                         | 0,8860                     | 1,129                | 504,74           | 2706,8       | 2202,0                               |
| 0,22            | 123,27                         | 0,3103                     | 1,234                | 517,70           | 2711,0       | 2193,3                               |
| 0,24            | 126,09                         | 0,7469                     | 1,338                | 529,90           | 2714,9       | 2185,0                               |
| 0,26            | 128,73                         | 0,6929                     | 1,443                | 541,20           | 2713,9       | 2177,7                               |
| 0,28            | 131,20                         | 0,6463                     | 1,547                | 551,70           | 2722,3       | 2170,7                               |
| 0,30            | 133,54                         | 0,6055                     | 1,652                | 561,70           | 2752,5       | 2163,9                               |
| 0,35            | 138,87                         | 0,5241                     | 1,908                | 584,40           | 2732,3       | 2147,9                               |
| 0,40            | 143,62                         | 0,4623                     | 2,163                | 604,60           | 2738,7       | 2134,1                               |
| 0,45            | 147,92                         | 0,4139                     | 2,416                | 623,00           | 2743,9       | 2120,9                               |
| 0,50            | 151,84                         | 0,3749                     | 2,667                | 640,10           | 2748,8       | 2108,7                               |
| 0,60            | 158,84                         | 0,3156                     | 3,169                | 670,60           | 2756,9       | 2086,3                               |

## Физические параметры воды (по линии насыщения)

| t   | ρ     | Cp       | λ      | μ·10³ |
|-----|-------|----------|--------|-------|
| °C  | кг/м³ | кДж/кг·K | Вт/м·K | Па·с  |
| 0   | 1000  | 4,23     | 0,551  | 1,790 |
| 10  | 1000  | 4,19     | 0,575  | 1,310 |
| 20  | 998   | 4,19     | 0,599  | 1,000 |
| 30  | 996   | 4,18     | 0,618  | 0,804 |
| 40  | 992   | 4,18     | 0,634  | 0,657 |
| 50  | 988   | 4,18     | 0,648  | 0,549 |
| 60  | 983   | 4,18     | 0,659  | 0,470 |
| 70  | 978   | 4,19     | 0,668  | 0,406 |
| 80  | 972   | 4,19     | 0,675  | 0,355 |
| 90  | 965   | 4,19     | 0,680  | 0,315 |
| 100 | 958   | 4,23     | 0,682  | 0,283 |
| 120 | 943   | 4,27     | 0,685  | 0,238 |
| 140 | 923   | 4,27     | 0,685  | 0,201 |

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №9

## Расчет кожухотрубного теплообменника

Исходные данные

Производительность  $G$ , кг/ч.

Температура продукта:

- начальная –  $t_n$
- конечная –  $t_k$

Давление греющего пара –  $P$ , бар

Продукт – по таблице 9.2

1 Выбор конструктивных элементов и скорости движения продукта

Предварительно принимается скорость движения продукта в пределах  $w = 0,6 \dots 0,9$  м/с ,

определяется число труб в одном ходу

$$n_0 = 1,27 * G / (3600 * d_B^2 * \rho * w), \quad (9.1)$$

где  $\rho$  - плотность продукта при средней температуре, кг/м<sup>3</sup>;

$G$  – производительность, кг/ч;

$d_B$  – внутренний диаметр труб,  $d_B = 25 \dots 40$  мм;

Общее число труб в пучке:

$$n = n_0 * Z_{Tr}, \quad (9.2)$$

где  $Z_{Tr}$  - количество ходов теплообменника, принимается  $Z_{Tr} = 2, 4, 6, 8$

Выбирается схема расположения труб в трубной решетке (по правильным шестиугольникам или концентрическим окружностям) общее число труб округляем до ближайшего значения из таблицы 4 [1] и уточняется скорость движения продукта из формулы (1)

1.2 Определение средней разности температур

Средняя разность температур между паром и продуктом (температурный напор) определяется как средняя логарифмическая из значений  $\Delta t_6$  и  $\Delta t_m$  при

$$\Delta t_6 / \Delta t_m \geq 2$$

по формуле

$$\Delta t_{cp} = (\Delta t_6 - \Delta t_m) / \ln \Delta t_6 / \Delta t_m \quad (9.3)$$

Если  $\Delta t_6 / \Delta t_m < 2$ , то с достаточной степенью точности можно пользоваться среднеарифметическим значением

$$\Delta t_{cp} = (\Delta t_6 + \Delta t_m) / 2 \quad (9.4)$$

### 1.3 Определение коэффициента теплоотдачи от стенки к нагреваемой жидкости

Для определения режима движения жидкости в трубах, вычисляется критерий подобия Рейнольдса

$$Re = w d_{\text{э}} / \nu, \quad (9.5)$$

где  $\nu$  - кинематическая вязкость продукта,  $\text{м}^2 / \text{с}$

$d_{\text{э}} = d_{\text{в}}$  – эквивалентный диаметр,  $\text{м}$

Коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемой жидкости определяется по следующим критериальным уравнениям:

а) для турбулентного режима движения продукта ( $Re > 10000$ ) критериальное уравнение для  $Nu$  имеет вид:

$$Nu = 0,023 * Re^{0.8} * Pr^{0.4}, \quad (9.6)$$

б) для переходного режима ( $Re = 2300 \dots 10000$ )

$$Nu = 0,008 * Re^{0.9} * Pr^{0.43}, \quad (9.7)$$

где  $Nu$  – критерий Нуссельта,  $Nu = \alpha_2 d_3 / \lambda$

$Pr = \nu / a$  – критерий Прандтля

$a = \lambda / \rho c$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2 / \text{с}$

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности продукта,  $\text{Вт} / \text{м К}$

$C_{\text{пр}}$  - удельная теплоемкость продукта,  $\text{Дж} / (\text{кг К})$

Все физические константы продукта берутся из таблиц при определяющей температуре

$$t_{\text{опр}} = t_{\text{н}} + t_{\text{к}} / 2$$

Затем вычисляется коэффициент теплоотдачи из формулы (9.7)

$$\alpha_2 = Nu \lambda / d_3$$

### 1.4 Определение коэффициента теплоотдачи от пара к стенке и коэффициента теплопередачи

Для определения коэффициента теплоотдачи при конденсации пара на наружной поверхности горизонтального пучка труб используется следующее критериальное уравнение

$$Nu = 0,72 \varepsilon (Ga Pr K)^{0.25}, \quad (9.8)$$

где  $\varepsilon$  - поправочный коэффициент, учитывающий компоновку поверхности нагрева;

$Ga = g l^3 / \nu^2$  - критерий Галилея;

$Pr = \nu / a$  - критерий Прандтля;

$K = r / c \Delta t_1$  - критерий конденсации (Кутателадзе);

$Nu = \alpha_1 l / \lambda$  - критерий Нуссельта

Здесь:

$g = 9,81 \text{ м / с}^2$  – ускорение силы тяжести;

$c$  – удельная теплоемкость конденсата, Дж / кг К;

$\gamma$  – удельная теплота конденсации, Дж / кг;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости пленки конденсата,  $\text{м}^2 / \text{с}$ ;

$a$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2 / \text{с}$ ;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности пленки конденсата, Вт / м К;

$\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от пара к стенке, Вт /  $\text{м}^2 \text{ К}$ ;

$l$  – определяющий геометрический размер, м;

для горизонтального пучка труб  $l = d_n$  – наружный диаметр труб пучка;

$\Delta t_1$  – температурный напор в пограничном слое,  $^\circ\text{C}$

Все физические константы пленки конденсата принимаются при температуре пленки конденсата на поверхности пучка труб ( $t_{\text{опр}} = t_s$ )

Уравнение (11.8) решается относительно  $\alpha_1$  и приводится к виду:

$$\alpha_1 = A / \Delta t_1^{0,25}, \quad (9.9)$$

где  $A$  – симплекс параметров пленки конденсата, определяемый по формуле

$$A = 0,72 \varepsilon \lambda (g \gamma / \nu a c d_n)^{0,25}, \quad (9.10)$$

Поскольку величина температурного напора в пограничном слое ( $\Delta t_1$ ) неизвестна задаемся несколькими значениями  $\Delta t$ :

$$\Delta t_1' = 0,1 \Delta t_{\text{ср}}, \quad \Delta t_1'' = 0,15 \Delta t_{\text{ср}}, \quad \Delta t_1''' = 0,2 \Delta t_{\text{ср}}$$

Определение коэффициента теплопередачи

$$K = 1 / (1 / \alpha_1 + 1 / \alpha_2 + R_{\text{ст}}), \quad (9.11)$$

где:  $R_{\text{ст}}$  – термическое сопротивление стенки,  $\text{м}^2 \text{ К} / \text{Вт}$

$$R_{\text{ст}} = \delta_{\text{ст}} / \lambda_{\text{ст}} + \delta_{\text{заг}} / \lambda_{\text{заг}}$$

$\delta_{\text{ст}}$  – толщина стенки труб, м,  $\delta_{\text{ст}} = 1,5 \dots 2,5 \text{ мм}$ ;

$\delta_{\text{заг}}$  – толщина слоя накипи, м,  $\delta_{\text{заг}} = 0,5 \dots 1,0 \text{ мм}$ ;

$\lambda_{\text{ст}}, \lambda_{\text{заг}}$  – теплопроводность, соответственно стали и слоя накипи

Для принятых приближений определяем коэффициент теплопередачи  $K$  по формуле (11.11), затем удельный тепловой поток

$$q = \Delta t_1 \alpha_1, \quad (9.12)$$

$$\Delta t = q / K, \quad (9.13)$$

Вычисленные значения сводим в таблицу 11.1

Таблица 9.1 – Результаты расчета

| Определяемая величина | Размерность           | Температурный напор                     |                                          |                                         |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|
|                       |                       | $\Delta t_1 = 0,1 \Delta t_{\text{ср}}$ | $\Delta t_1 = 0,15 \Delta t_{\text{ср}}$ | $\Delta t_1 = 0,2 \Delta t_{\text{ср}}$ |
|                       |                       |                                         |                                          |                                         |
| $\alpha_1$            | Вт / м <sup>2</sup> К |                                         |                                          |                                         |
| K                     | Вт / м <sup>2</sup> К |                                         |                                          |                                         |
| q                     | Вт / м <sup>2</sup>   |                                         |                                          |                                         |
| $\Delta t$            | °C                    |                                         |                                          |                                         |

По полученным данным строим нагрузочную характеристику в виде графика функции  $\Delta t = f(q)$  и по известной величине  $\Delta t_{\text{ср}}$  определяем значение удельного теплового потока (рисунок 9.1)

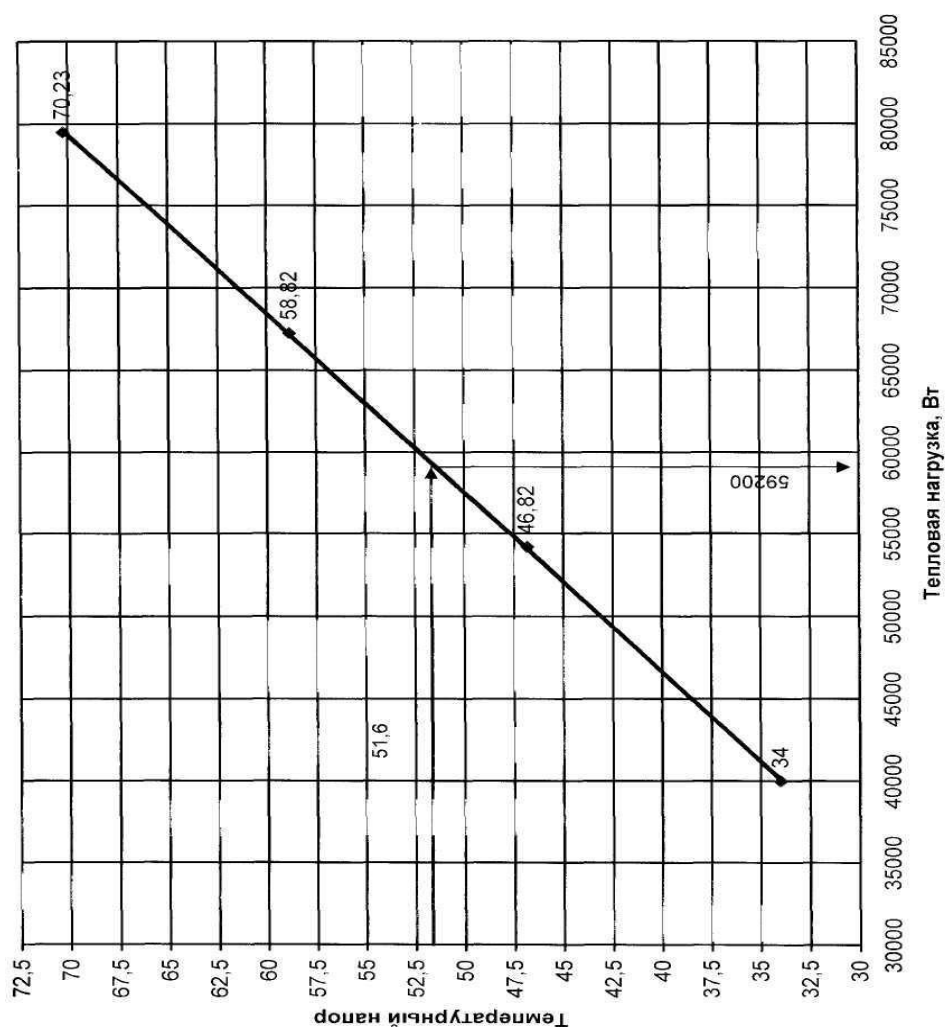


Рисунок 9.1 – Определение полезной разности температур

Определяется коэффициент теплопередачи по формуле

$$K = q / \Delta t_{cp}, \text{ Вт / м}^2 \text{ К}, \quad (9.14)$$

Определение тепловой нагрузки аппарата

Тепловая нагрузка определим по уравнению теплового баланса:

$$Q = G C_{пр} (t_k - t_n), \quad (9.15)$$

где  $G$  - производительность теплообменника, кг/с;

6 Определение поверхности теплообмена и основных размеров теплообменника

Поверхность теплообмена определяется по формуле:

$$F = Q / K \Delta t_{cp}, \text{ м}^2, \quad (9.16)$$

Длина труб в пучке по формуле

$$L = F / \pi d_p n, \text{ м}, \quad (9.17)$$

$n$  – общее число труб в пучке

В качестве расчетного диаметра принимают:

при  $\alpha_1 > \alpha_2$   $d_p = d_v$

при  $\alpha_1 = \alpha_2$   $d_p = (d_v + d_n) / 2$

при  $\alpha_1 < \alpha_2$   $d_p = d_n$

Диаметр кожуха теплообменника по формуле

$$D_k = t - (b - l) + 4 d_n, \text{ м} \quad (9.18)$$

$t$  - шаг расположения труб по трубной решетке, м,

$t = (1,3 \dots 1,4) d_n$

$b$  - число труб по диагонали наибольшего шестиугольника

Таблица 9.2 – Индивидуальные задания

| Вариант | Продукт            | СВ, % | G, кг/ч | $t_n$ | $t_k$ | P, бар |
|---------|--------------------|-------|---------|-------|-------|--------|
| 1       | Сахароза           | 16    | 18000   | 24    | 86    | 1,4    |
| 2       | Сахароза           | 18    | 20000   | 23    | 88    | 1,6    |
| 3       | Сахароза           | 20    | 22000   | 27    | 87    | 1,3    |
| 4       | Поваренная соль    | 5     | 25000   | 27    | 75    | 1,8    |
| 5       | Поваренная соль    | 10    | 34000   | 23    | 100   | 2,5    |
| 6       | Поваренная соль    | 15    | 30000   | 25    | 90    | 2,2    |
| 7       | Уксусная кислота   | 100   | 28000   | 21    | 100   | 2,3    |
| 8       | Уксусная кислота   | 100   | 34000   | 23    | 104   | 2,5    |
| 9       | Уксусная кислота   | 100   | 18000   | 16    | 105   | 3,1    |
| 10      | Молоко             | 12,5  | 12000   | 8     | 72    | 1,1    |
| 11      | Молоко             | 9,0   | 10000   | 28    | 74    | 1,2    |
| 12      | Молоко             | 9,0   | 14000   | 24    | 82    | 1,3    |
| 13      | Этанол             | 20    | 25000   | 21    | 73    | 1,1    |
| 14      | Этанол             | 40    | 32000   | 24    | 69    | 1,1    |
| 15      | Молочная сыворотка | 6     | 12000   | 8     | 76    | 1,05   |
| 16      | Молочная сыворотка | 6     | 14000   | 6     | 76    | 1,05   |
| 17      | Молочная сыворотка | 6     | 15000   | 4     | 75    | 1,05   |

**Расчет пластинчатого теплообменника**

**Цель работы:** изучить устройство, комплектность пастеризационно-охладительных установок; принцип их работы; составить принципиальную схему движения сырья, греющей и охлаждающей жидкости в аппарате; рассчитать потребность тепла для пастеризации и холода для охлаждения продукта; рассчитать экономию тепла и холода в секции регенерации; по заданным параметрам определить поверхность нагрева каждой секции и рассчитать количество пластин для них.

Исходные данные:

Производительность установки:

Вид сырья:

Сухие вещества сырья, %

Начальная температура сырья ( $t_n$ ), °C

Температура пастеризации ( $t_p$ ), °C

Конечная температура сырья ( $t_k$ ), °C

Теплоемкость сырья -

Теплоноситель - горячая вода

Начальная температура горячей воды ( $t_{вгн}$ ), °C

Хладоагент - холодная вода и рассол

Начальная температура холодной воды ( $t_{вхн}$ ), °C

Начальная температура рассола ( $t_{рн}$ ), °C

**Порядок выполнения задания:**

1. Приводится описание пастеризационно-охладительных установок, их назначение, преимущества и недостатки, перечисляется оборудование, входящее в комплект установки, и указывается его назначение.

2. Составляется график температур.

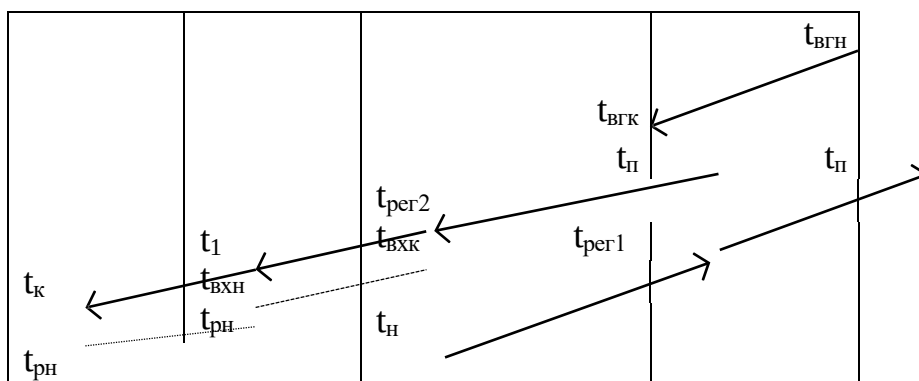


Рисунок 10.1 - График температур установки

3. Определяются недостающие температуры - температура сырья на выходе из секции регенерации при подогреве ( $t_{\text{рег1}}$ ), температура сырья на выходе из секции регенерации при охлаждении ( $t_{\text{рег2}}$ ), температура сырья при выходе из секции охлаждения водой ( $t_1$ ) температура воды горячей конечная ( $t_{\text{ВГК}}$ ), температура холодной воды конечная ( $t_{\text{ВХК}}$ ), температура рассола конечная ( $t_{\text{рк}}$ ).

Температура сырья на выходе из секции регенерации ( $t_{\text{рег1}}$ ) рассчитывается на основании коэффициента регенерации ( $K_{\text{рег}}$ ), который представляет собой отношение количества тепла, отданного холодному сырью горячим в секции регенерации ( $Q_{\text{рег}}$ ), к общему количеству тепла ( $Q_{\text{п}}$ ), необходимому для нагрева сырья от начальной температуры до температуры пастеризации

$$K_{\text{рег}} = \frac{Q_{\text{рег}}}{Q_{\text{п}}} = \frac{G \cdot c \cdot (t_{\text{рег}} - t_{\text{н}})}{G \cdot c \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{н}})} = \frac{t_{\text{рег1}} - t_{\text{н}}}{t_{\text{п}} - t_{\text{н}}}$$

где  $Q_{\text{рег}}$  - количество тепла, воспринятое холодным сырьем в секции регенерации, Дж;  $Q_{\text{п}}$  - количество тепла, необходимое для пастеризации сырья, Дж;  $G$  - производительность аппарата, кг/ч;  $c$  - удельная теплоемкость сырья, Дж/кг \*град.

Каждому теплообменному аппарату соответствует свой коэффициент регенерации, который колеблется в пределах от 0,6 до 0,82. Принимаем коэффициент регенерации в установленных пределах и определяем температуру сырья на выходе из секции регенерации ( $t_{\text{рег}}$ )

$$t_{\text{рег1}} = t_{\text{н}} + K_{\text{рег}} * (t_{\text{п}} - t_{\text{н}})$$

Температура пастеризованного сырья на выходе из секции регенерации ( $t_{\text{рег2}}$ ) определяется из уравнения теплового баланса в секции регенерации:

$$G_1 * c * (t_{\text{рег1}} - t_{\text{н}}) = G_2 * c * (t_{\text{п}} - t_{\text{рег2}})$$

$G_1$  может быть равен  $G_2$  (как в нашем варианте), а может быть и не равен ему. Для нашего варианта при равенстве  $G$  и теплоемкости уравнение примет вид:  $t_{\text{рег1}} - t_{\text{н}} = t_{\text{п}} - t_{\text{рег2}}$

Температура конечная для горячей воды определяется также из уравнения теплового баланса в секции пастеризации:

$$G * c * (t_{\text{п}} - t_{\text{рег}}) = G_{\text{в}} * c_{\text{в}} * (t_{\text{ВГН}} - t_{\text{ВГК}})$$

Отношение  $G_{\text{в}}/G = n$  называется кратностью воды и принимается равным 3-4. Отсюда  $G_{\text{в}} = G \cdot n$ . Подставив это значение в формулу материального баланса, легко найдем конечную температуру горячей воды:

$$t_{\text{ВГК}} = t_{\text{ВГН}} - [c/(n * c_{\text{в}})] * (t_{\text{п}} - t_{\text{рег}})$$

Конечные температуры воды холодной и рассола рассчитываются аналогично из формул теплового баланса в секции охлаждения холодной водой и рассолом.

$$t_{\text{ВХК}} = t_{\text{ВН}} + [c/(n * c_{\text{в}})] * (t_{\text{рег}} - t_1)$$

Кратность для холодной воды принять равной 3, температуру на выходе молока из секции охлаждения водой принять равной на 2-3 градуса выше начальной температуры холодной воды.

$$t_{pk} = t_{pn} + (c/(n * c_p)) * (t_1 - t_k)$$

Кратность для рассола принять равной 2.

4. Рассчитать поверхность нагрева для каждой секции по формуле:

$$F_c = \frac{G \cdot c \cdot (t_k - t_n)}{K \cdot \Delta T} \text{ м}^2$$

где  $F_c$  - поверхность нагрева секции, м<sup>2</sup>,

$G$  - производительность аппарата, кг/с;

$c$  - удельная теплоемкость сырья, Дж/ кг \* град;

$K$  - коэффициент теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup> \* град (для пластинчатых теплообменников он равняется 2000 - 2500, Вт/ м<sup>2</sup> \* град );

$\Delta T$  - средняя логарифмическая разность температур секции.

Среднюю логарифмическую разность температур для каждой секции можно рассчитать по формуле:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{2,3 \cdot \lg \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}}$$

где  $\Delta t_{\delta}$  - большая разность температур между теплоносителем и продуктом;

$\Delta t_{\text{м}}$  - малая разность температур между теплоносителем и продуктом.

**Пример расчета разности температур показан ниже.**

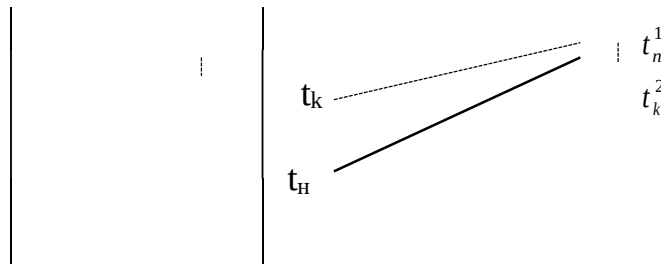


Рисунок 10.2 - График к расчету  $\Delta t$

$$\Delta t_{\delta} = t_k - t_n; \Delta t_{\text{м}} = t_n^1 - t_k^2.$$

5. Определить количество пластин в каждой секции:

$$n = \frac{F_c}{f} + 1$$

где  $f$  - теплопередающая поверхность одной пластины, м<sup>2</sup>.

6. Рассчитать общую поверхность теплообменника и привести характеристику аппарата по полученным данным.

Общую поверхность теплообмена определяют по формуле:

$$F = F_{\Pi} + F_{\text{рег}} + F_{\text{во}} + F_{\text{ро}}, \text{ м}^2.$$

Расчетные данные представить в виде таблицы.

Таблица 10.1 – Сводные данные расчета

| Показатели                                                                                             | Расчетные данные |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| Производительность, кг/ч                                                                               |                  |
| Температура :<br>начальная сыря<br>пастеризации<br>конечная сыря                                       |                  |
| Коэффициент регенерации                                                                                |                  |
| Температура:<br>горячей воды начальная<br>холодной воды начальная<br>рассола начальная                 |                  |
| Количество пластин в секциях<br>пастеризации<br>регенерации<br>охлаждения водой<br>охлаждения рассолом |                  |
| Общая поверхность теплообмена, м <sup>2</sup>                                                          |                  |

В дальнейшем по этим данным можно подобрать необходимую охлаждающе - пастеризационную установку, которые выпускаются серийно.

7. Рассчитать потребность в тепле для пастеризации сыря, холоде - для его охлаждения согласно индивидуальному заданию. Оценить экономию тепла и холода при использовании пастеризационно - охлаждающей установки.

Таблица 10.2 – Индивидуальные задания для расчетов

| № вар | Прои звод. т/ч | Вид сырья      | С.В., % | $t_n$ , °C | $t_{п}$ , °C | $t_k$ , °C | $c$ , Дж/кг град | $t_{вгн}$ , °C | $t_{вхн}$ , °C | $t_{рн}$ , °C |
|-------|----------------|----------------|---------|------------|--------------|------------|------------------|----------------|----------------|---------------|
| 1     | 25             | бульон костный | 0,2     | 10         | 85           | 5          | 4063             | 92             | 15             | -2            |
| 2     | 5              | то же          | 0,3     | 9          | 85           | 5          | 4031             | 90             | 12             | -5            |
| 3     | 15             | то же          | 0,4     | 8          | 85           | 5          | 3964             | 93             | 14             | -4            |
| 4     | 10             | то же          | 0,5     | 7          | 85           | 5          | 3921             | 91             | 13             | -2            |
| 5     | 15             | то же          | 0,6     | 6          | 85           | 5          | 3856             | 94             | 12             | -3            |
| 6     | 10             | молоко обезж   | 9,0     | 5          | 92           | 5          | 3935             | 98             | 14             | -6            |
| 7     | 15             | молоч сывор    | 6,0     | 4          | 75           | 5          | 4074             | 85             | 13             | -5            |
| 8     | 5              | плазма крови   | 10,0    | 5          | 75           | 5          | 3955             | 83             | 15             | -4            |
| 9     | 5              | барда паточ    | 10,0    | 10         | 85           | 5          | 3950             | 95             | 16             | -5            |
| 10    | 25             | хлор. калыц    | 5,0     | 7          | 90           | 5          | 3902             | 97             | 15             | -4            |
| 11    | 15             | то же          | 7,0     | 8          | 90           | 5          | 3764             | 97             | 14             | -3            |
| 12    | 10             | то же          | 10,0    | 9          | 90           | 5          | 3563             | 96             | 14             | -5            |
| 13    | 10             | Молоко обезж   | 9,0     | 8          | 87           | 5          | 3935             | 90             | 13             | -5            |
| 14    | 12             | молоч сывор    | 6,0     | 6          | 75           | 5          | 4072             | 86             | 14             | -4            |
| 15    | 5              | плазма крови   | 8,0     | 4          | 75           | 5          | 3955             | 90             | 14             | -3            |
| 16    | 5              | барда паточ    | 12,0    | 8          | 87           | 5          | 3950             | 95             | 16             | -5            |
| 17    | 10             | Молоко обезж   | 14,0    | 6          | 87           | 5          | 3935             | 90             | 14             | -3            |

## Практическая работа № 11

**Тема:** Неоднородные полидисперсные пищевые системы

### Цель работы

Изучить теоретические основы неоднородных полидисперсных пищевых систем, их классификацию, свойства и методы разделения, а также освоить принципы выбора оборудования для обработки таких систем в биотехнологических производствах.

### Задачи

1. Изучить классификацию и характеристики неоднородных полидисперсных систем.
2. Рассмотреть основные процессы, протекающие в таких системах.
3. Ознакомиться с аппаратами для разделения неоднородных систем.
4. Проанализировать влияние дисперсности на технологические процессы.
5. Закрепить знания на примерах реальных биотехнологических производств.

### Теоретическая часть

#### 1. Понятие неоднородных полидисперсных систем

Неоднородные (гетерогенные) полидисперсные системы – это системы, состоящие из двух или более фаз, где одна фаза (дисперсная) распределена в другой (дисперсионной среде) в виде частиц разного размера.

Основные признаки:

- наличие границы раздела фаз;
- полидисперсность (разный размер частиц);
- термодинамическая неустойчивость.

#### 2. Классификация неоднородных систем

| Тип системы | Дисперсная фаза        | Дисперсионная среда   | Примеры в пищевой биотехнологии                    |
|-------------|------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------|
| Суспензии   | Твёрдые частицы        | Жидкость              | Фруктовые пюре, томатное пюре, дрожжевые суспензии |
| Эмульсии    | Жидкость (капли)       | Жидкость              | Майонез, соусы, молочные продукты                  |
| Пены        | Газ                    | Жидкость/твёрдое тело | Взбитые десерты, пиво, хлебное тесто               |
| Аэрозоли    | Твёрдые/жидкие частицы | Газ                   | Сухое молоко (пыль), распылительная сушка          |

### 3. Основные характеристики систем

Дисперсность — степень измельчения частиц, обратная величина среднего диаметра частиц:

$$D = 1/d_{cp}$$

Концентрация дисперсной фазы (C) — массовая или объёмная доля частиц в системе.

Размер частиц (d) — от нано- до миллиметровых размеров ( $10^{-9}$ – $10^{-3}$  м).

Плотность фаз ( $\rho_p$  — частиц,  $\rho_s$  — среды).

Вязкость среды ( $\mu$ ).

### 4. Основные процессы в неоднородных системах

Седиментация (осаждение) — движение частиц под действием силы тяжести.

Флокуляция — слипание частиц в крупные агрегаты.

Коагуляция — необратимое слипание частиц.

Диффузия — самопроизвольное выравнивание концентрации.

Разделение — осаждение, фильтрование, центрифугирование.

### 5. Расчётные формулы

Скорость осаждения (закон Стокса):

$$v = \frac{d^2(\rho_p - \rho_s)g}{18\mu},$$

где:

- $v$  — скорость осаждения, м/с;

- $d$  — диаметр частиц, м;
- $\rho_p, \rho_s$  — плотности частиц и среды, кг/м<sup>3</sup>;
- $g$  — ускорение свободного падения, 9,81 м/с<sup>2</sup>;
- $\mu$  — динамическая вязкость среды, Па·с.

Критерий Рейнольдса для оценки режима осаждения:

$$Re = \frac{vd\rho_s}{\mu}.$$

При  $Re < 2$  режим ламинарный, формула Стокса применима.

## 6. Аппаратура для разделения неоднородных систем

| Аппарат      | Принцип действия                                         | Применение в биотехнологии                     |
|--------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Отстойники   | Гравитационное осаждение                                 | Очистка соков, разделение дрожжевых суспензий  |
| Фильтры      | Процеживание через пористую перегородку                  | Очистка растворов, отделение биомассы          |
| Центрифуги   | Действие центробежной силы                               | Разделение клеточных культур, выделение белков |
| Сепараторы   | Комбинированное действие (центробежное + гравитационное) | Разделение молока, очистка растительных масел  |
| Гидроциклоны | Центробежное разделение в потоке                         | Очистка сточных вод, разделение суспензий      |

## 7. Факторы, влияющие на эффективность разделения

- размер частиц (чем крупнее, тем быстрее осаждение);
- разность плотностей фаз;
- вязкость среды (чем выше, тем медленнее осаждение);
- скорость потока;
- конструкция аппарата.

### Практическая часть

#### Задание 1. Анализ системы

Рассмотрите систему «дрожжевая суспензия» (производство хлебопекарных дрожжей):

- определите тип системы;
- укажите дисперсную фазу и дисперсионную среду;

- перечислите основные характеристики (примерные значения  $d$ ,  $C$ ,  $\rho$ ,  $\mu$ );
- предложите методы разделения.

**Пример ответа:**

- тип системы — суспензия;
- дисперсная фаза — дрожжевые клетки ( $d=5\text{--}10$  мкм);
- дисперсионная среда — вода ( $\rho_s=1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mu=0,001$  Па·с);
- концентрация  $C=5\text{--}15$  %;
- методы разделения — центрифугирование, фильтрация.

**Задание 2. Расчёт скорости осаждения**

Рассчитайте скорость осаждения частиц фруктового пюре при следующих условиях:

- $d=30\times 10^{-6}$  м;
- $\rho_p=1150$  кг/м<sup>3</sup>;
- $\rho_s=1030$  кг/м<sup>3</sup>;
- $\mu=0,002$  Па·с.

Проверьте применимость формулы Стокса, рассчитав критерий Рейнольдса.

**Задание 3. Выбор оборудования**

Для системы «майонез» (эмульсия) предложите 2-3 аппарата для разделения фаз. Обоснуйте выбор, указав преимущества и недостатки каждого варианта.

**Задание 4. Анализ влияния факторов**

Как изменится скорость осаждения частиц, если:

- увеличить размер частиц в 2 раза?
- уменьшить вязкость среды в 1,5 раза?
- увеличить разность плотностей в 1,3 раза?

Ответ подтвердите расчётами.

**Контрольные вопросы**

1. Что такое полидисперсная система? Приведите 3 примера из пищевой биотехнологии.
2. Чем отличается суспензия от эмульсии?
3. В каких случаях применима формула Стокса?
4. Как вязкость среды влияет на скорость осаждения частиц?

5. Какие аппараты используются для разделения суспензий? Кратко опишите принцип их работы.

6. Что такое флокуляция и как она влияет на процессы разделения?

7. Почему полидисперсность усложняет процессы разделения?

8. Как можно интенсифицировать процесс осаждения частиц?

#### Оформление отчёта

Отчёт должен содержать:

1. Титульный лист с указанием темы, ФИО студента, группы, даты.  
2. Цель и задачи работы.  
3. Краткий теоретический обзор (основные понятия, формулы, классификация).

4. Ответы на задания с пояснениями и расчётами.

5. Ответы на контрольные вопросы.

6. Выводы по работе (что изучено, какие навыки получены).

## Практическая работа № 12. Расчет абсорбера

В производстве кукурузного крахмала из смеси воздуха и двуокиси серы ( $\text{SO}_2$ ) в количестве  $G$  кг/с, содержащей двуокиси серы  $y_H$ , % (масс.), двуокись серы поглощается водой.

Содержание  $\text{SO}_2$  в воде на входе в абсорбер  $x_H = 0$  и на выходе из него  $x_K$ , % (масс.).  
Степень извлечения  $\text{SO}_2$  из газа –  $\varphi$ , %.

Определить расход воды на поглощение  $\text{SO}_2$ . В производстве кукурузного крахмала из смеси воздуха и двуокиси серы ( $\text{SO}_2$ ) в количестве  $G$ , кг/с, содержащей двуокиси серы  $y_H$ , % (масс.), двуокись серы поглощается водой.

Содержание  $\text{SO}_2$  в воде на входе в абсорбер  $x_H = 0$  и на выходе из него  $x_K$ , % (масс.).  
Степень извлечения  $\text{SO}_2$  из газа –  $\varphi$ , %.

Определить расход воды на поглощение  $\text{SO}_2$ .

### Массовые составы жидкости и газа

1. Массовые составы жидкости и газа на входе в аппарат и выходе из него по формулам

$$y_0 = \frac{y}{(1-y)}; \quad x_0 = \frac{x}{(1-x)}.$$

#### Жидкая фаза:

на входе в абсорбер  $x_H = 0$

на выходе из абсорбера  $x_K = \frac{X_K/100}{(1-X_K/100)}$ , кг  $\text{SO}_2$ /кг воды.

#### Газовая фаза:

на входе в абсорбер  $y_H = \frac{Y_H/100}{(1-Y_H/100)}$ , кг  $\text{SO}_2$ /кг воздуха

на выходе из абсорбера  $y_K = (1-\varphi) \cdot Y_H$  кг  $\text{SO}_2$ /кг воздуха.

2. Определяется количество  $\text{SO}_2$ , поглощаемое водой в абсорбере ( $M$ , кг)

$$M = G \cdot (y_H - y_K), \text{ кг/с.}$$

3. Расход воды на поглощение  $\text{SO}_2$  находится из уравнения материального баланса

$$M = G \cdot (y_H - y_K) = L \cdot (x_K - x_H), \text{ кг/с.}$$

Индивидуальные задания приведены в таблице 14.1

Таблица 14.1 – Индивидуальные задания

| Вариант | G, кг/с | $x_k$ , % (масс.) | $y_H$ , % (масс.) | $\varphi$ , % |
|---------|---------|-------------------|-------------------|---------------|
| 1       | 0,28    | 2,2               | 47                | 86            |
| 2       | 0,29    | 2,3               | 48                | 88            |
| 3       | 0,30    | 2,4               | 46                | 87            |
| 4       | 0,31    | 2,5               | 45                | 75            |
| 5       | 0,32    | 2,6               | 49                | 85            |
| 6       | 0,33    | 2,7               | 50                | 86            |
| 7       | 0,34    | 2,8               | 51                | 88            |
| 8       | 0,35    | 2,9               | 52                | 89            |
| 9       | 0,36    | 3,0               | 46                | 90            |
| 10      | 0,27    | 3,1               | 45                | 82            |
| 11      | 0,26    | 3,2               | 49                | 84            |
| 12      | 0,25    | 2,5               | 50                | 84            |
| 13      | 0,28    | 2,6               | 51                | 83            |
| 14      | 0,29    | 2,8               | 52                | 89            |
| 15      | 0,30    | 2,9               | 47                | 75            |
| 16      | 0,31    | 3,0               | 48                | 85            |
| 17      | 0,32    | 3,1               | 46                | 86            |

### Пример выполнения задания

В производстве кукурузного крахмала из смеси воздуха и двуокиси серы ( $\text{SO}_2$ ) в количестве  $G = 0,3$  кг/с, содержащей двуокиси серы  $y_H = 48\%$  (масс.), двуокись серы поглощается водой.

Содержание  $\text{SO}_2$  в воде на входе в абсорбер  $x_H = 0$  и на выходе из него  $x_k = 2,5\%$  (масс.). Степень извлечения  $\text{SO}_2$  из газа – 85%.

Определить расход воды на поглощение  $\text{SO}_2$ .

### Решение

1. Рассчитываются относительные массовые составы жидкости и газа на входе в аппарат и выходе из него по формулам

$$y_0 = \frac{y}{(1-y)}; \quad x_0 = \frac{x}{(1-x)}.$$

**Жидкая фаза:**

на входе в абсорбер  $x_H = 0$

$$\text{на выходе из абсорбера } x_K = \frac{0,025}{(1-0,025)} = 0,0256 \text{ кг SO}_2/\text{кг воды}.$$

**Газовая фаза:**

на входе в абсорбер  $y_H = \frac{0,48}{(1-0,48)} = 0,92$  кг SO<sub>2</sub>/кг воздуха

на выходе из абсорбера  $y_K = (1-0,85) \cdot 0,92 = 0,138$  кг SO<sub>2</sub>/кг воздуха.

2. Определяется количество SO<sub>2</sub>, поглощаемое водой в абсорбере (M, кг)

$$M = G \cdot (y_H - y_K) = 0,3 \cdot (0,92 - 0,138) = 0,235 \text{ кг/с.}$$

3. Расход воды на поглощение SO<sub>2</sub> находится из уравнения материального баланса

$$M = G \cdot (y_H - y_K) = L \cdot (x_K - x_H)$$

$$L = \frac{G \cdot (y_H - y_K)}{(x_K - x_H)} = \frac{0,235}{(0,0256 - 0)} = 7,18 \text{ кг/с.}$$

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №13

### Расчет адсорбера

Требуется определить габариты адсорбера и загрузку активированного угля в адсорбер  $G_a$  для очистки  $V_c$  сортировки. Если продолжительность адсорбции  $\tau_a=0,5$  часа, общая начальная концентрация примесей в сортировке  $y_n=0,15$  кг/м<sup>3</sup>. Динамическая емкость угля по примесям  $x_k=0,025$  кг/кг. Общая начальная концентрация примесей в угле  $x_n=0,006$  кг/кг. Насыпная плотность угля  $\rho_n=600$  кг/м<sup>3</sup>.

Определяем расход адсорбента из материального баланса:

$$G_a \cdot (X_k - X_n) = V_c \cdot y_n$$

Принимаем, что  $x_k \rightarrow x_p$ , а  $y_k = 0$ . тогда расход адсорбента:

$$G_a = V_c \cdot \frac{y_n}{X_k - X_n}, \text{ кг/час}$$

Объемный расход адсорбента:

$$V_a = \frac{G_a}{\rho_n}, \text{ м}^3/\text{час.}$$

Определяем объем адсорбера:

$$V_{аб.} = 1,25(V_c + V_a)\tau_a, \text{ м}^3;$$

где  $V_c$  - объемный расход сортировки, м<sup>3</sup>/час;

$V_a$  - объемный расход адсорбента, м<sup>3</sup>/час;

$\tau_a$  - продолжительность адсорбции, час;

$1/\varphi=1,25$ -величина, обратная коэффициенту заполнения,  $\varphi=0,8$ .

Определяем высоту адсорбера:

### Расчет мощности, потребляемой мешалкой

Расчет производим по критериальному уравнению:

$$Eu_m = f(Re_m)$$

Определяем модифицированные критерии подобия:

Критерий Рейнольдса

$$Re_m = \frac{n^1 \cdot d^2 \cdot \rho}{\mu_c}$$

Критерий Эйлера

$$Eu_m = \frac{N}{\rho_c \cdot n^3 \cdot d_m^5}$$

где  $n'$  - частота вращения мешалки, с<sup>-1</sup>;

$d_m$  - диаметр мешалки, м;

$\rho_c$  - плотность суспензии, кг/м<sup>3</sup>;

$N$  - потребляемая мощность;

$\mu_{ж}$  - вязкость суспензии, Па·С.

Частоту вращения лопастной мешалки принимаем согласно задания.

Вязкость 40% раствора этилового спирта в воде при температуре 20°C

$$\mu_{жс} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{С}.$$

$$\text{Вязкость суспензии: } \mu_c = \mu_{жс}(1+2,5\varphi),$$

где  $\varphi$  - объемная доля адсорбента

$$\varphi = \frac{V_a}{V_c}$$

$$\text{Плотность суспензии } \rho_c = \rho_a \varphi + \rho_{жс}(1-\varphi),$$

где  $\rho_a$  - плотность адсорбента,  $\rho_a = 1400 \text{ кг/м}^3$ ;

$\rho_{жс}$  - плотность 40% этилового спирта,  $\rho_{жс} = 950 \text{ кг/м}^3$ .

$$\text{Диаметр мешалки: } d_m = 0,33 \cdot D_{ад.}, \text{ м.}$$

Определяем критерий Рейнольдса и по графику, рис. 13.1, по кривой 1 (1) находим число Эйлера, а затем потребляемую мешалкой мощность  $N$ :

$$N = Eu_m \cdot \rho_c \cdot n^3 \cdot d_m^5, \text{ Вт}$$

Мощность в пусковой момент в 3 - 4 раза превышает потребляемую:

$$Nn = (3 \div 4)N, \text{ Вт}$$

Установочная мощность при КПД передачи 0,9 и запасе мощности 20 %:

$$Ny = Nn \cdot 1,2 / 0,9, \text{ Вт}$$

**Таблица 13.1 – Индивидуальные задания**

| Вариант | Производительность $V'_c$ ,<br>дал*/час | Диаметр адсорбера<br>$D_{ад.}$ , м | Число оборотов мешалки<br>$n$ , об/мин, |
|---------|-----------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1       | 240                                     | 1,0                                | 180                                     |
| 2       | 280                                     | 1,1                                | 200                                     |
| 3       | 320                                     | 1,2                                | 210                                     |
| 4       | 300                                     | 1,1                                | 220                                     |
| 5       | 320                                     | 1,1                                | 210                                     |
| 6       | 360                                     | 1,4                                | 230                                     |
| 7       | 240                                     | 1,1                                | 240                                     |
| 8       | 260                                     | 1,15                               | 250                                     |
| 9       | 280                                     | 1,2                                | 240                                     |
| 10      | 300                                     | 1,20                               | 250                                     |
| 11      | 240                                     | 1,1                                | 210                                     |
| 12      | 280                                     | 1,4                                | 230                                     |
| 13      | 320                                     | 1,1                                | 240                                     |
| 14      | 300                                     | 1,15                               | 250                                     |
| 15      | 320                                     | 1,2                                | 180                                     |
| 16      | 360                                     | 1,20                               | 200                                     |
| 17      | 240                                     | 1,1                                | 210                                     |

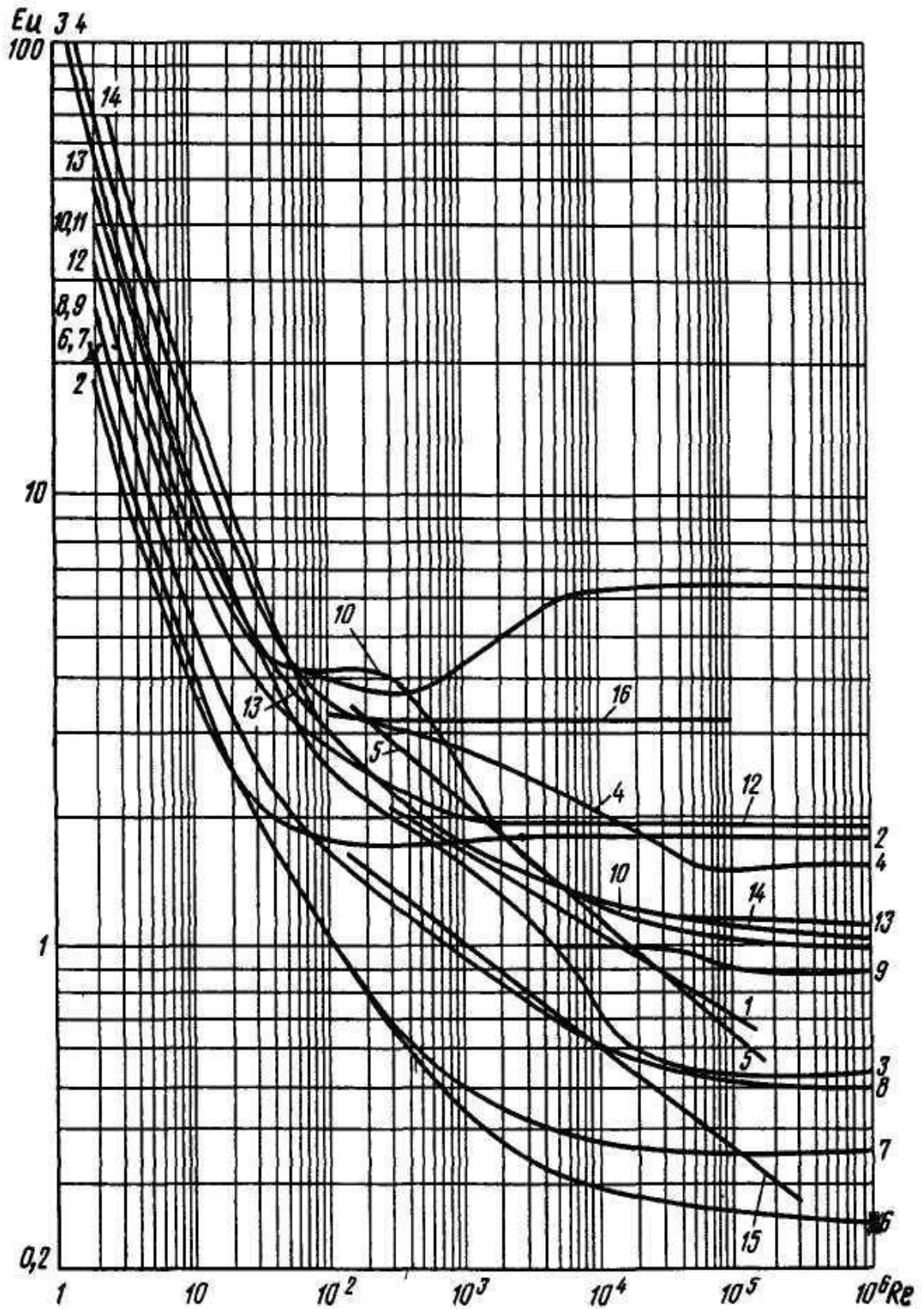


Рисунок 13.1 - Графическая зависимость  $Eu = f(Re)$  для различных типов мешалок (нумерация кривых соответствует номеру и типу мешалки в табл. 8.2)

## 13.2 - Характеристики мешалок и аппаратов

| № кривой на рис 8.1 | Тип мешалки                                                    | Характеристика мешалки |                 |       |       | Характеристика сосуда                                         |
|---------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------|-------|-------|---------------------------------------------------------------|
|                     |                                                                | $D/d$                  | $H/D$           | $b/d$ | $s/D$ |                                                               |
| 1                   | Двухлопастная                                                  | 3                      | 1               | 0,25  | —     | Без перегородок                                               |
| 2                   | »                                                              | 3                      | 1               | 0,167 | —     | С четырьмя перегородками шириной 0,1 $D$                      |
| 3                   | »                                                              | 2                      | 1               | 0,885 | —     | Без перегородок                                               |
| 4                   | »                                                              | 2                      | 1               | 0,885 | —     | Со змеевиком ( $d = 1,9d$ ; $d_{тр} = 0,066d$ ; $t = 0,12d$ ) |
| 5                   | Шестилопастная                                                 | 1,11                   | 1               | 0,066 | —     | Без перегородок                                               |
| 6                   | Пропеллерная                                                   | 3                      | 1               | —     | 1     | Тоже                                                          |
| 7                   | »                                                              | 3                      | 1               | —     | 1     | С четырьмя перегородками шириной 0,1 $D$                      |
| 8                   | »                                                              | 3                      | 1               | —     | 2     | Без перегородок                                               |
| 9                   | »                                                              | 3                      | 1               | —     | 2     | С четырьмя перегородками шириной 0,1 $D$                      |
| 10                  | Открытая турбинная с шестью плоскими лопатками                 | 3                      | $l(l/d = 0,25)$ |       |       | Без перегородок                                               |
| 11                  | Тоже                                                           | 3                      | 1               | 0,2   | —     | С четырьмя перегородками шириной 0,1 $D$                      |
| 12                  | Открытая турбинная с восемью плоскими наклонными лопатками     | 3                      | 1               | 0,125 | —     | Тоже                                                          |
| 13                  | Закрытая турбинная с шестью лопатками                          | 3                      | 1               | —     | —     | Без перегородок                                               |
| 14                  | Закрытая турбинная с шестью лопатками и направляющим аппаратом | 3                      | 1               | —     | —     | Тоже                                                          |
| 15                  | Якорная                                                        | 1,11                   | 1               | 0,066 | —     | »                                                             |
| 16                  | Дисковая с шестью лопатками                                    | 2,5                    | 1               | 0,1   | —     | С четырьмя перегородками шириной 0,1 $D$                      |

Примечание:  $D$  — диаметр сосуда;  $H$  — высота слоя жидкости в мешалке,  $b$  — ширина лопасти мешалки,  $s$  — шаг винта,  $l$  — длина лопасти:  $d$ ,  $d_{тр}$ ,  $d_{зм}$  — диаметр соответственно мешалки,

трубы и змеевика,  $t$  — шаг змеевика

## **Практическая работа № 14**

### **Гомогенизация пищевого сырья. Гомогенизация молочного сырья**

#### **Цель работы**

Изучить сущность процесса гомогенизации молочного сырья, его роль в пищевой биотехнологии, ознакомиться с типами гомогенизаторов и их применением, проанализировать влияние гомогенизации на качество и стабильность молочных продуктов.

#### **Задачи**

1. Изучить сущность и назначение процесса гомогенизации в пищевой промышленности.
2. Рассмотреть основные типы гомогенизаторов, их устройство и принцип работы.
3. Проанализировать влияние гомогенизации на свойства молочных продуктов.
4. Ознакомиться с технологическими схемами включения гомогенизации в производственный процесс.
5. Оценить преимущества и ограничения применения гомогенизации.

#### **Теоретическая часть**

##### **1. Понятие и назначение гомогенизации**

Гомогенизация — технологический процесс, направленный на равномерное распределение частиц дисперсной фазы (капель жира, твёрдых частиц) в среде и уменьшение их размера для получения устойчивых неоднородных систем.

Основные цели гомогенизации в пищевой биотехнологии:

- предотвращение отстаивания жира в молоке и молочных продуктах;
- улучшение консистенции и вкусовых качеств;
- повышение стабильности эмульсий и суспензий;
- увеличение сроков хранения продуктов;
- улучшение усвояемости продуктов организмом.

Примеры продуктов, подвергаемых гомогенизации:

- молоко и сливки;

- йогурты и кефиры;
- мороженое;
- детские молочные смеси;
- соусы и кетчупы;
- пюреобразные продукты.

## 2. Физические процессы при гомогенизации

При гомогенизации происходят следующие явления:

- дробление крупных капель жира на более мелкие;
- равномерное распределение жировых капель по всему объёму;
- стабилизация системы за счёт образования белковой оболочки вокруг жировых капель;
- снижение скорости отстаивания жира.

После гомогенизации средний диаметр жировых капель уменьшается с 3–5 мкм до 0,5–1 мкм.

## 3. Типы гомогенизаторов и их особенности

| Тип гомогенизатора           | Принцип действия                                                                | Производительность | Область применения                                                   |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------------------------------------|
| <b>Клапанный</b>             | Продукт под высоким давлением проходит через узкую щель между клапаном и седлом | Высокая            | Промышленное производство молока, сливок, соков с мякотью            |
| <b>Ультразвуковой</b>        | Воздействие ультразвуковых колебаний на продукт                                 | Низкая             | Лабораторные исследования, производство специализированных продуктов |
| <b>Роторно-пульсационный</b> | Механическое воздействие вращающихся элементов на продукт                       | Средняя            | Производство соусов, кетчупов, паст, вязких продуктов                |

|            |                                                               |                |                                                                     |
|------------|---------------------------------------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------------|
| Мембранный | Прокачивание                                                  | Низкая–средняя | Производство<br>специализированных<br>и функциональных<br>продуктов |
|            | продукта через<br>мембраны с<br>калиброванными<br>отверстиями |                |                                                                     |

#### 4. Технологические параметры гомогенизации

Ключевые факторы, влияющие на эффективность процесса:

давление гомогенизации (обычно 10–25 МПа);

температура продукта (оптимально 55–65 °С — снижает вязкость);

содержание жира (чем выше, тем сложнее гомогенизация);

вязкость продукта;

наличие стабилизаторов и эмульгаторов.

#### 5. Влияние гомогенизации на свойства молочных продуктов

Положительные эффекты:

однородная консистенция без отстоя жира;

кремовый вкус;

повышенная стабильность при хранении;

лучшая способность к взбиванию (для сливок);

улучшенная усвояемость.

Возможные негативные последствия:

повышенная склонность к окислению жира;

изменение структуры белков;

возможное ухудшение способности к свёртыванию (для сыроварения).

#### 6. Место гомогенизации в технологической схеме производства

Типичная последовательность операций:

Приёмка и оценка качества сырья.

Очистка (фильтрация или сепарирование).

Нормализация по жиру.

Пастеризация или стерилизация.

Гомогенизация.

Охлаждение.

Фасовка и упаковка.

## Практическая часть

### Задание 1. Анализ типов гомогенизаторов

Изучите описание различных типов гомогенизаторов (клапанных, ультразвуковых, роторно-пульсационных, мембранных).

Заполните таблицу:

| Параметр           | Клапанный | Ультразвуковой | Роторно-пульсационный | Мембранный |
|--------------------|-----------|----------------|-----------------------|------------|
| Принцип действия   |           |                |                       |            |
| Производительность |           |                |                       |            |
| Область применения |           |                |                       |            |
| Преимущества       |           |                |                       |            |
| Недостатки         |           |                |                       |            |

Сделайте вывод о том, какой тип гомогенизатора наиболее подходит для:  
 промышленного производства молока;  
 лабораторных исследований;  
 производства кетчупа.

### Задание 2. Сравнение свойств гомогенизированного и негомогенизированного молока

Возьмите две пробы молока:

проба 1 — негомогенизированное молоко;

проба 2 — гомогенизированное молоко.

Оставьте пробы в мерных цилиндрах на 24 часа при комнатной температуре.

Наблюдайте за процессом отстаивания жира:

отметьте время появления слоя сливок;

оцените толщину слоя через 2, 6 и 24 часа;

опишите внешний вид продукта (однородность, цвет, наличие осадка).

Заполните таблицу наблюдений:

| Время   | Проба 1 (негомогенизированное) | Проба 2 (гомогенизированное) |
|---------|--------------------------------|------------------------------|
| 2 часа  |                                |                              |
| 6 часов |                                |                              |
| 24 часа |                                |                              |

Сделайте вывод о влиянии гомогенизации на стабильность жировой фазы.

### Задание 3. Анализ технологических схем

Рассмотрите технологические схемы производства:

пастеризованного молока;

йогурта;

мороженого.

Определите, на каком этапе в каждой схеме включена гомогенизация.

Объясните, почему гомогенизация проводится именно на этом этапе.

Укажите, какие параметры гомогенизации (давление, температура) обычно используются для каждого продукта.

### Задание 4. Оценка преимуществ и ограничений гомогенизации

Составьте список из 5–7 преимуществ гомогенизации для молочной промышленности.

Составьте список из 3–5 ограничений или возможных проблем, связанных с гомогенизацией.

Предложите способы минимизации негативных последствий гомогенизации.

### Контрольные вопросы

Что такое гомогенизация? Для чего она применяется в пищевой промышленности?

Какие типы гомогенизаторов существуют? В чём их основные отличия?

Как гомогенизация влияет на консистенцию и стабильность молочных продуктов?

Почему гомогенизация обычно проводится после пастеризации?

Какие продукты обязательно подвергаются гомогенизации, а какие — нет?  
Почему?

Какие недостатки может иметь гомогенизация? Как их можно компенсировать?

Как влияет температура на процесс гомогенизации?

Почему гомогенизированное молоко дольше сохраняет однородную консистенцию?

### **Оформление отчёта**

Отчёт должен содержать:

Титульный лист с указанием темы, ФИО студента, группы, даты.

Цель и задачи работы.

Краткий теоретический обзор (основные понятия, типы гомогенизаторов, влияние на свойства продуктов).

Заполненные таблицы и результаты наблюдений.

Ответы на задания с выводами по каждому пункту.

Ответы на контрольные вопросы.

Общий вывод по работе (что изучено, какие навыки получены, практическое значение результатов).

**Расчет распылительной сушилки**

Материальный баланс сушильной установки выражают уравнением:

$$M_1 * S_1 = (M_1 - W) * S_2 = M_2 * S_2, \quad (15.1)$$

где  $M_1$  - масса исходного продукта, кг;  $S_1$  - массовая доля сухих веществ в исходном продукте, %;  $W$  - масса испаренной влаги, кг;  $M_2$  - масса готового продукта, кг;  $S_2$  - массовая доля сухих веществ в готовом продукте, %.

Используя уравнение (1) данные о производительности сушилки по исходному продукту, можно определить производительность сушилки по готовому продукту или по испаренной влаге:

$$M_2 = M_1 * S_1 / S_2, \quad (15.2)$$

$$W = (M_1 * S_2 - M_1 * S_1) / S_2. \quad (15.3)$$

Объем сушильной камеры определяют по формуле:

$$V = W / A, \text{ м}^3, \quad (15.4)$$

где  $A$  - напряжение единицы объема сушилки по испаренной влаге, кг / (м<sup>3</sup> \* ч).  
Напряжение объема сушилки по испаренной влаге зависит от температуры горячего воздуха:

$t$  .100; 120; 130; 140; 150; 200;

$A$ . 2; 2,4; 2,8; 3,2; 3,6; 5,0;

Количество сухого воздуха, поступающего в башню, определяем по формуле:

$$L_c = 1000 * W / (d_2 - d_1), \quad (15.5)$$

где  $L_c$  - масса сухого воздуха, поступающего в башню, кг / ч;  $d_1$  - удельное влагосодержание исходного воздуха, г влаги / кг сухого воздуха;  $d_2$  - удельное влагосодержание отработанного воздуха, г влаги / кг сухого воздуха.

Удельное влагосодержание как исходного, так и отработанного воздуха определяют по I - D диаграмме. Исходными данными для определения удельного влагосодержания являются: температуры сухого и влажного термометра исходного воздуха, температуры воздуха, входящего в камеру и выходящего из камеры. При проведении расчетов можно принять температуру исходного воздуха по сухому термометру 15 °С, по влажному - 10 °С. Температуры воздуха на входе в сушильную камеру и на выходе из неё принимают с учетом типа сушилки и высушиваемого материала.

Объемный расход воздуха, поступающего в башню, определяем по формуле:

$$L_o = L_c * v_o, \quad (15.6)$$

где  $v_o$  - удельный объем влажного воздуха, отнесенный к 1 кг сухого воздуха. Объем и масса воздуха связаны следующим уравнением:

$$v_o = 3,46 \cdot \frac{T}{p_o} \cdot \frac{622 + d}{1000}, \quad (15.7)$$

где  $T$  - температура воздуха в  $^{\circ}\text{K}$ ;  $p_o$  - барометрическое давление воздуха, мм рт.ст.;  
 $d$  - влагосодержание воздуха, г влаги / кг сухого воздуха.

Количество тепла, затраченного на нагрев воздуха или сушку, определяют по формуле:

$$Q = L_c \cdot (i_1 - i_0), \quad (15.8)$$

где  $i_0$  - удельное теплосодержание воздуха до поступления в калорифер, кДж / кг;  $i_1$  - удельное теплосодержание воздуха при выходе из калорифера, кДж / кг.

При нагревании воздуха в калориферах расход пара можно определить по формуле:

$$D = \frac{L_c \cdot (I_1 - I_o)}{\eta \cdot (i - c_{\text{конд}} \cdot t_{\text{конд}})}, \quad (15.9)$$

где  $i$  - удельное теплосодержание пара, Дж / кг;  $t_{\text{конд}}$  - температура конденсата,  $^{\circ}\text{C}$  (можно принять на 10-15  $^{\circ}\text{C}$  ниже температуры греющего пара);  $c_{\text{конд}}$  - удельная теплоемкость конденсата, Дж / (кг \*  $^{\circ}\text{C}$ );  $\eta$  - к.п.д. калорифера (принять 0,9...0,97).

### Конструктивный расчет

При помощи конструктивного расчета распылительной сушилки можно определить диаметр и высоту сушильной камеры распылительной сушилки центробежного распыления. Сначала необходимо найти средний и максимальный диаметр капель. Для этого используют формулу Фрассера:

$$d_{\text{ср}} = 0.55 \times \left( G \times v_{\text{ж}} / D_{\text{д}} \right)^{0.2} \times (1/n)^{0.6} \times (1/\rho_{\text{ж}})^{0.3} \times (\sigma_{\text{ж}}/\Pi)^{0.1},$$

где  $G$  – расход жидкости, л/ч;

$D_{\text{д}}$  – диаметр рабочего диска, м;

$n$  – количество оборотов за единицу времени,  $\text{с}^{-1}$ ;

$v_{\text{ж}}$  - кинематическая вязкость жидкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$\Pi$  – смоченный периметр диска, м;

$\rho_{\text{ж}}$  - плотность высушиваемой жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\sigma_{\text{ж}}$  - поверхностное натяжение жидкости,  $\text{кг}/\text{м}$ .

Эта величина приблизительно равна  $(75,4 \dots 102) \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}$ .

Максимальный диаметр ( $d_{\text{макс}}$ ) принимается равным от 2,5 до 3 средних диаметров.

Далее конструктивный расчет распылительной сушилки заключается в нахождении радиуса, на который разбрызгивается жидкость (факел) и радиуса сушильной камеры. Определяется, используя формулу Борде:

$$R_{\text{г}} / d_{\text{МАКС}} = 1.995 \times 10^3 \times \text{Re}^{1.13} \times \left[ \frac{r \times \eta_{\text{г}}}{(\lambda_{\text{г}} \times (t_{\text{г}} - t_{\text{к}}))} \right]^{0.4}$$

$$\text{Re} = \frac{V_{\text{г}} \times d_{\text{МАКС}}}{\nu},$$

здесь  $\nu$  - кинематическая вязкость газа,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$\eta_{\text{г}}$  - динамическая вязкость газа,  $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ ;

$\lambda_{\text{г}}$  - коэффициент теплопроводности газа,  $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$ ;

$r$  - удельная теплота парообразования,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;

$V_{\text{г}}$  - объем газа,  $\text{м}^3$ ;

$(t_{\text{г}} - t_{\text{к}})$  - разница температур между газом и каплей жидкости в самом начале процесса.

Далее ведут определение объема сушильной камеры:

$$V_{\text{к}} = 3600W / A_{\text{в}},$$

где  $A_{\text{в}}$  - удельное напряжение по испаренной влаге,  $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ .

Эта величина будет зависеть от диаметра капель, диаметра сушильной камеры и температуры поступающего воздуха.

$$1) D_{\text{к}} = 2,5 \div 5 \text{ м}, t_1 = 150 \dots 200^\circ\text{C}, d_{\text{МАКС}} = (50 \dots 400) \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

$$A_{\text{в}} \approx (1.8 \div 2.2) \times 10^{-4} \times d_{\text{МАКС}}^{-0.33}$$

$$2) D_{\text{к}} = 1 \div 9 \text{ м}, t_1 = 120 \dots 220^\circ\text{C}, d_{\text{МАКС}} = (50 \dots 500) \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

$$A_{\text{в}} \approx (2,5 \div 3) \times 10^{-3} \times \left[ \frac{t_1 \times D_{\text{к}}}{d_{\text{МАКС}} \times 10^6} \right]^{0.2};$$

$W$  - расход влаги:

$$W = G \times (\omega_{\text{Н}} - \omega_{\text{к}}) / (100 - \omega_{\text{Н}}),$$

где  $w_{\text{Н}}$  и  $w_{\text{к}}$  - это начальное и конечное влагосодержание в обрабатываемой жидкости. Последним этапом является нахождение такого параметра, как рабочая высота камеры.

$$H_{\text{к}} = \frac{4V_{\text{к}}}{\pi \times D_{\text{к}}^2}$$

Отступив, отметим, что для сушильной камеры, где используются форсунки, этот параметр составляет  $H_{\text{к}}/D_{\text{к}} = 1,5 \dots 2,5$  м. Эта величина зависит как от влажности обрабатываемого раствора, так и от производительности установки. Отношение высоты камеры к ее диаметру будет тем меньшим, чем производительность больше, а влажность

меньше. В случае, когда не требуется получить порошок, а нужны гранулы, то отношение высоты к диаметру будет больше или равно 5.

В установках, где основным рабочим элементом является распылительный диск,  $H_K/D_K = 0.8 \dots 1$  м. Стандартно диск установлен на высоте 1 – 1,5 метра от верхней точки камеры.

Индивидуальные задания приведены в таблице 15.1.

**Таблица 15.1 - Индивидуальные задания по распылительным сушилкам**

| № Вар. | Производительность сушиллки по среде, кг / с | Характеристика процесса сушки |                 |                 |                  |                  |
|--------|----------------------------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
|        |                                              | м.д. СВ нач., %               | м.д. СВ кон., % | тем-ра сред. °C | т-ра на вых., °C | т-ра на входе °C |
| 1      | 500                                          | 45                            | 90              | 65              | 85               | 185              |
| 2      | 600                                          | 44                            | 91              | 64              | 84               | 184              |
| 3      | 700                                          | 43                            | 92              | 63              | 83               | 183              |
| 4      | 800                                          |                               | 93              | 62              | 82               | 182              |
| 5      | 900                                          | 42                            | 94              | 61              | 81               | 181              |
| 6      | 1000                                         | 41                            | 95              | 60              | 80               | 180              |
| 7      | 1100                                         | 40                            | 90              | 59              | 79               | 179              |
| 8      | 1200                                         | 39                            | 91              | 58              | 78               | 178              |
| 9      | 1300                                         | 38                            | 92              | 57              | 77               | 177              |
| 10     | 1400                                         | 37                            | 93              | 56              | 76               | 176              |
| 11     | 1500                                         | 36                            | 94              | 55              | 75               | 175              |
| 12     | 1600                                         | 35                            | 95              | 54              | 74               | 174              |
| 13     | 1700                                         | 36                            | 90              | 53              | 73               | 173              |
| 14     | 1800                                         | 37                            | 91              | 52              | 75               | 175              |
| 15     | 1900                                         | 38                            | 92              | 51              | 76               | 176              |
| 16     | 2000                                         | 39                            | 93              | 50              | 77               | 177              |
| 17     | 1900                                         | 40                            | 94              | 51              | 78               | 178              |

### Пример выполнения задания

Рассчитать и подобрать распылительную сушиллку производительностью 1000 кг / ч суспензии с массовой долей сухих веществ 35 %. Температура воздуха на входе в сушиллку 185 °C, отработанного воздуха на выходе из сушильной камеры 85 °C. Температура воздуха перед нагревом по сухому термометру - 15 °C, по мокрому термометру - 10 °C.

### Исходные данные для расчета:

Производительность сушиллки по исходному продукту - 1000 кг / ч;

Массовая доля сухих веществ в исходном продукте - 35 %;

Массовая доля веществ в готовом продукте - 94 %;

Температура воздуха на входе в сушильную камеру - 185 °C;

Температура воздуха на выходе из сушильной камеры  $-85^{\circ}\text{C}$ ;

Температура воздуха перед нагреванием:

- по сухому термометру  $-15^{\circ}\text{C}$ ;

- по мокрому -  $10^{\circ}\text{C}$ .

Из уравнения материального баланса (15.1) определяем производительность сушилки по испаренной влаге по формуле (15.2) и готовому продукту по формуле (15.3):

$$M_{\text{пр}} = 1000 \cdot 35 / 94 = 372,3 \text{ кг / ч}$$

$$W = (1000 \cdot 94 - 1000 \cdot 35) / 94 = 627,6 \text{ кг / ч}$$

Объем сушильной камеры определяем по формуле (15.4):

$$V = 627,6 / 4,6 = 136,4 \text{ м}^3.$$

Диаметр сушильной камеры определяем по формуле (15.5):

$$D = 1,05 \cdot \sqrt[3]{\frac{627,6}{4,6}} = 5,4 \text{ м}$$

Высоту камеры сушки определяем по формуле (15.6):

$$H = 1,2 \cdot 5,4 = 6,5 \text{ м.}$$

Количество сухого воздуха, поступающего в башню, определяем по формуле (15.7):

$$L_c = 1000 \cdot 627,6 / (46,5 - 6,5) = 15690 \text{ кг сухого воздуха / ч.}$$

Объемный расход воздуха, поступающего в башню, определяем по формуле (15.8), предварительно определив удельный объем влажного воздуха по формуле (15.9):

$$v_o = 3,46 \cdot \frac{458}{760} \cdot \frac{622 + 6,5}{1000} = 1,184 \text{ м}^3 / \text{кг сухого воздуха}$$

$$L_o = 15690 \cdot 1,184 = 18577 \text{ м}^3 / \text{ч}$$

Количество тепла, затраченное на нагрев воздуха или на сушку, определяем по формуле (15.10):

$$Q = 15690 \cdot (185 - 28) = 2463330 \text{ кДж / ч}$$

Расход пара на нагрев воздуха в калориферах определяем по формуле (15.11):

$$D = 2463330 / (0,9 \cdot (2790 - 4,385 \cdot 170)) = 1338,7 \text{ кг / ч}$$

Удельный расход пара на 1 кг испаренной влаги в час:

$$D_{\text{уд}} = 1338,7 / 627,6 = 2,1 \text{ кг / кг}$$

### Контрольные вопросы

1. Виды и классификация промышленных установок для сушки биологических объектов.
2. Перечислите основные требования к сушильным установкам ?
3. Перечислите преимущества и недостатки распылительных сушилок ?
5. Характеристика объекта сушки для распылительных сушилок.
6. С какой целью и как осуществляется очистка воздуха перед его нагреванием и использованием для сушки?
7. Каковы способы экономии тепла при сушке?
8. В чем сущность расчета и подбора сушильных установок ?

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 16

## Расчет однокорпусного вакуум-аппарата

## Задание

Определить расход теплоты и греющего пара на выпаривание раствора в количестве  $G_1$  кг/ч, его начальная концентрация  $X_1\%$  масс., конечная  $X_2\%$  масс. Температура поступающего раствора  $t_1$  °С, температура кипения раствора  $t_2$  °С, удельная теплоемкость раствора  $C$  Дж/кг·К. Давление в аппарате  $P_{ВТ}$  МПа. Давление греющего пара  $P_{Г}$  МПа.

Таблица 11.1 – Индивидуальные задания для расчетов

| Вариант | $G$ , кг/ч | $C$ , Дж/кг·К | $t_1$ | $t_2$ | $P_{Г}$ МПа | $P_{ВТ}$ МПа | $X_1\%$<br>масс. | $X_2\%$<br>масс. |
|---------|------------|---------------|-------|-------|-------------|--------------|------------------|------------------|
| 1       | 18000      | 3600          | 35    | 73    | 0,06        | 0,016        | 6                | 56               |
| 2       | 20000      | 3800          | 40    | 75    | 0,07        | 0,017        | 8                | 57               |
| 3       | 22000      | 4200          | 48    | 78    | 0,08        | 0,018        | 10               | 58               |
| 4       | 25000      | 3400          | 38    | 74    | 0,09        | 0,019        | 12               | 60               |
| 5       | 34000      | 3200          | 42    | 85    | 0,10        | 0,020        | 14               | 61               |
| 6       | 30000      | 3600          | 45    | 90    | 0,12        | 0,016        | 16               | 62               |
| 7       | 28000      | 3800          | 32    | 80    | 0,14        | 0,017        | 18               | 63               |
| 8       | 34000      | 4200          | 38    | 82    | 0,16        | 0,018        | 20               | 64               |
| 9       | 18000      | 3600          | 46    | 84    | 0,18        | 0,019        | 6                | 65               |
| 10      | 12000      | 4000          | 44    | 72    | 0,20        | 0,020        | 8                | 66               |
| 11      | 10000      | 4500          | 48    | 74    | 0,10        | 0,016        | 10               | 67               |
| 12      | 14000      | 3500          | 34    | 82    | 0,12        | 0,017        | 12               | 62               |
| 13      | 25000      | 3400          | 42    | 73    | 0,14        | 0,018        | 14               | 63               |
| 14      | 32000      | 3200          | 24    | 79    | 0,16        | 0,019        | 16               | 64               |
| 15      | 40000      | 3600          | 18    | 80    | 0,18        | 0,020        | 18               | 65               |
| 16      | 42000      | 3800          | 22    | 92    | 0,20        | 0,016        | 20               | 66               |
| 17      | 50000      | 4000          | 23    | 88    | 0,10        | 0,018        | 22               | 67               |

## Пример решения задания

Определить расход теплоты и греющего пара на выпаривание раствора в количестве  $G_1 = 20000$  кг/ч, его начальная концентрация  $x_1 = 25\%$  масс., конечная  $x_2 = 45\%$  масс. Температура поступающего раствора  $t_1 = 40^\circ\text{C}$ , температура кипения раствора  $t_2 = 85^\circ\text{C}$ , удельная теплоемкость раствора  $3450$  Дж/кг·К. Давление в аппарате  $P_{ВТ} = 0,019$  МПа. Давление греющего пара  $P_{Г} = 0,14$  МПа.

**Решение.**

1. Масса выпаренной воды находится по формуле

$$W = G_1 \cdot \left( 1 - \frac{x_1}{x_2} \right) = 20000 \cdot \left( 1 - \frac{25}{45} \right) = 8800 \text{ кг/ч.}$$

2. Масса упаренного раствора определяется по формуле

$$G_1 = G_2 + W; \quad G_2 = G_1 - W$$

$$G_2 = 20000 - 8800 = 11200 \text{ кг/ч.}$$

3. Расход теплоты на выпаривание определяется из уравнения

$$Q_\tau = G_1 \cdot C \cdot (t_2 - t_1) + W \cdot (i_{\text{ВТ}} - C_{\text{В}} \cdot t_2),$$

где  $i_{\text{ВТ}} = 2358 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$  - энтальпия выбирается из таблиц термодинамических свойств водяного пара ( $P_{\text{ВТ}} = 0,019 \text{ Мпа}$ ) (Приложение 1).

$$Q_\tau = \frac{20000}{3600} \cdot 3450 \cdot (85 - 40) + \frac{8800}{3600} \cdot (2358 \cdot 10^3 - 4190 \cdot 85) = 5722614 \text{ Вт.}$$

4. Расход греющего пара находится по формуле

$$D = \frac{Q_\tau}{r} = \frac{5722614}{2208 \cdot 10^3} = 2,59 \text{ кг/с} = 9324 \text{ кг/ч.}$$

где  $C_{\text{В}} = 4190 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$  – удельная теплоемкость воды;  $r = 2208 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$  - теплота парообразования греющего пара, выбирается из таблицы термодинамических свойств по давлению  $P_r$ .

**Контрольные вопросы**

1. В чем заключается процесс выпаривания?
2. Какими методами в промышленности осуществляют выпаривание?
3. Из какого уравнения определяется расход греющего пара?
4. Чем отличается полезная разность температур от общей разности?
5. За счет чего происходит экономия греющего пара в многокорпусных выпарных установках?
6. В чем заключается расчет выпарных установок?

**Расчет многокорпусного вакуум-аппарата****Задание**

Выполнить расчет 2-х корпусного циркуляционного вакуум-аппарата для выпаривание раствора в количестве  $G_1$  кг/ч, его начальная концентрация  $X_1\%$  масс., конечная  $X_2$  % масс.

Температура поступающего раствора  $t_1^0\text{C}$ , температура кипения раствора  $t_2^0\text{C}$ , удельная теплоемкость раствора  $C$  Дж/кг·К. Давление греющего пара  $P_{\Gamma}$  МПа.

**Таблица 12.1 – Индивидуальные задания для расчетов**

| Вариант | $G$ , кг/ч | $C$ , Дж/кг·К | $t_n$ | $t_1$ | $P_{\Gamma}$ МПа | $X_1\%$ масс. | $X_2$ % масс. |
|---------|------------|---------------|-------|-------|------------------|---------------|---------------|
| 1       | 18000      | 3600          | 35    | 73    | 0,06             | 6             | 56            |
| 2       | 20000      | 3800          | 40    | 75    | 0,07             | 8             | 57            |
| 3       | 22000      | 4200          | 48    | 78    | 0,08             | 10            | 58            |
| 4       | 25000      | 3400          | 38    | 74    | 0,09             | 12            | 60            |
| 5       | 34000      | 3200          | 42    | 85    | 0,10             | 14            | 61            |
| 6       | 30000      | 3600          | 45    | 90    | 0,12             | 16            | 62            |
| 7       | 28000      | 3800          | 32    | 80    | 0,14             | 18            | 63            |
| 8       | 34000      | 4200          | 38    | 82    | 0,16             | 20            | 64            |
| 9       | 18000      | 3600          | 46    | 84    | 0,18             | 6             | 65            |
| 10      | 12000      | 4000          | 44    | 72    | 0,20             | 8             | 66            |
| 11      | 10000      | 4500          | 48    | 74    | 0,10             | 10            | 67            |
| 12      | 14000      | 3500          | 34    | 82    | 0,12             | 12            | 62            |
| 13      | 25000      | 3400          | 42    | 73    | 0,14             | 14            | 63            |
| 14      | 32000      | 3200          | 24    | 79    | 0,16             | 16            | 64            |
| 15      | 40000      | 3600          | 18    | 80    | 0,18             | 18            | 65            |
| 16      | 42000      | 3800          | 22    | 92    | 0,20             | 20            | 66            |
| 17      | 50000      | 4000          | 23    | 88    | 0,10             | 22            | 67            |

### Пример решения задания

Определить расход теплоты и греющего пара на выпаривание раствора в количестве  $G_1 = 4000$  кг/ч, его начальная концентрация  $X_1 = 5,5\%$  масс., конечная  $X_2 = 62\%$  масс. Температура поступающего раствора  $t_n = 40^\circ\text{C}$ , температура кипения раствора в первом корпусе  $t_1 = 65^\circ\text{C}$ , удельная теплоемкость раствора  $C = 3450$  Дж/кг·К. Давление в аппарате. Давление греющего пара  $P_\Gamma = 0,06$  Мпа

### Решение

#### Тепловой расчет аппарата

1. Производительность по выпаренной воде  $W = 4000/3600 = 1,111$  кг/с

Из уравнения материального баланса определяем производительность установки по исходной среде ( $W$ , кг/с):

$$W = G_n \cdot (1 - B_n / B_k) \quad 12.1$$

$$G_n = 1,111 / (1 - 5,5 / 62) = 1,219 \text{ кг/с}$$

Общее количество выпаренной воды состоит из суммы выпаренной воды в каждом корпусе:  $W = W_1 + W_2$

Принимаем соотношение выпаренной воды по корпусам:

$$W_1 : W_2 = 1 : 1,1.$$

Воду, выпаренную в первом корпусе, определяем по уравнению:

$$W_1 = W \cdot 1,0 / (1 + 1,1) = 1,111 \cdot 1,0 / (1 + 1,1) = 0,529 \text{ кг/с} \quad 12.2$$

Воду, выпаренную во втором корпусе, определяем по уравнению:

$$W_2 = W \cdot 1,1 / (1 + 1,1) = 1,111 \cdot 1,1 / (1 + 1,1) = 0,582 \text{ кг/с}$$

Концентрацию упаренного раствора после первого корпуса определяем по формуле:

$$B_{k1} = G_n \cdot B_n / (G_n - W_1) = 1,219 \cdot 5,5 / (1,219 - 0,529) = 9,72 \%$$

Концентрацию упаренного раствора после второго корпуса определяем по формуле:

$$B_{k2} = G_n \cdot B_n / (G_n - W_1 - W_2) \quad 12.3$$

$$B_{k2} = 1,219 \cdot 5,5 / (1,219 - 0,529 - 0,582) = 62,08 \%$$

Соотношение коэффициентов теплопередачи по корпусам принимаем:

$$K_1 : K_2 = 1 : 0,7$$

Для аппаратов циркуляционного типа с принудительной циркуляцией сгущаемого раствора по таблице 1 (приложение А, [13])  $K_1 = 2000$  Вт/(м<sup>2</sup> · К).

Тогда  $K_2 = 1400$  Вт/(м<sup>2</sup> · К).

Режимы сгущения по корпусам выбираем с учетом состава и свойств концентрируемой среды: первый корпус -  $65^\circ\text{C}$ ; второй корпус -  $60^\circ\text{C}$ . Температуру греющего пара в первом корпусе (при  $P_\Gamma = 0,06$  Мпа)  $t_{\Gamma\text{п}} = 85^\circ\text{C}$ , во втором -  $64^\circ\text{C}$ .

По таблице насыщенного пара находим скрытую теплоту парообразования ( $r$ ) для каждого корпуса:

$$r_1 = 2295 \text{ кДж / кг}; r_2 = 2616 \text{ кДж / кг}$$

Рассчитаем тепловую нагрузку по корпусам, используя формулы:

$$Q_1 = W_1 \cdot r_1, \quad 12.4$$

$$Q_2 = W_2 \cdot r_2, Q_1 = W_1 \cdot r_1, \quad 12.5$$

$$Q_1 = 0,529 \cdot 2295 = 1214 \text{ кДж / с};$$

$$Q_2 = 0,582 \cdot 2616 = 1522,5 \text{ кДж / с};$$

Суммарно полезную разность по корпусам рассчитаем по формуле, приняв суммарные потери температуры по корпусам  $4^\circ\text{C}$ :

$$\Delta t_{\text{п}} = t_{\text{грп}} - t_{\text{впп2}} - \sum \Delta t_{\text{пп}}, \quad 14.6$$

$$\Delta t_{\text{п}} = 85 - 60 - 4 = 11^\circ\text{C}.$$

Принимаем, что поверхности нагрева всех корпусов равны между собой. Тогда полезную разность температур определяем по формулам:

$$\Delta t_{\text{п1}} = (\Delta t_{\text{п}} \cdot Q_1 / K_1) / (Q_1 / K_1 + Q_2 / K_2) \quad 12.7$$

$$\Delta t_{\text{п1}} = (\Delta t_{\text{п}} \cdot Q_2 / K_2) / (Q_1 / K_1 + Q_2 / K_2), \quad 12.8$$

$$\Delta t_{\text{п1}} = (11 \cdot 1214 / 2000) / (1214 / 2000 + 1522,5 / 1400) = 3,94^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{\text{п1}} = (11 \cdot 1522,5 / 1400) / (1214 / 2000 + 1522,5 / 1400) = 7,06^\circ\text{C}$$

Определим расчетные площади поверхности нагрева по корпусам по формулам:

$$F_{\text{п1}} = Q_1 / (K_1 \cdot \Delta t_{\text{п1}}), \quad 12.9$$

$$F_{\text{п2}} = Q_2 / (K_2 \cdot \Delta t_{\text{п2}}), \quad 12.10$$

$$F_{\text{рм1}} = 1214 / 2,0 \cdot 3,94 = 154,06 \text{ м}^2;$$

$$F_{\text{рм2}} = 1522,5 / 1,4 \cdot 7,06 = 154,04 \text{ м}^2$$

Максимальную расчетную площадь поверхности нагрева получаем путем увеличения расчетной площади на 25 %:

$$F_{\text{р.м.}} = (154,06 + 154,04) \cdot 1,25 = 385,12 \text{ м}^2.$$

Выбираем вакуум-выпарную установку по максимальной площади поверхности нагрева (предположим, что выбрали аппарат с поверхностью нагрева  $400 \text{ м}^2$ ).

Рассчитаем фактическую производительность вакуум-выпарной установки по формуле:

$$G_{\phi} = G_n \cdot F_{\phi} / F_{\text{р.м.}}, \quad 12.11$$

$$G_{\phi} = 1,219 \cdot 400 / 385,12 = 1,266 \text{ кг / с}.$$

Фактический расход греющего пара рассчитываем по формуле:

$$D_{\text{гр.п.}} = W_1 \cdot F_{\phi} / F_{\text{р.м.}}, \quad 12.12$$

$$D_{гр.п.} = 0,529 * 3600 * 400 / 385,12 = 1978 \text{ кг / ч}$$

Удельный расход греющего пара определяем по формуле:

$$d = D_{гр.п.} / W, \quad 12.13$$

$$d = 1978 / 1,111 * 3600 = 0,494 \text{ кг / кг}$$

Расход тепла в подогревателе для подогрева среды перед подачей её на сгущение рассчитываем по формуле:

$$Q_n = 3600 \cdot G_{\phi} \cdot c \cdot (t_2 - t_1), \quad 12.14$$

$$Q_{под} = 1,266 * 4,078 * 3600 * (67 - 17) = 929294,64 \text{ кДж / ч}$$

Количество пара, поступающего в конденсатор из второго корпуса, рассчитываем по формуле:

$$D = W_2 * F_v / F_{pm} = 0,582 * 400 / 385,12 = 0,604 \text{ кг / с}$$

### Конструктивный расчет

#### Расчет основных размеров греющей камеры

Общее число греющей камеры находят по формуле:

$$n = F_{pm1} / \pi * d_n * l \quad 12.15$$

где  $d_n$  – наружный диаметр кипятильных труб;

$l$  – длина пучка кипятильных труб.

По данным циркуляционного аппарата Wiegand принимаем

$$d_n = 38 \text{ мм}; l = 1700 \text{ мм}$$

$$n = 200 / 3,1415 * 0,038 * 1,7 = 986 \text{ шт}$$

Общее число труб размещают на трубной решетке по периметру правильных шестиугольников с шагом, определяемым по формуле:

$$t = (1,3 \div 1,4) d_n = 1,4 * 0,038 = 0,054 \text{ м} \quad 12.16$$

При размещении труб в аппаратах для сгущения молока, сыворотки можно не учитывать циркуляционную трубу.

Внутренний диаметр корпуса греющей камеры определяется по формуле:

$$D = t \cdot (b - 1) + 4d_n \quad 12.17$$

$b$  – число труб по диагонали наибольшего шестиугольника, которое находят по таблице 14.2 в зависимости от общего числа труб, полученных по формуле.

Таблице 14.2 - Число труб по диагонали наибольшего шестиугольника

|     |     |     |     |     |     |      |      |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| $n$ | 127 | 169 | 217 | 817 | 919 | 1027 | 1141 |
| $b$ | 13  | 15  | 17  | 31  | 35  | 37   | 39   |

Принимаем  $b = 37$  шт, тогда:

$$D = 0,054 * (37 - 1) + 4 * 0,038 = 2,06 \text{ м}$$

Принято  $D = 2000$  мм

Толщину трубной решетки  $h_{тр}$  определяют из соотношения:

$$h_{тр} = 0,125 \cdot d_n + 5 \text{ мм} \quad 12.18$$

Если  $d_n < 38$  мм, то  $h_{тр}$  принимают равной 10 мм.

$$h_{тр} = 0,125 \cdot 38 + 5 = 10 \text{ мм}$$

## **Практическая работа № 18**

### **Аппаратура для проведения процессов ферментации**

#### **Цель работы**

Изучить виды и конструкции аппаратов для ферментации, их основные системы и узлы, освоить принципы выбора ферментационного оборудования для различных биотехнологических процессов.

#### **Задачи**

Изучить классификацию ферментационных аппаратов.

Рассмотреть основные конструктивные элементы биореакторов.

Ознакомиться с системами контроля и регулирования в ферментационном оборудовании.

Проанализировать особенности аппаратов для аэробной и анаэробной ферментации.

Освоить принципы выбора биореактора для конкретных биотехнологических задач.

#### **Теоретическая часть**

##### **1. Понятие ферментации и биореактора**

Ферментация — процесс культивирования микроорганизмов или клеток для получения целевого продукта (антибиотиков, ферментов, органических кислот, биомассы и т.д.).

Биореактор (ферментёр) — аппарат для проведения ферментации, обеспечивающий оптимальные условия для роста культуры и биосинтеза.

##### **2. Классификация биореакторов**

По способу подвода энергии:

с подводом энергии к газовой фазе (барботажные, колонного типа);

с подводом энергии к жидкой фазе (механические, струйные);

с комбинированным подводом энергии.

По условиям культивирования:

аэробные (с подачей воздуха/кислорода);

анаэробные (без подачи кислорода).

По режиму работы:  
 периодические;  
 полунепрерывные;  
 непрерывные.

### 3. Основные системы биореактора

| Система                  | Назначение                                             | Компоненты                                                    |
|--------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Перемешивания            | Равномерное распределение клеток, субстрата, кислорода | Мешалки различных типов (пропеллерные, турбинные, ленточные)  |
| Аэрации                  | Подача кислорода для аэробных культур                  | Барботёры, аэраторы, диффузоры                                |
| Теплообмена              | Поддержание заданной температуры                       | Рубашки, змеевики, внешние теплообменники                     |
| Контроля и регулирования | Мониторинг и управление параметрами процесса           | Датчики pH, температуры, DO, пеногасители, системы управления |
| Стерилизации             | Обеспечение асептических условий                       | Паровые клапаны, фильтры воздуха, системы CIP/SIP             |

### 4. Конструктивные особенности биореакторов

Аэробные биореакторы:

оснащены мощными мешалками и системами аэрации;

имеют высокую интенсивность массообмена;

применяются для выращивания дрожжей, бактерий, мицелиальных грибов.

Анаэробные биореакторы:

не имеют систем интенсивной аэрации;

часто оснащены устройствами для удаления газов (метана, CO<sub>2</sub>);

используются для метанового брожения, производства биогаза, получения органических кислот.

### 5. Примеры промышленного применения

Фармацевтика: производство антибиотиков, вакцин, ферментов.

Пищевая промышленность: производство пива, вина, кисломолочных продуктов, хлебопекарных дрожжей.

Сельское хозяйство: получение кормовых белков, биоудобрений.

Энергетика: производство биогаза, биотоплива.

### Практическая часть

#### Задание 1. Анализ конструктивных элементов биореактора

Рассмотрите схему типового биореактора (ёмкостью 1–10 м<sup>3</sup>).

Обозначьте на схеме основные узлы:

корпус;

мешалка;

барботёр;

рубашка охлаждения;

датчики контроля;

штуцеры для подачи субстрата и отбора проб.

Опишите назначение каждого элемента.

Укажите, какие системы биореактора обеспечивают:

массообмен;

теплообмен;

стерильность процесса.

#### Задание 2. Сравнение типов биореакторов

Заполните таблицу, сравнивая характеристики различных типов биореакторов:

| Тип биореактора         | Принцип работы                                                 | Преимущества                                               | Недостатки                                     | Применение                               |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Механический с мешалкой | Перемешивание механической мешалкой, аэрация через барботёр    | Хороший массообмен, универсальность                        | Высокие энергозатраты, риск повреждения клеток | Культивирование бактерий, дрожжей        |
| Барботажный колонный    | Аэрация за счёт подачи воздуха снизу, перемешивание пузырьками | Низкие энергозатраты, простота конструкции                 | Ограниченный массообмен, пенообразование       | Производство этанола, уксуса             |
| Трубчатый проточный     | Непрерывное течение среды по трубе                             | Высокая производительность, простота обслуживания          | Сложность контроля параметров                  | Получение биогаза, очистка сточных вод   |
| Мембранный              | Разделение биомассы через мембраны                             | Высокая чистота продукта, возможность иммобилизации клеток | Высокая стоимость, засорение мембран           | Фармацевтика, получение чистых ферментов |

### Задание 3. Выбор биореактора для конкретного процесса

Для каждого из перечисленных процессов подберите оптимальный тип биореактора и обоснуйте выбор:

- выращивание пекарских дрожжей;
- производство метана из органических отходов;
- синтез пенициллина;
- получение молочной кислоты.

Укажите:

- тип биореактора;
- ключевые параметры процесса (аэрация, температура, pH);
- особенности конструкции, важные для данного процесса.

### Задание 4. Анализ систем контроля и регулирования

Рассмотрите схему системы автоматического контроля биореактора.

Перечислите параметры, которые необходимо контролировать при

ферментации.

Укажите датчики и приборы для измерения каждого параметра.

Объясните, как изменение одного параметра (например, pH) может повлиять на другие.

Предложите алгоритм действий системы управления при отклонении pH от нормы.

Задание 5. Оценка эффективности ферментационного оборудования

Сравните два биореактора:

лабораторный (объёмом 5 л);

промышленный (объёмом 10 м<sup>3</sup>).

Ответьте на вопросы:

Какие конструктивные отличия между ними?

Как масштабирование влияет на массообменные процессы?

Какие дополнительные системы требуются для промышленного биореактора?

### **Контрольные вопросы**

Что такое биореактор? Каковы его основные функции?

Чем отличаются аэробные и анаэробные биореакторы? Приведите примеры их использования.

Какие системы обеспечивают массообмен в биореакторе?

Почему важно контролировать температуру и pH при ферментации?

Какие типы мешалок используются в биореакторах? В чём их отличия?

Как обеспечивается стерильность процесса ферментации?

В чём преимущества непрерывных процессов ферментации перед периодическими?

Какие факторы учитывают при масштабировании биореакторов?

Назовите основные проблемы, возникающие при работе с большими биореакторами.

Приведите примеры биотехнологических продуктов, получаемых с помощью ферментации.

**Оформление отчёта**

Отчёт должен содержать:

Титульный лист с указанием темы, ФИО студента, группы, даты.

Цель и задачи работы.

Краткий теоретический обзор (основные понятия, классификация биореакторов, их системы).

Заполненные таблицы и схемы с обозначениями.

Ответы на задания с обоснованиями выбора.

Ответы на контрольные вопросы.

Общий вывод по работе (что изучено, какие навыки получены, практическое значение результатов).

## ЛИТЕРАТУРА

**Основная литература:**

1. Бредихин, С. А. Технология и техника переработки молока [Текст] : учебник для вузов / С. А. Бредихин, Ю. В. Космодемьянский, В. Н. Юрин. – М. : КолосС, 2003. – 400 с.
2. Винаров, А. Ю. Лабораторные и промышленные ферментеры [Текст] : учебное пособие для вузов / А. Ю. Винаров, А. А. Кухаренко, В. И. Панфилов. – М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2004. – 97 с.
3. Храмцов, А. Г. Технология продуктов из молочной сыворотки [Текст] : учебное пособие для вузов (гриф УМО) / А. Г. Храмцов, П. Г. Нестеренко. – М. : ДеЛи Принт, 2004. – 587 с.
4. Крылов, И. А. Основы проектирования биотехнологических производств [Текст] : учебное пособие для вузов / И. А. Крылов, А. А. Кухаренко, В. И. Панфилов. – М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2003. – 168 с.
5. Крусъ, Г. Н. Технология молока и молочных продуктов [Текст] : учебник для вузов / Г. Н. Крусъ, А. Г. Храмцов, З. С. Волокитина, С. В. Карпычев. – М. : КолосС, 2004. – 485 с.

**Дополнительная литература:**

6. Волчков, И. И. Насосы для молока и молочных продуктов (Эксплуатация и наладка оборудования) [Текст] / И. И. Волчков, В. И. Волчков. – М. : Пищевая промышленность, 1980. – 208 с.
7. Колунянц, К. А. Оборудование микробиологических производств [Текст] / К. А. Колунянц, Л. И. Голгер, В. Е. Балашов. – М. : ВО Агропромиздат, 1987. – 398 с.
8. Гаврилова, В. А. Емкостное оборудование молочной промышленности [Текст] / В. А. Гаврилова. – М. : Агропромиздат, 1987. – 184 с.
9. Горбатова, К. К. Химия и физика белков молока [Текст] : учебник для вузов / К. К. Горбатова. – М. : КолосС, 1993. – 191 с.
10. Кавецкий, Г. Д. Процессы и аппараты пищевых производств [Текст] : учебник для вузов / Г. Д. Кавецкий, А. В. Королев. – М. : Агропромиздат, 1991. – 432 с.
11. Липатов, Н. Н. Руководство к лабораторным и практическим занятиям по курсу оборудования предприятий молочной промышленности [Текст] / Н. Н. Липатов. – М. : Пищевая промышленность, 1978. – 286 с.
12. Липатов, Н. Н. Мембранные методы разделения молока и молочных продуктов [Текст] / Н. Н. Липатов, В. А. Марьин, Е. А. Фетисов. – М. : Пищевая промышленность, 1976. – 186 с.
13. Методические указания к расчетно-практическим работам и самостоятельной работе студентов по дисциплине: “Основы технологии и оборудования пищевых производств” [Текст] / С. В. Василисин, И. А. Евдокимов, А. Д. Лодыгин. – Ставрополь: СевКавГТУ, 2001. – 100 с.
14. Методические указания по курсу ПАПП – КПИ, Краснодар, 1975

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ БИОТЕХНОЛОГИИ /  
PROCESSES AND APPARATUS OF BIOTECHNOLOGY

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Направление подготовки 19.03.01 Биотехнология

Направленность (профиль) Промышленная биотехнология

Ставрополь 2026

|                                                                                                                          |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4 семестр</b>                                                                                                         | <b>стр</b> |
| Лабораторная работа №1. Изучение физико-механических свойств биотехнологических систем                                   | 87         |
| Лабораторная работа № 2. Расчет производительности и потребляемой мощности шестеренчатого насоса                         | 97         |
| Лабораторная работа № 3. Расчет производительности и потребляемой мощности винтового насоса                              | 101        |
| Лабораторная работа № 4. Исследование свойств неоднородных полидисперсных пищевых систем                                 | 104        |
| Лабораторная работа № 5. Расчет производительности и потребляемой мощности поршневого насоса                             | 109        |
| Лабораторная работа № 6. Изучение ультрафильтрации биологических жидкостей                                               | 112        |
| <b>5 семестр</b>                                                                                                         |            |
| Лабораторная работа № 7. Расчет производительности и потребляемой мощности центробежного насоса. Подбор электродвигателя | 121        |
| Лабораторная работа № 8. Изучение технологического процесса электромембранной обработки биологического сырья             | 128        |
| Лабораторная работа № 9. Изучение влияния технологических факторов на процессы концентрирования целевых продуктов        | 134        |
| Лабораторная работа № 10. Изучение влияния технологических факторов на процессы сушки целевых продуктов                  | 138        |
| Лабораторная работа № 11. Наблюдение массообменных процессов при ферментации без использования биореактора               | 143        |

## **УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

### **Общие правила техники безопасности в химической лаборатории**

1. Работать в лаборатории необходимо в халате из хлопковой или хлопчатобумажной ткани (но не из синтетики!). Рабочий халат должен быть по длине ниже колен и застегиваться спереди. В кармане халата должно быть маленькое чистое сухое полотенце или платок для быстрого удаления попавших на кожу твердых или жидких реагентов. При работе с особо опасными веществами дополнительно надевают длинный фартук из поливинилхлорида и нарукавники. При необходимости для защиты лица и глаз используют защитные маски и защитные очки, для защиты рук – специальные защитные перчатки, а для защиты дыхательных путей – респираторы. Волосы должны быть тщательно убраны (используют шапочку или платок)

или закреплены и не свисать по сторонам.

6. Рабочее место следует поддерживать в чистоте, не загромождать его посудой и побочными вещами.

7. Студентам запрещается работать в лаборатории без присутствия преподавателя или лаборанта, а также в неустановленное время без разрешения преподавателя.

8. До выполнения каждой лабораторной работы можно приступить только после получения инструктажа по технике безопасности и разрешения преподавателя.

9. Приступая к работе, необходимо: изучить методику работы, правила ее безопасного выполнения; проверить соответствие взятых веществ тем веществам, которые указаны в методике работы.

10. Опыт необходимо проводить в точном соответствии с его описанием в методических указаниях, особенно придерживаться очередности добавления реактивов.

11. Для выполнения опыта пользоваться только чистой, сухой лабораторной посудой; для отмеривания каждого реактива нужно иметь

мерную посуду (пипетки, бюретки, мензурку, мерный цилиндр или мерный стакан); не следует выливать избыток налитого в пробирку реактива обратно в емкость, чтобы не испортить реактив.

12. Если в ходе опыта требуется нагревание реакционной смеси, надо следовать предусмотренным методическим указаниям способа нагрева: на водяной бане, на электроплитке или на газовой горелке и др. Сильно летучие горючие вещества опасно нагревать на открытом огне.

13. Пролитые на пол и стол химические вещества обезвреживают и убирают под руководством лаборанта (преподавателя) в соответствии с правилами.

14. При работе в лаборатории следует соблюдать следующие требования: выполнять работу нужно аккуратно, добросовестно, внимательно, экономно, быть наблюдательным, рационально и правильно использовать время, отведенное для работы.

15. По окончании работы следует привести в порядок свое рабочее место: помыть посуду, протереть поверхность рабочего лабораторного стола, закрыть водопроводные краны, выключить электрические приборы.

Помните, не каждое нарушение инструкции влечет за собой несчастный случай, однако мелкие нарушения быстро входят в привычку и объективно способствуют росту травматизма. Умение работать без травм и аварий – один из основных критериев при определении профессиональной квалификации любого специалиста.

#### Правила техники безопасности в лаборатории при работе с кислотами и щелочами

1. Кислоты и щелочи в большинстве относятся к веществам повышенного класса опасности и способны вызвать химические ожоги и отравления. Поэтому необходимо внимательно следить за тем, чтобы реактивы не попадали на лицо, руки и одежду.

2. Не ходить по лаборатории с концентрированными кислотами и щелочами, а наливать их только в отведенном для этого месте.

3. Разливать концентрированную азотную, серную и соляную кислоты следует только при включенной вентиляции в вытяжном шкафу.
4. Запрещается набирать кислоты и щелочи в пипетку ртом. Для этого следует применять резиновую грушу и прочее оборудование для отбора проб.
5. Для приготовления растворов серной, азотной и других кислот необходимо их приливать к воде тонкой струей при непрерывном перемешивании, а не наоборот. Приливать воду в кислоту запрещается!
6. Растворять твердые щелочи следует путем медленного добавления их небольшими кусочками к воде при непрерывном перемешивании. Кусочки щелочи нужно брать только щипцами.
7. При смешивании веществ, которое сопровождается выделением тепла, необходимо пользоваться термостойким толстостенной стеклянной или фарфоровой посудой.
8. Разлитые кислоты или щелочи необходимо немедленно засыпать песком, нейтрализовать, и только после этого проводить уборку.
9. При попадании на кожу или одежду кислоты, надо смыть ее большим количеством воды, а затем 3 – 5% раствором пищевой соды или разбавленным раствором аммиака.
10. При попадании на кожу или одежду щелочи, после смывания ее большим количеством воды, нужно провести обработку 2 – 3 % раствором борной, лимонной или уксусной кислотами.
11. Вещества, фильтры, бумагу, использованные при работе, следует выбрасывать в специальное ведро, концентрированные растворы кислот и щелочей также сливать в специальную посуду.

#### Правила техники безопасности в лаборатории с химической посудой

1. Основным травмирующим фактором, который связан с использованием стеклянной посуды, аппаратов и приборов, являются острые осколки стекла, способные вызвать порезы тела работающего, а также ожоги

рук при неосторожном обращении с нагретыми до высокой температуры частями стеклянной посуды.

2. Размешивать реакционную смесь в сосуде стеклянной палочкой или шпателем надо осторожно, не допуская разлома сосуда. Держать сосуд при этом необходимо за ее горловину.

3. Перенося сосуды с горячей жидкостью, надо держать их двумя руками: одной – за дно, другой – за горловину, используя при этом полотенце (чтобы избежать ожогов кистей и пальцев рук).

4. При закрывании толстостенной посуды пробкой следует держать ее за верхнюю часть горловины. Нагретый сосуд нельзя закрывать притертой пробкой пока он не охладится.

5. В опытах с нагревом необходимо пользоваться посудой, которая имеет соответствующую маркировку.

6. В случае пореза стеклом нужно сначала внимательно осмотреть рану и извлечь из нее осколки стекла, если они есть, а затем обмыть раненное место 2% раствором перманганата калия, смазать йодом и завязать бинтом или заклеить лейкопластырем.

#### Правила техники безопасности в лаборатории электрооборудованием и электроприборами

6. Химические лаборатории согласно степени опасности поражения электрическим током относятся к помещениям с повышенной или особой опасностью, которая обусловлена возможностью воздействия на электрооборудование химически активных сред.

7. Все работы, связанные с применением электроприборов должны проходить под наблюдением преподавателя (лаборанта).

8. При работе с водяной баней нельзя пробовать степень нагрева воды рукой.

9. При неисправности в работе электроприбора необходимо обратиться к преподавателю. Чинить самостоятельно приборы запрещается.

10. При поражении электрическим током, если пострадавший остается в соприкосновении с токоведущими частями, необходимо немедленно выключить ток с помощью пускателя или вывернуть охранную пробку или перерубить токопроводящий провод изолированным инструментом. К пострадавшему, пока он находится под током, нельзя касаться незащищенными руками (без резиновых перчаток). Если пострадавший потерял сознание, после выключения тока нужно немедленно, не дожидаясь врача, делать искусственное дыхание.

#### Правила техники безопасности в лаборатории при работе с реактивами

1. Если к работе не дано указаний относительно дозировки реактивов, то брать их для проведения опытов необходимо в возможно меньшем количестве (экономия материалов и времени, которое затрачивается на опыт).
2. Избыток реактива нельзя высыпать и выливать обратно в сосуд, из которого он был взят.
3. После расходования реактива банку или стакан необходимо сразу закрыть пробкой и поставить на место.
4. Сухие реактивы брать с помощью лопаток, пластмассовых или металлических шпателей. Шпатель должен быть всегда сухим и чистым. После расходования следует его тщательно обтереть.
5. Когда реактив отбирается пипеткой, ни в коем случае нельзя той же пипеткой, не вымыв ее, брать реактив с другой емкости.
6. При наливании реактивов нельзя наклоняться над сосудом, предотвращая попадания брызг на лицо или одежду.
7. Нельзя держать банку или стакан с реактивом, которую нужно открыть, держа в руках, ее надо поставить на лабораторный стол и только после этого открывать.

#### Меры первой помощи при отравлениях неорганическими веществами

Азотной кислотой. Свежий воздух, покой, тепло. Вдыхание кислорода. Сульфадимезин или иной сульфаниламидный препарат (2 г), аскорбиновая кислота (0,5 г), кодеин (0,015 г). Искусственное дыхание. Консультация врача.

Серной кислотой. Свежий воздух. Промыть верхние дыхательные пути 2 % раствором пищевой соды. В нос – 2 – 3 капли 2 % раствора эфедрина. Теплое молоко с содой, кодеин (0,015 г) или дионин (0,01 г). При попадании в органы пищеварения смазать слизистую рта 2 % раствором дикаина. Промывание желудка большим количеством воды. Внутрь принять: столовую ложку оксида магния на стакан воды каждые 5 минут, яичный белок, молоко, крахмальный клейстер, кусочки сливочного несоленого масла, кусочки льда. Нельзя вызывать рвоту и применять карбонаты. Консультация врача.

Щелочами. Вдыхание теплого водяного пара (в воду добавить немного лимонной кислоты). Внутрь – теплое молоко с медом, кодеин (0,015 г) или дионин (0,01 г). При попадании в органы пищеварения смазать слизистые оболочки рта и горла 1 % раствором новокаина. Внутрь – по столовой ложке 1 % раствора лимонной кислоты каждые 3 – 5 минут, крахмальный клейстер с добавлением лимонной или уксусной кислоты, 2 – 3 столовые ложки растительного масла, кусочки льда. Консультация врача.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

### ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Цель и содержание работы:** изучить классификацию, устройство и принцип действия транспортеров и насосов, используемых в биотехнологических производствах; овладеть методиками исследования физико-механических свойств сыпучих и жидких сред.

#### **Теоретическое обоснование**

На предприятиях биотехнологической промышленности широко используются транспортирующие машины для перемещения сыпучих видов сырья и компонентов питательных сред, сухих продуктов. Транспортирующие машины классифицируют по следующим признакам:

- *по способу передачи движущей силы* – с механическим приводом, самотечные, системы пневмотранспорта и гидротранспорта;

- *по конструкции* – с тяговым элементом (груз движется вместе с тяговым элементом), без тягового элемента (груз движется при вращательном или колебательном движении рабочего элемента);

- *по роду перемещаемых грузов* – для насыпных грузов, штучных, для насыпных и штучных грузов;

- *по направлению трассы перемещения грузов* – в одной вертикальной плоскости, в одной горизонтальной плоскости, по пространственной трассе;

- *по характеру движения рабочего (грузонесущего) элемента* (лента, настил, подвески, тележки) – с непрерывным, с периодическим (пульсирующим) движением, рабочий элемент может иметь поступательное, возвратно-поступательное, вращательное или колебательное движение;

- *по характеру перемещения груза* – на непрерывно движущемся несущем элементе (ленточные, пластинчатые конвейеры), в непрерывно движущихся рабочих элементах (ковшовые, подвесные, тележечные конвейеры), волочение груза по неподвижному желобу (скребковые, винтовые конвейеры), скольжение груза (качающиеся инерционные и вибрационные конвейеры).

Выбор типа транспортирующей машины зависит от характера транспортируемого груза (насыпной или штучный), физико-механических свойств сыпучих материалов, требуемой производительности, схемы и размеров трассы транспортирования, допустимых габаритов машин, ее массы и стоимости.

Основными физико-механическими свойствами насыпных материалов являются: гранулометрический состав, плотность, влажность, угол естественного откоса, абразивность, липкость, слеживаемость, смерзаемость, сопротивление перемещению относительно твердых поверхностей.

*Гранулометрический состав* характеризуется количественным распределением частиц материала по их размеру. Коэффициент однородности размеров частиц груза рассчитывается по формуле:

$$K_o = A_{\max} / A_{\min}, \quad (1.1)$$

где  $A_{\max}$ ,  $A_{\min}$  – соответственно наибольший и наименьший размер частиц, при  $K_o > 2,5$  груз считается рядовым, при  $K_o < 2,5$  – сортированным.

*Плотность сыпучего материала* – отношение массы материала к занимаемому им объему. Различают плотность при свободной насыпке (плотность насыпная)  $\rho$  и уплотненного насыпного груза  $\rho_y$ . По плотности насыпные грузы классифицируются на: легкие (при плотности менее  $0,6 \text{ т/м}^3$ ); средние ( $0,6 - 1,1 \text{ т/м}^3$ ); тяжелые ( $1,2 - 2,0 \text{ т/м}^3$ ); весьма тяжелые (более  $2,0 \text{ т/м}^3$ ).

*Угол естественного откоса* – угол между поверхностью свободного откоса насыпного груза и горизонтальной плоскостью. Различают углы естественного откоса насыпного груза в состояниях покоя и движения.

*Истирающей способностью* (абразивностью) сыпучих веществ называется свойство их частиц истирать во время движения соприкасающиеся с ними поверхности. По степени абразивности насыпные грузы делятся на группы: А – неабразивные; В – малоабразивные, С – среднеабразивные; D – высокоабразивные.

*Слеживаемость* насыпных материалов – свойство многих порошкообразных веществ терять подвижность своих частиц в процессе хранения, особенно, при повышенной относительной влажности воздуха.

*Сопротивление перемещению* сыпучих веществ относительно поверхностей твердых тел характеризуется коэффициентами трения этих грузов в состояниях покоя и движения груза.

Штучными называются грузы, которые транспортируются штуками или группами. Различают непосредственно штучные и тарные грузы. Тарные грузы – насыпные или штучные грузы, помещенные в тару (ящики, бочки, мешки и др.).

В пищевой и биотехнологической промышленности для транспортировки жидких видов сырья, полуфабрикатов и готовых продуктов, а также в непрерывных технологических схемах обработки жидких систем для подачи продукта на основное оборудование (теплообменники, фильтры, сепараторы, распылительные сушильные установки) применяют насосы.

Это гидравлические машины, преобразующие механическую энергию двигателя в энергию перемещаемой жидкости. Разность давлений жидкости в насосе и трубопроводе обуславливает ее перемещение. Насосы по принципу действия могут быть разделены на следующие типы: лопастные (центробежные), вихревые, осевые и объемные.

В лопастных (центробежных) насосах давление в жидкости создается центробежной силой, возникающей при вращении лопастных колес. В объемных насосах разность давлений возникает при вытеснении жидкости из замкнутого пространства телами, движущимися возвратно-поступательно (поршневые и плунжерные, мембранные) или вращательно (шестеренные с внешним и внутренним зацеплением, ротационные, кулачковые, шланговые, винтовые).

Для перекачивания жидких продуктов, вязкость которых сравнительно мала, применяются в основном центробежные насосы. Жидкие среды повышенной вязкости перекачивают объемными насосами. Для транспортировки продуктов нежной консистенции, нативных растворов биологически активных веществ, микробных суспензий применяют насосы, которые оказывают минимальное механическое воздействие на жидкую фазу (мембранные, шланговые, винтовые). Для создания высокого давления в потоке жидкости применяют поршневые и плунжерные насосы.

Основными рабочими характеристиками насосов являются: подача, давление, напор, мощность, коэффициент полезного действия.

*Подача* насоса характеризуется количеством жидкости, которое насос может перекачать в единицу времени. Она может быть объемной (л/ч, м<sup>3</sup>/ч, м<sup>3</sup>/с) или массовой (т/ч, кг/с).

*Давлением насоса* в общем случае называется величина, определяемая зависимостью:

$$P = P_k - P_n + [\rho * (v_k^2 - v_n^2) / 2] + \rho * g * (Z_k - Z_n), \quad (1.2)$$

где  $P_k$  и  $P_n$  – давление на выходе и входе насоса, Па;

$v_k$  и  $v_n$  – скорость жидкой среды на выходе и на входе насоса, м/с;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$Z_k$  и  $Z_n$  – высота центра тяжести сечения выхода и входа насоса, м.

*Напором насоса* называется приращение механической энергии, которое сообщает насос 1 кг жидкости, проходящей через него. Напор измеряется в метрах и показывает, на какую высоту насос может поднять жидкость.

*Потребляемая насосом мощность* расходуется на сообщение жидкости кинетической энергии и энергии давления, сумма которых и составляет напор жидкости. Значительная часть мощности расходуется на механические и гидравлические потери в самом насосе. Мощность, потребляемая насосом, больше полезной мощности. Она учитывает потери энергии в насосе, относительная величина которых оценивается коэффициентом полезного действия насоса.

*Коэффициент полезного действия* характеризует совершенство конструкции и экономичность эксплуатации насоса. Величина КПД отражает потери мощности в насосе при перекачивании жидкости.

**Аппаратура и материалы:** весы лабораторные, набор сит, термостат суховоздушный, колбы мерные емкостью 25 – 50 см<sup>3</sup>, воронки с диаметром отверстия 10 – 20 мм, лактоденсиметр стеклянный типа А, набор ареометров, термометры ртутные стеклянные с диапазоном измерения 0 – 55 °С, цилиндры стеклянные емкостью 100 – 250 см<sup>3</sup>, вискозиметр лабораторный капиллярный,

колбы термостойкие емкостью 200 – 250 см<sup>3</sup>, баня водяная, насос лабораторный перистальтический.

### Методика и порядок выполнения работы

Порядок выполнения работы приведен на рисунке 1. 1.



Рисунок 1. 1. Блок-схема алгоритма выполнения работы «Изучение физико-механических свойств сыпучих материалов и жидких систем».

Пояснения к блок-схеме

**БЛОК 1.** Для выполнения задания студентам необходимо рассмотреть классификацию устройств для транспортирования сыпучих веществ и насосов для перекачивания жидких сред. В отчете о работе привести схемы, описание устройства и принципа действия, основные расчетные формулы основных типов транспортеров (ленточных, скребковых, винтовых, пластинчатых, элеваторов и норий) и насосов (центробежных, ротационных, поршневых и плунжерных, винтовых, мембранных, шланговых).

**БЛОК 2.** Студенты по заданию преподавателя исследуют физико-механические характеристики различных сыпучих видов сырья, используемых в биотехнологических производствах по следующим методикам.

*2.1. Исследование гранулометрического состава.* Для проведения гранулометрических исследования используют набор сит с калиброванными отверстиями. Определяют массу каждого сита, записывают диаметр отверстий. Навеску сыпучего вещества массой 10 – 15 г, взвешенную с

точностью до 0,01 г, помещают на верхнюю решетку набора сит, просеивают образец в течение 10 минут. Определяют массы сит с продуктом и рассчитывают массу каждой фракции, средний диаметр частиц преобладающей фракции.

*2.2. Определение насыпной массы.* Мерную колбу (пикнометр) емкостью 25 – 50 см<sup>3</sup> помещают в термостат при 20°C и выдерживают в течение 10 – 15 минут, после чего взвешивают с точностью до 0,01 г. Далее в колбу помещают исследуемое сыпучее вещество до метки и снова помещают в термостат при 20°C на 10 – 15 минут. После термостатирования колбу с исследуемым образцом взвешивают с точностью до 0,01 г. Насыпную массу исследуемого вещества рассчитывают по формуле:

$$M_n = (M_1 - M_2) / V, \quad (1.3)$$

где  $M_1$ ,  $M_2$  – масса колбы с навеской исследуемого вещества и пустой колбы, кг;

$V$  – объем колбы при температуре 20°C, м<sup>3</sup>.

*2.3. Исследование сыпучести сухих видов сырья.* Сыпучесть различных порошкообразных и грубодисперсных веществ можно оценить по скорости их истечения через калиброванное отверстие. Для исследования сыпучести сухих видов сырья навеску массой 10 – 15 г помещают в воронку с диаметром отверстия 10 – 20 мм, предварительно закрыв отверстие воронки. Открывают воронку и фиксируют время истечения навески образца.

**БЛОК 3.** Исследование физико-механических свойств жидких видов сырья проводят по приведенным ниже методикам.

*1.1. Определение плотности ареометрическим методом.* Цилиндр с исследуемой пробой устанавливают на ровной поверхности и измеряют температуру пробы,  $t_1$ . Сухой и чистый ареометр опускают медленно в исследуемую пробу, погружая его до тех пор, пока до предполагаемой отметки ареометрической шкалы не останется 3–4 мм, затем оставляют его в свободно плавающем состоянии. Ареометр не должен касаться стенок цилиндра.

Первый отсчёт показаний плотности  $\rho_1$  проводят визуально со шкалы ареометра через 3 минуты после установления его в неподвижном положении. После этого ареометр осторожно приподнимают на высоту до уровня балласта в нём и снова опускают, оставляя его в свободно плавающем состоянии. После установления его в неподвижном состоянии проводят второй отсчёт показаний плотности  $\rho_2$ . При отсчёте показаний плотности глаз должен находиться на уровне мениска. Отсчёт показаний проводят по верхнему краю мениска. Затем измеряют температуру  $t_2$  пробы.

За среднее значение температуры  $t$  исследуемой пробы принимают среднее арифметическое результатов двух показаний  $t_1$  и  $t_2$ . За среднее значение показаний ареометра при температуре исследуемой пробы молока принимается среднее арифметическое результатов двух показаний  $\rho_1$  и  $\rho_2$ . Если проба во время определения плотности имела температуру выше или ниже 20 °С, то результаты определения плотности при температуре  $t$  должны быть приведены к 20 °С в соответствии со специальными таблицами или расчетными формулами.

### *1.2. Определение кинематической и динамической вязкости жидкостей.*

Определение кинематической вязкости исследуемых жидкостей проводят с помощью лабораторного капиллярного вискозиметра по времени истечения жидкости через калиброванный капилляр прибора. Расчетная формула для определения кинематической вязкости:

$$\nu = (g * T * K) / 9,807, \quad (1.4)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения в месте измерения, м/с<sup>2</sup>;

$T$  – время истечения жидкости, с;

$K$  – постоянная вискозиметра (по паспорту прибора).

Динамическую вязкость жидкости рассчитывают по формуле:

$$\mu = \nu * \rho, \quad (1.5)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости при температуре 20 °С.

*1.3. Исследование влияния температуры на скорость перекачивания жидкости.* В химическом стакане или термостойкой колбе подогревают

200 – 250 см<sup>3</sup> исследуемой жидкости до температур 20 °С, 30 °С, 40 °С, 50 °С.

Жидкость перекачивают лабораторным насосом и отмечают для каждой температуры время перекачивания.

**БЛОК 4.** Результаты исследований заносят в таблицы 1. 1 и 1. 2.

Таблица 1. 1 – Результаты исследований физико-механических свойств сыпучих веществ.

| № бригады | Исследуемое вещество | Средний размер частиц, мм | Насыпная масса, кг/м <sup>3</sup> | Время истечения, с |
|-----------|----------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------|
|           |                      |                           |                                   |                    |

Таблица 1. 2 – Результаты исследований физико-механических свойств жидкостей.

| № бригады | Исследуемое вещество | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Вязкость          |      | Скорость движения, см <sup>3</sup> /с при температуре, °С |    |    |    |
|-----------|----------------------|------------------------------|-------------------|------|-----------------------------------------------------------|----|----|----|
|           |                      |                              | м <sup>2</sup> /с | Па*с | 20                                                        | 30 | 40 | 50 |
|           |                      |                              |                   |      |                                                           |    |    |    |

Сопоставляя данные, полученные бригадами для различных сыпучих материалов, анализируют влияние гранулометрического состава на физико-механические свойства веществ. По результатам опыта строят график зависимости объемной скорости движения жидкости ( $\text{см}^3/\text{с}$ ) от температуры. Анализируют влияние плотности и вязкости, температуры на скорость перекачивания исследованных жидкостей.

### **Содержание отчета и его форма**

Отчет о работе должен содержать:

- титульный лист;
- цель и алгоритм проведения работы;
- теоретическое обоснование;
- классификацию, устройство, принцип действия основных типов транспортеров и насосов;
- описание методик проведения экспериментов;
- результаты исследований;
- выводы.

### **Контрольные вопросы и защита работы**

Контрольные вопросы:

- виды и характеристика сырья, используемого при выработке пищевых продуктов;
- физико-химические показатели сырья и их использование при расчетах различного вида аппаратов и машин;
- классификация, устройство и принцип действия основных типов транспортеров;
- классификация, устройство и принцип действия основных типов насосов, рабочие характеристики насосов;
- методики исследования физико-механических свойств сыпучих материалов и жидких систем.

Защита работы проводится на следующем после ее выполнения лабораторном занятии в форме устного опроса.

## Лабораторная работа № 2

### РАСЧЕТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ ШЕСТЕРЕНЧАТОГО НАСОСА

**Цель и содержание:** Изучить устройство шестеренчатых насосов и составить принципиальную схему их работы. Рассчитать производительность ( $Q$ ) и потребляемую мощность ( $N$ ) насоса. Подобрать электродвигатель по каталогу.

#### Теоретическое обоснование

Насосы относятся к вспомогательному оборудованию пищевых производств. Это машины, предназначенные для создания и поддержания постоянного потока жидкости. Разделяются насосы на два класса: динамические и объемные. В динамических насосах перемещение жидкости происходит за счет динамического взаимодействия между рабочими частями насоса и жидкостью; в объемных насосах - за счет периодического изменения объема камеры при возвратно-поступательном или вращательном движении рабочего органа. Динамические насосы можно разделить на два подкласса - лопастные и трения. Из подкласса лопастных насосов можно выделить следующие группы: центробежные, вихревые, осевые и диагональные. Из подкласса насосов трения наиболее широкое распространение получили струйные и эрлифтные насосы. Класс объемных насосов также можно разделить на два подкласса: роторные насосы и работающие на принципах возвратно-поступательного движения. Роторные насосы разделяются на три группы: шестеренчатые (шестеренные), винтовые и шиберные. К группе возвратно-поступательных насосов относятся: поршневые, плунжерные, диафрагменные, шланговые и пневматические.

Шестеренчатые насосы состоят из двух цилиндрических зубчатых колес с небольшими радиальными торцевыми зазорами, расположенных внутри корпуса. Область всасывания создается там, где зубья выходят из зацепления, а область нагнетания - там, где они входят в зацепление. При изменении

вращения шестерен продукт будет перекачиваться в обратную сторону и нагнетательный патрубок будет всасывающим и наоборот.

Для ориентировочных расчетов теоретической производительности шестеренчатых насосов (в м<sup>3</sup>/с) можно воспользоваться следующей формулой:

$$Q_T = 0,42 * D_n * Z * m * b * n \quad (3.1)$$

где  $D_n$  - диаметр начальной окружности шестерни, м;

$Z$  - число зубьев шестерни;

$m$  - модуль, м;

$b$  - ширина зуба шестерни, м;

$n$  - частота вращения, с<sup>-1</sup>.

Эта формула дает несколько завышенные результаты. Действительная подача насоса будет равна:

$$Q_d = Q_T * \eta \quad (3.2)$$

где  $\eta$  - объемный КПД насоса, равный 0,75-0,85.

Мощность, потребляемая для работы насоса, определяется по формуле:

$$N = \frac{Q \cdot p_n}{3600 \cdot \eta_m} \quad (3.3)$$

где  $Q$  - подача насоса, м<sup>3</sup>/ч;

$p_n$  - давление насоса, Па;

$\eta_m$  - механический КПД насоса, равен 0,8-0,9.

Необходимое избыточное давление (Па) насоса для подъема жидкостей определяют по формуле:

$$p_n = H * \rho_{ж} * g, \quad (3.4)$$

где  $H$  – высота подъема жидкости, м;

$\rho_{ж}$  – плотность жидкости

**Методика и порядок выполнения работы.**

Порядок проведения работы представлен в виде блок-схемы алгоритма на рисунке 3.1.

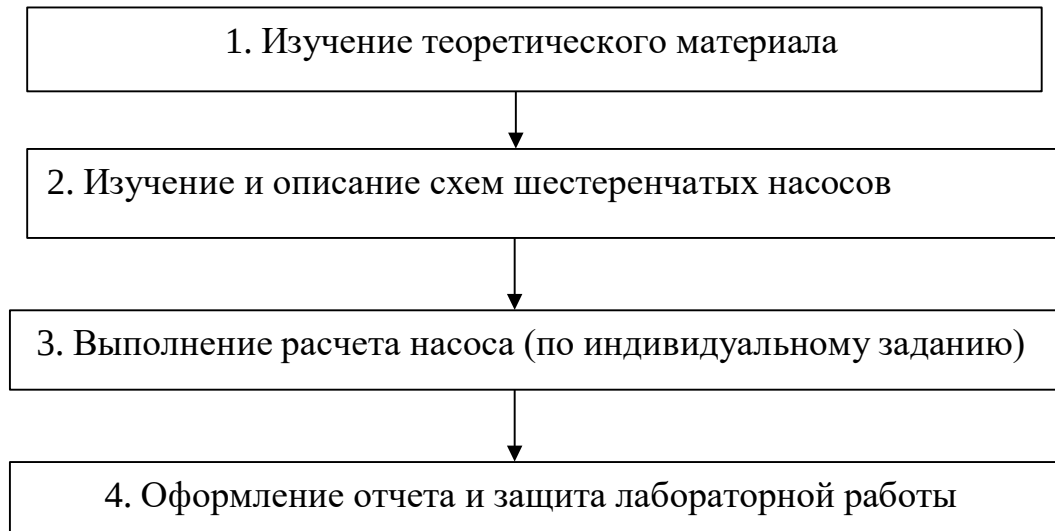


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритма выполнения лабораторной работы

**Пояснения к блокам**

**БЛОК 1.** Теоретический материал изучают по лекциям и рекомендуемым источникам литературы.

**БЛОК 2.** Изучение и описание схем насосов выполняют согласно индивидуальному заданию по учебным пособиям и справочной литературе с составлением схем и обоснованием выбранного типа насоса.

**БЛОК 3.** Расчет насоса выполняют по индивидуальному заданию (таблица 6.1) по приведенному примеру.

**БЛОК 4.** Оформление отчета и защита лабораторной работы.

Индивидуальные задание приведены в таблице 3.1.

**Таблица 3.1 – Индивидуальные задания для расчетов**

| № п/п | Число зубьев шестерни, Z | Модуль зацепления, m, м | Ширина зуба шестерни, b, м | Высота подъема H, м | Частота вращения шестерни n, с <sup>-1</sup> |
|-------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------------------------|
| 1     | 17                       | 0,004                   | 0,012                      | 12,5                | 46,9                                         |
| 2     | 19                       | 0,063                   | 0,016                      | 20,0                | 47,8                                         |
| 3     | 21                       | 0,080                   | 0,014                      | 31,5                | 48,0                                         |
| 4     | 23                       | 0,010                   | 0,020                      | 31,5                | 48,3                                         |
| 5     | 24                       | 0,0125                  | 0,022                      | 31,5                | 48,6                                         |
| 6     | 25                       | 0,004                   | 0,024                      | 20,0                | 48,5                                         |
| 7     | 26                       | 0,063                   | 0,025                      | 12,0                | 46,7                                         |
| 8     | 27                       | 0,080                   | 0,026                      | 20,0                | 47,8                                         |
| 9     | 28                       | 0,010                   | 0,012                      | 4,6                 | 10,0                                         |
| 10    | 29                       | 0,0125                  | 0,016                      | 4,2                 | 12,0                                         |
| 11    | 30                       | 0,063                   | 0,014                      | 3,5                 | 14,0                                         |
| 12    | 31                       | 0,080                   | 0,020                      | 7,9                 | 16,0                                         |
| 13    | 21                       | 0,063                   | 0,012                      | 31,5                | 46,7                                         |
| 14    | 25                       | 0,080                   | 0,014                      | 20,0                | 47,8                                         |
| 15    | 27                       | 0,063                   | 0,025                      | 3,5                 | 14,0                                         |
| 16    | 29                       | 0,0125                  | 0,022                      | 20,0                | 47,8                                         |

**Содержание отчета и его форма:**

1. Наименование и цель работы.
2. Теоретическое обоснование.
3. Описание схем шестеренчатых насосов с обоснованием выбранного для расчета.
4. Заключение и выводы.

**Вопросы для защиты работы:**

- общая классификация насосов для биотехнологической промышленности;
- характеристика и классификация шестеренчатых насосов;
- особенности расчета шестеренчатых насосов;
- расчет мощности и подбор электродвигателя по каталогам.

### Лабораторная работа № 3

#### Расчет производительности и потребляемой мощности винтового насоса

**Цель и содержание:** Изучить устройство винтовых насосов и составить принципиальную схему их работы. Рассчитать производительность ( $Q$ ) и потребляемую мощность ( $N$ ) насоса. Подобрать электродвигатель по каталогу.

#### Теоретическое обоснование

Винтовые насосы относятся к объемным. Жидкость перемещается вдоль оси вращения рабочих органов за счет периодического изменения объема занимаемой ею камеры. Винтовые насосы создают давления, имеют весьма малое перемешивание перекачиваемой жидкости, равномерную подачу и обеспечивают хорошее всасывание.

В молочной промышленности винтовые насосы широко применяются для перекачивания вязких жидкостей, творога, подачи сгущенных продуктов в сушильные башни.

Действительная объемная подача винтового насоса ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) равняется:

$$Q = \frac{4 \cdot e \cdot D \cdot T \cdot n}{60} \cdot \eta_o \quad (4.1)$$

где  $e$  - величина эксцентриситета, м;

$D$  - диаметр сечения винта, м;

$T$  - шаг обоймы, м;

$n$  - частота вращения винта, об/мин;

$\eta_o$  - объемный КПД, учитывающий утечки (для одновинтовых насосов колеблется в пределах 0,65-0,90)

Напор насоса ( м.вод. ст.) рассчитывают по формуле:

$$H = \frac{\Delta p \cdot L}{T \cdot \gamma} \quad (4.2)$$

где  $\Delta p$  -перепад давления по шагам обоймы (для насосов, работающих на давлении до 1 МПа, составляет 15-25 м.вод. ст.), Па ;

$L$  - длина рабочей части обоймы, м;

$\gamma$  - удельный вес перекачиваемого продукта,  $\text{Н}/\text{м}^3$ .

Мощность (кВт) на валу насоса определяют по формуле:

$$N = \frac{Q \cdot H \cdot \gamma}{102 \cdot \eta} \quad (4.3)$$

где  $\eta$  - полный КПД одновинтовых насосов (произведение частных КПД насоса - объемного, гидравлического и механического) находится в пределах 0,1-0,6;

$\gamma$  - удельный вес перекачиваемого продукта, кг/м<sup>3</sup>.

### Методика и порядок выполнения работы.

Порядок проведения работы представлен в виде блок-схемы алгоритма на рисунке 4.1.

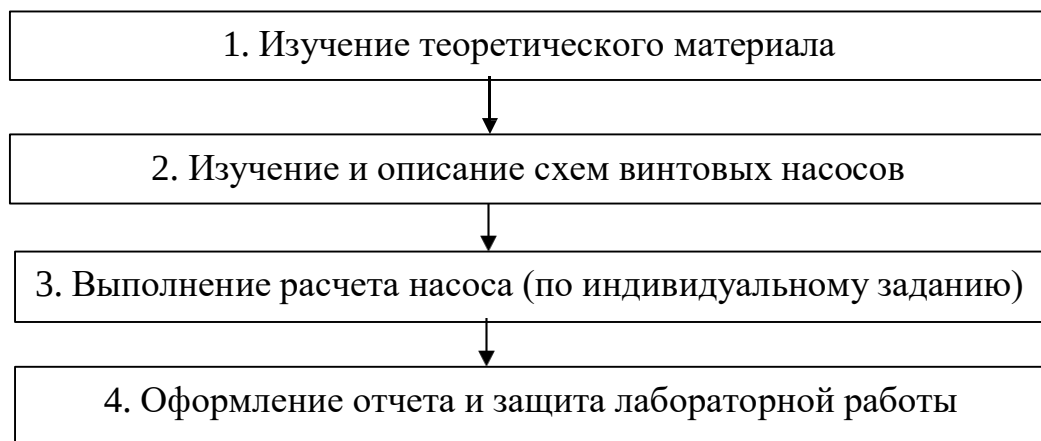


Рисунок 4.1 – Блок-схема алгоритма выполнения лабораторной работы

#### Пояснения к блокам

**БЛОК 1.** Теоретический материал изучают по лекциям и рекомендуемым источникам литературы.

**БЛОК 2.** Изучение и описание схем насосов выполняют согласно индивидуальному заданию по учебным пособиям и справочной литературе с составлением схем и обоснованием выбранного типа насоса.

**БЛОК 3.** Расчет насоса выполняют по индивидуальному заданию.

**БЛОК 4.** Оформление отчета и защита лабораторной работы.

Индивидуальные задание приведены в таблице 4.1.

**Таблица 4.1 – Индивидуальные задания для расчетов**

| №<br>п/п | Эксцентри-<br>ситет, м | Диаметр<br>сечения винта,<br>м | Высота<br>подъема<br>Н, м | Шаг<br>обоймы, м | Частота<br>вращения<br>винта, об/мин |
|----------|------------------------|--------------------------------|---------------------------|------------------|--------------------------------------|
| 1        | 0,008                  | 0,06                           | 12,5                      | 0,10             | 300                                  |
| 2        | 0,010                  | 0,08                           | 20,0                      | 0,12             | 400                                  |
| 3        | 0,012                  | 0,10                           | 31,5                      | 0,14             | 500                                  |
| 4        | 0,014                  | 0,12                           | 31,5                      | 0,16             | 600                                  |
| 5        | 0,016                  | 0,14                           | 31,5                      | 0,18             | 700                                  |
| 6        | 0,018                  | 0,16                           | 20,0                      | 0,20             | 800                                  |
| 7        | 0,008                  | 0,06                           | 12,0                      | 0,10             | 900                                  |
| 8        | 0,010                  | 0,08                           | 20,0                      | 0,12             | 1000                                 |
| 9        | 0,012                  | 0,10                           | 4,6                       | 0,14             | 1100                                 |
| 10       | 0,014                  | 0,12                           | 4,2                       | 0,16             | 1200                                 |
| 11       | 0,016                  | 0,14                           | 3,5                       | 0,18             | 1300                                 |
| 12       | 0,018                  | 0,16                           | 7,9                       | 0,20             | 1400                                 |
| 13       | 0,010                  | 0,10                           | 31,5                      | 0,18             | 700                                  |
| 14       | 0,014                  | 0,12                           | 31,5                      | 0,16             | 1200                                 |
| 15       | 0,018                  | 0,06                           | 12,0                      | 0,10             | 300                                  |
| 16       | 0,016                  | 0,10                           | 4,6                       | 0,16             | 600                                  |

**Содержание отчета и его форма:**

1. Наименование и цель работы.
2. Теоретическое обоснование.
3. Описание схемы насоса с обоснованием выбранного для расчета.
4. Заключение и выводы.

**Вопросы для защиты работы:**

- общая классификация насосов для молочной промышленности;
- характеристика и классификация винтовых насосов;
- особенности расчета винтовых насосов;
- расчет мощности и подбор электродвигателя по каталогам.

## **Лабораторная работа № 4**

### **Исследование свойств неоднородных полидисперсных пищевых систем**

#### **Цель работы**

Изучить основные свойства неоднородных полидисперсных систем (суспензий и эмульсий) на простых примерах, освоить методы оценки их стабильности и скорости разделения фаз без использования сложного оборудования.

#### **Задачи**

Приготовить модельные суспензию и эмульсию.

Оценить скорость осаждения частиц в суспензии.

Исследовать стабильность эмульсии при разных условиях.

Сравнить эффективность разделения фаз при гравитационном осаждении и центрифугировании.

Сделать выводы о влиянии технологических факторов на свойства систем.

#### **Оборудование и материалы**

Оборудование:

мерные цилиндры на 100 мл — 6 шт.;

пробирки — 6 шт.;

секундомер;

термостат или водяная баня;

лабораторная центрифуга;

термометр;

линейка;

пипетки.

#### **Материалы:**

крахмал картофельный — 10 г;

растительное масло — 50 мл;

вода дистиллированная — 500 мл;

яичный желток — 1 шт. (как натуральный эмульгатор);

соль поваренная — 5 г.

#### **Методика выполнения работы**

### Опыт 1. Приготовление и исследование суспензии

Приготовьте суспензию крахмала в воде:

в мерный цилиндр налейте 100 мл воды;

добавьте 1 г крахмала;

тщательно перемешайте.

Наблюдайте за системой в течение 30 минут:

каждые 5 минут измеряйте высоту осадка линейкой;

фиксируйте изменения внешнего вида системы.

Заполните таблицу:

| Время, мин | Высота осадка, мм | Примечания                 |
|------------|-------------------|----------------------------|
| 0          | 0                 | Однородная мутная жидкость |
| 5          | ...               | ...                        |
| 10         | ...               | ...                        |
| 15         | ...               | ...                        |
| 20         | ...               | ...                        |
| 25         | ...               | ...                        |
| 30         | ...               | ...                        |

Постройте график зависимости высоты осадка от времени.

Сделайте вывод о скорости осаждения частиц крахмала.

### Опыт 2. Приготовление и исследование эмульсии

Приготовьте две эмульсии:

Образец 1 (без эмульгатора): 5 мл масла + 45 мл воды, энергично встряхните 1 минуту;

Образец 2 (с эмульгатором): 5 мл масла + 1 ч. л. яичного желтка + 44 мл воды, энергично встряхните 1 минуту.

Разлейте по 20 мл каждой эмульсии в два мерных цилиндра.

Наблюдайте за расслоением в течение 20 минут:

каждые 2 минуты измеряйте высоту слоя масла;

отмечайте появление капель масла в водной фазе.

Заполните таблицу для каждого образца:

| Время,<br>мин | Высота слоя масла, мм<br>(Образец 1) | Высота слоя масла, мм<br>(Образец 2) | Примечания |
|---------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------|
| 0             | 0                                    | 0                                    | ...        |
| 2             | ...                                  | ...                                  | ...        |
| 4             | ...                                  | ...                                  | ...        |
| ...           | ...                                  | ...                                  | ...        |
| 20            | ...                                  | ...                                  | ...        |

Постройте графики зависимости высоты слоя масла от времени для обеих эмульсий.

Сравните стабильность эмульсий с эмульгатором и без него.

### Опыт 3. Влияние температуры на стабильность эмульсии

Разделите Образец 2 из опыта 2 на две части.

Первую часть оставьте при комнатной температуре.

Вторую часть поместите в термостат при 40 °C на 10 минут.

После выдержки наблюдайте за расслоением в течение 10 минут, фиксируя высоту слоя масла каждые 2 минуты.

Заполните таблицу:

| Температура | Время, мин | Высота слоя масла, мм |
|-------------|------------|-----------------------|
| Комнатная   | 0          | 0                     |
|             | 2          | ...                   |
|             | ...        | ...                   |
| 40 °C       | 0          | 0                     |
|             | 2          | ...                   |
|             | ...        | ...                   |

Сделайте вывод о влиянии температуры на стабильность эмульсии.

#### Опыт 4. Сравнение гравитационного осаждения и центрифугирования

Приготовьте 30 мл суспензии крахмала (как в опыте 1).

Разделите суспензию на две равные части:

образец А — оставьте для гравитационного осаждения;

образец Б — поместите в пробирку и центрифугируйте 2 минуты при 3000 об/мин.

Для образца А:

оставьте на 30 минут;

измерьте высоту осадка.

Для образца Б:

сразу после центрифугирования измерьте высоту осадка;

сравните с образцом А.

Рассчитайте эффективность разделения:

$$\eta = \frac{h_{\text{осадка}}}{h_{\text{исходной суспензии}}} \times 100\%,$$

где  $h$  — высота слоя.

6. Заполните таблицу:

| Метод разделения | Время, мин | Высота осадка, мм | Эффективность, % |
|------------------|------------|-------------------|------------------|
| Гравитация       | 30         | ...               | ...              |
| Центрифуга       | 2          | ...               | ...              |

Сделайте вывод об эффективности методов.

#### Обработка результатов

Постройте все графики на миллиметровой бумаге или в Excel.

Сравните скорости осаждения в разных условиях.

Проанализируйте влияние эмульгатора и температуры на стабильность эмульсии.

Оцените, во сколько раз центрифугирование эффективнее гравитационного осаждения.

### **Контрольные вопросы**

Чем суспензия отличается от эмульсии? Приведите по два примера из пищевой промышленности.

Почему частицы крахмала оседают, а не остаются равномерно распределёнными в воде?

Как эмульгатор (яичный желток) влияет на стабильность эмульсии? Объясните механизм.

Почему повышение температуры может снижать стабильность эмульсии?

В чём преимущество центрифугирования перед простым отстаиванием?

Какие пищевые продукты представляют собой суспензии? Эмульсии?

Как можно повысить стабильность суспензии в промышленном производстве?

Какие факторы влияют на скорость расслоения неоднородных систем?

### **Оформление отчёта**

Отчёт должен содержать:

Титульный лист с указанием темы, ФИО студента, группы, даты.

Цель и задачи работы.

Краткое описание методики выполнения опытов.

Заполненные таблицы результатов.

Графики зависимостей (высота осадка/слоя масла от времени).

Расчёты эффективности разделения.

Ответы на контрольные вопросы.

Общие выводы по работе (что изучено, какие закономерности выявлены, практическое значение результатов).

### **Техника безопасности**

Будьте осторожны при работе с стеклянной посудой.

При работе с центрифугой убедитесь, что пробирки сбалансированы.

Не перегревайте образцы выше 40 °С.

После работы уберите рабочее место и вымойте посуду.

## Лабораторная работа №5

### Расчет производительности и потребляемой мощности поршневого насоса

**Цель и содержание:** Изучить устройство поршневых насосов и составить принципиальную схему их работы. Рассчитать производительность ( $Q$ ) и потребляемую мощность ( $N$ ) насоса. Подобрать электродвигатель по каталогу.

#### Теоретическое обоснование

Поршневые и плунжерные насосы относятся к группе возвратно-поступательных насосов. Рабочие органы у таких насосов выполнены в виде поршней или плунжеров. Они могут быть простого или двойного действия. Применяют такие насосы для перекачивания вязких жидкостей и при создании большого давления. Подача плунжерного насоса зависит от числа ходов поршня и его размеров.

Типичным представителем плунжерных насосов в молочной промышленности является гомогенизатор.

Производительность насоса можно рассчитать по формуле:

$$Q = \frac{60 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot S \cdot n}{4} \cdot \eta_o = 47,1 \cdot D^2 \cdot S \cdot n \cdot \eta_o, \quad (5.1)$$

где  $Q$  - подача насоса, м<sup>3</sup>/ч;

$D$  - диаметр поршня, м;

$S$  - ход поршня, м;

$n$  - число двойных ходов поршня (или число оборотов кривошипа в минуту);

$\eta_o$  - объемный КПД, примерно равен 0,7-0,9.

Производительность насоса двустороннего действия определяют по формуле:

$$Q = 47,1 \cdot (2D^2 - d^2) \cdot S \cdot n \cdot \eta_o \quad (5.2)$$

где  $d$  - диаметр штока, м.

Мощность, потребляемая для работы насоса, определяется по формуле:

$$N = \frac{Q \cdot p_n}{3600 \cdot \eta_m} \quad (5.3)$$

где  $Q$  - подача насоса, м<sup>3</sup>/ч;

$p_n$  - давление насоса, Па;

$\eta_m$  - механический КПД насоса, равен 0,8-0,9.

### **Методика и порядок выполнения работы.**

Порядок проведения работы представлен в виде блок-схемы алгоритма на рисунке 5.1.

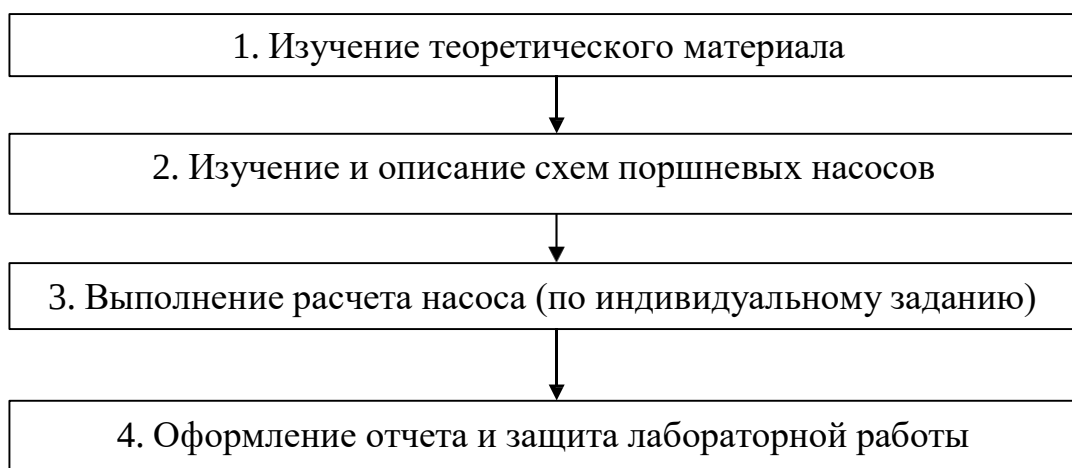


Рисунок 5.1 – Блок-схема алгоритма выполнения лабораторной работы

#### **Пояснения к блокам**

**БЛОК 1.** Теоретический материал изучают по лекциям и рекомендуемым источникам литературы.

**БЛОК 2.** Изучение и описание схем насосов выполняют согласно индивидуальному заданию по учебным пособиям и справочной литературе с составлением схем и обоснованием выбранного типа насоса.

**БЛОК 3.** Расчет насоса выполняют по индивидуальному заданию.

**БЛОК 4.** Оформление отчета и защита лабораторной работы.

Индивидуальные задание приведены в таблице 5.1.

**Таблица 5.1 – Индивидуальные задания для расчетов**

| № п/п | Диаметр поршня, м | Ход поршня, м | Высота подъема Н, м | Диаметр штока, м | Частота вращения кривошипа, об/мин |
|-------|-------------------|---------------|---------------------|------------------|------------------------------------|
| 1     | 0,10              | 0,16          | 12,5                | 0,025            | 300                                |
| 2     | 0,12              | 0,20          | 20,0                | 0,030            | 400                                |
| 3     | 0,14              | 0,25          | 31,5                | 0,035            | 500                                |
| 4     | 0,16              | 0,30          | 31,5                | 0,040            | 600                                |
| 5     | 0,20              | 0,35          | 31,5                | 0,050            | 700                                |
| 6     | 0,24              | 0,40          | 20,0                | 0,060            | 800                                |
| 7     | 0,10              | 0,16          | 12,0                | 0,025            | 900                                |
| 8     | 0,12              | 0,20          | 20,0                | 0,030            | 1000                               |
| 9     | 0,14              | 0,25          | 4,6                 | 0,035            | 1100                               |
| 10    | 0,16              | 0,30          | 4,2                 | 0,040            | 1200                               |
| 11    | 0,20              | 0,35          | 3,5                 | 0,050            | 1300                               |
| 12    | 0,24              | 0,40          | 7,9                 | 0,060            | 1400                               |
| 13    | 0,12              | 0,20          | 12,0                | 0,025            | 900                                |
| 14    | 0,10              | 0,16          | 31,5                | 0,035            | 1100                               |
| 15    | 0,16              | 0,30          | 4,2                 | 0,040            | 800                                |
| 16    | 0,20              | 0,35          | 20,0                | 0,060            | 1400                               |

**Содержание отчета и его форма:**

1. Наименование и цель работы.
2. Теоретическое обоснование.
3. Описание схемы насоса с обоснованием выбранного для расчета.
4. Заключение и выводы.

**Вопросы для защиты работы:**

- общая классификация насосов для молочной промышленности;
- характеристика и классификация поршневых (плунжерных) насосов;
- особенности расчета поршневых насосов;
- расчет мощности и подбор электродвигателя по каталогам

## Лабораторная работа 6

### Изучение ультрафильтрации биологических жидкостей

**Цель и содержание работы:** познакомиться с процессом разделения биологических объектов мембранными методами; изучить свойства существующих мембран и их характеристики; познакомиться с основными типами ультрафильтрационных установок; провести исследование ультрафильтрационного разделения обезжиренного молока; исследовать факторы, влияющие на процесс ультрафильтрации; оценить результаты экспериментальных исследований.

#### Теоретическое обоснование

Мембранная технология нашла широкое применение при переработке сельскохозяйственного сырья растительного и животного происхождения. В микробиологической промышленности она широко используется для концентрации субстратов, разделения растворов и суспензий, стерильной фильтрации при выработке различных продуктов и препаратов микробного синтеза. По сравнению с другими альтернативными процессами, используемыми для этих целей, она менее энергоемка, экологична, для размещения оборудования требуются меньшие производственные площади. В будущем, по мере разработки новых материалов для мембран, использование мембранной технологии значительно расширится.

Ультрафильтрация относится к мембранной технике разделения многокомпонентных систем, в том числе и биологических. Она нашла широкое применение в различных отраслях промышленности, как в нашей стране, так и за рубежом. Процесс разделения полидисперсных систем основан на молекулярной фильтрации через полупроницаемые мембраны с размером пор 10 – 100 нм, при которой под действием градиента давления происходит фракционирование компонентов раствора по величине и структуре их молекул.

Рассмотрим процесс ультрафильтрации биологических жидкостей схематично на примере обезжиренного молока. Пусть какая-то емкость

разделена полупроницаемой мембраной на две части. Полупроницаемые ультрафильтрационные мембраны имеют размер пор от 10 до 100 нм и способны удерживать вещества с молекулярной массой  $10^4$  и выше.

Основными компонентами обезжиренного молока являются остатки молочного жира (в виде жировых шариков), казеин (мицеллы), сывороточные белки (молекулы различных размеров), лактоза, пептиды, минеральные вещества. Данные об основных компонентах обезжиренного молока приведены в таблице 7. 1.

Таблица 7. 1 – Характеристика основных компонентов обезжиренного молока.

| Наименование компонента | Размер частиц, нм | Дисперсное состояние и форма частиц      |
|-------------------------|-------------------|------------------------------------------|
| Молочный жир            | 2000 – 5000       | Эмульсия, жировые шарики                 |
| Казеин                  | 100 – 200         | Коллоидный раствор, шарообразные мицеллы |
| Сывороточные белки      | 15 – 50           | Коллоидный раствор, глобулы              |
| Лактоза                 | 1,5               | Истинный раствор                         |
| Минеральные соли        | 0,2 – 2,0         | Истинный раствор                         |

В одну часть емкости поместим обезжиренное молоко и создадим давление. Начнется процесс ультрафильтрации. Движущей силой ультрафильтрационного процесса является разность создаваемого избыточного давления и осмотического давления жидкости. Сквозь мембрану в процессе фильтрации будут проходить: растворитель (вода), а также компоненты, размер молекул которых меньше, чем диаметр пор мембраны – лактоза, минеральные вещества, небелковые азотистые соединения, некоторые фракции сывороточных белков. Таким образом, при обработке обезжиренного молока происходит селективное концентрирование только высокомолекулярных соединений (белки, липиды), а основная часть низкомолекулярных компонентов переходит в фильтрат.

По мнению многих исследователей, механизм переноса вещества через полупроницаемую мембрану описывается капиллярной диффузией и аналогичен механизму процесса микрофильтрации.

Основные характеристики ультрафильтрационного процесса определяются селективностью и проницаемостью применяемых мембран. Под селективностью мембраны понимается её способность иметь различную проницаемость по различным компонентам разделяемой системы. При ультрафильтрации обезжиренного молока обычно учитывается селективность мембран по белку, лактозе и жиру. Селективность мембран определяют по формуле:

$$S = (1 - C_2 / C_1) * 100, \quad (7.1)$$

где:  $C_1$  – концентрация компонента в исходном сырье;

$C_2$  – концентрация компонента в ультрафильтрате.

Таким образом, селективность мембраны зависит, главным образом, от размера её пор.

Проницаемость мембраны – способность пропускать в процессе фильтрации ионы того или иного вещества. Характеризуются мембраны обычно удельной проницаемостью по фильтрату. Определяется она количеством раствора, прошедшим через единицу поверхности мембраны в единицу времени,  $\text{м}^3 / (\text{м}^2 * \text{ч})$ :

$$J = M / (S * t), \quad (7.2)$$

где  $M$  – объем фильтрата, получаемый за определенный промежуток времени,  $\text{м}^3$ ;

$S$  – суммарная рабочая поверхность мембран,  $\text{м}^2$ ;

$t$  – продолжительность обработки, ч.

Проницаемость зависит как от свойства мембран (размера пор и их числа), так и от параметров процесса – давления и вязкости фильтруемой жидкости. Вязкость обрабатываемого сырья зависит от его температуры. Таким образом, скорость процесса ультрафильтрации можно регулировать путем изменения температуры и давления. При обработке молочного сырья рекомендуется применять следующие режимы: температура – не выше 50 – 55 °С и давление – 0,3 – 0,4 МПа. При более высоких температурах может произойти изменение свойств компонентов молока. Это нежелательно, так как

ультрафильтрация – один из немногих процессов, позволяющих осуществить фракционирование молочного сырья без изменения его нативных свойств.

Использование высоких давлений при ультрафильтрации не рекомендуется по двум причинам: может произойти разрушение мембран или явление концентрационной поляризации. В процессе ультрафильтрации молочного сырья на поверхности мембраны образуется так называемый «гелевый слой». Он состоит главным образом из высокомолекулярных компонентов в комплексе с минеральными веществами. Происходит взаимодействие этого слоя с мембраной, что приводит к частичной или полной закупорке её пор, снижая производительность ультрафильтрационного процесса. Это явление и получило название концентрационной поляризации.

Увеличение давления приводит к уплотнению гелевого слоя, в результате чего проницаемость мембраны может резко снижаться. Концентрационная поляризация – явление крайне нежелательное. Для борьбы с ним предложены различные меры: введение турбулизаторов потока, изменение гидродинамических условий процесса за счет увеличения скорости потока жидкости над мембраной, изменение конструктивных решений ультрафильтрационных установок, создание протеиноотталкивающих мембран и др.

По окончании рабочего цикла ультрафильтрационных установок проводится их мойка и регенерация мембран. Для мойки используют специально подготовленную умягченную воду, ферментные препараты, а также растворы кислот и щелочей. Мойку осуществляют по специально разработанным схемам. Схема мойки зависит от типа применяемых мембран.

Основными требованиями к полупроницаемым мембранам при ультрафильтрации молочного сырья являются: нетоксичность, высокая проницаемость, высокая селективность по белку и жиру и малая – по лактозе, высокая механическая прочность, а также термоустойчивость и микробиологическая стойкость.

В настоящее время создано уже три поколения ультрафильтрационных мембран. Мембраны первого поколения изготавливают из растворов ацетатцеллюлозы. Их представителями являются мембраны типа УАМ. Они обладают хорошими селективными свойствами и просты в изготовлении. Недостаток этих мембран: не могут работать в кислой и сильно щелочной среде, а также при температурах выше 55 °С. Мойку таких мембран проводят только растворами ферментов, что сложно и дорого.

Мембраны второго поколения созданы на основе синтетических полимерных материалов (полисульфона, полиамида и др.). Типичными представителями являются мембраны типа УПМ-П. Селективность по белку у них выше, чем у УАМ. Они могут работать при температурах от 0 до 100 °С и рН от 1 до 12, обладают высокой механической прочностью, а для мойки можно использовать синтетические моющие средства.

Объединенным институтом ядерных исследований разработаны ядерные фильтры с различным диаметром пор. Получают их путем облучения тонких полимерных пленок заряженными частицами. Преимущества таких мембран - высокие прочностные свойства, широкий диапазон рН (1 – 14) и температуры (0 – 100 °С), а также отсутствие допустимых и критических давлений.

Представители третьего поколения - минеральные мембраны. Они представляют собой углеродные трубки с нанесенным фильтрующим слоем оксида циркония. Выпускают мембраны с различным размером пор. Они устойчивы к температурам до 300 °С и рН до 14.

Перспективными для ультрафильтрации биологических объектов являются мембраны в виде полых волокон и трубчатые ультрафильтры. Для осуществления процессов ультрафильтрации применяют четыре типа аппаратов, отличающихся формой фильтрующей поверхности:

- с трубчатыми фильтрующими элементами, имеющие цилиндрические мембраны, расположенные внутри или сверху поддерживающих труб;
- рулонные, образованные путем намотки мембраны вокруг трубы;

- с плоскими фильтрующими элементами, которые образованы из плоских мембран и по своей конструкции аналогичны фильтр-прессу;
- с полыми волокнами, в которых мембраны образованы из трубок капиллярного сечения.

Выбирают ультрафильтрационные установки с учетом свойств обрабатываемого сырья и поставленными задачами. Для обработки биологических жидкостей типа обезжиренного молока разработаны ультрафильтрационные установки типа фильтр-пресс:

- А1-ОУС – для сыворотки производительностью 5000 л/ч;
- А1-ОУП – для сыворотки производительностью 2000 л/ч;
- А1-ОУВ – для молока производительностью 2000 л/ч;
- GEА - для молока и сыворотки производительностью 15000 л/ч

**Аппаратура и материалы:** лабораторная ультрафильтрационная установка, рефрактометр, титровальная установка, баня водяная, термометры; раствор гидроксида натрия 0,1 н., 40 %-й раствор формалина, 1 %-й спиртовой раствор фенолфталеина, цилиндры на 100 – 500 см<sup>3</sup>, пипетки на 10 см<sup>3</sup>, прибор для отмеривания раствора формалина на 1 см<sup>3</sup>.

#### **Указания по технике безопасности**

При выполнении исследований следует соблюдать общие правила техники безопасности, рассмотренные в методических указаниях к выполнению лабораторной работы 1. Особенное внимание следует уделить правилам работы с растворами щелочей и формалина. Перед началом работы с лабораторной ультрафильтрационной установкой ознакомиться с правилами ее эксплуатации. Категорически запрещается обирать образцы проб для анализов при работе установки. Перед отбором проб следует обесточить установку. Работу с установкой осуществлять только под контролем преподавателя или лаборанта!

## Методика и порядок выполнения работы

Порядок выполнения работы приведен на рисунке 7. 1.



Рисунок 7.1. Блок-схема алгоритма выполнения работы «Ультраfiltrация биологических жидкостей».

Пояснения к блок-схеме.

**БЛОК 1.** По литературным источникам изучить устройство ультраfiltrационных установок (фильтр-пресс; трубчатая; рулонная; с полыми волокнами). Выполнить принципиальные схемы перечисленных типов ультраfiltrационных установок.

Изучить устройство лабораторной ультраfiltrационной установки, вычертить схему; привести описание работы.

**БЛОК 2.** Подгруппа разбивается на 3 – 4 бригады. Порядок выполнения работы.

1. В исходном молочном сырье (обезжиренном молоке или молочной сыворотке) определяют следующие показатели:

- массовую долю сухих веществ рефрактометрическим методом;
- массовую долю белка методом формольного титрования;
- титруемую кислотность.

2. Образцы молочного сырья объемом 1 дм<sup>3</sup> нагревают до температуры 20, 30, 40, 50 °С (по заданию преподавателя) и обрабатывают на

ультрафильтрационной установке в течение 20 – 30 минут. В процессе работы с интервалом в 3 – 5 минут измеряют объем выделившегося фильтрата и отбирают образцы фильтрата объемом 15 – 20 см<sup>3</sup> для определения массовой доли сухих веществ и титруемой кислотности.

3. По завершении процесса ультрафильтрации измеряют суммарный объем выделившегося фильтрата и концентрата, массовую долю сухих веществ и белка в концентрате.

4. Проводят ополаскивание и мойку ультрафильтрационной установки.

**БЛОК 3.** Для каждой контрольной точки рассчитать по формулам (1.1) и (1.2) селективность (по сухим веществам) и проницаемость мембран. Для оценки влияния технологических факторов на процесс ультрафильтрации рассчитывают степень перехода сухих веществ и белка в концентрат. Результаты исследований и расчетов заносят в таблицы 7.1. и 7.2.

Таблица 7.1 – Результаты исследований процесса ультрафильтрации.

| Показатели                                                 | Номера образцов |  |  |  |  |
|------------------------------------------------------------|-----------------|--|--|--|--|
| Температура сырья, °С                                      |                 |  |  |  |  |
| Продолжительность обработки, мин                           |                 |  |  |  |  |
| Массовая доля сухих веществ в фильтрате, %                 |                 |  |  |  |  |
| Объем фильтрата, м <sup>3</sup>                            |                 |  |  |  |  |
| Селективность мембран по СВ, %                             |                 |  |  |  |  |
| Проницаемость мембран, м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·ч) |                 |  |  |  |  |

Таблица 7.2 – Анализ эффективности процесса ультрафильтрации.

| Показатели                                                                                | Температура сырья, °С |    |    |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|----|----|----|
|                                                                                           | 20                    | 30 | 40 | 50 |
| Массовая доля сухих веществ, %:                                                           |                       |    |    |    |
| - в исходном сырье;                                                                       |                       |    |    |    |
| - в фильтрате;                                                                            |                       |    |    |    |
| - в концентрате                                                                           |                       |    |    |    |
| Массовая доля белка, %:                                                                   |                       |    |    |    |
| - в исходном сырье;                                                                       |                       |    |    |    |
| - в фильтрате;                                                                            |                       |    |    |    |
| - в концентрате                                                                           |                       |    |    |    |
| Селективность мембран по СВ, %<br>(по завершении фильтрации)                              |                       |    |    |    |
| Проницаемость мембран, м <sup>3</sup> / (м <sup>2</sup> ·ч)<br>(по завершении фильтрации) |                       |    |    |    |
| Степень перехода в концентрат:                                                            |                       |    |    |    |
| - сухих веществ;                                                                          |                       |    |    |    |
| - белка                                                                                   |                       |    |    |    |

**БЛОК 4.** По экспериментальным данным и результатам расчетов построить графики зависимостей:

- массовой доли сухих веществ от продолжительности фильтрации;

- селективности мембран по сухим веществам от продолжительности фильтрации;
- проницаемости мембран от продолжительности фильтрации;
- селективности мембран по сухим веществам от температуры фильтрации;
- проницаемости мембран от температуры фильтрации;
- степени перехода белка и сухих веществ в концентрат от температуры фильтрации.

### **Содержание отчета и его форма**

Отчет о выполнении работы должен содержать:

- титульный лист;
- цель и алгоритм выполнения работы;
- теоретическое обоснование проводимых исследований;
- схемы и описание устройства изученных типов ультрафильтрационных установок;
- методику проведения экспериментальных исследований;
- результаты исследований, графические зависимости;
- выводы.

### **Контрольные вопросы и защита работы:**

- применение метода мембранной фильтрации в биотехнологии и технологии пищевых производств;
- классификация процессов мембранной фильтрации;
- типы полупроницаемых мембран;
- конструкции промышленных аппаратов для ультрафильтрации биологических жидкостей;
- устройство и принцип действия лабораторной ультрафильтрационной установки;
- показатели, характеризующие эффективность процесса ультрафильтрации;
- влияние технологических факторов на эффективность процесса ультрафильтрации молочного сырья.

Защита работы проводится на следующем после ее выполнения лабораторном занятии в форме устного опроса.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

### РАСЧЕТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

**Цель и содержание:** Изучить устройство центробежных насосов и составить принципиальную схему их работы; рассчитать диаметр рабочего колеса для типового насоса; рассчитать изменение полного напора ( $H$ ) или высоту подачи жидкости и производительности ( $M$ ) насоса в зависимости от изменения частоты вращения рабочего колеса; изобразить полученные зависимости графически и оценить полученные результаты; рассчитать потребляемую мощность типовым насосом при изменении частоты вращения рабочего колеса; рассчитать зависимость между полным напором, создаваемым насосом, и его производительностью при постоянном числе оборотов рабочего колеса; рассчитать коэффициенты быстроходности для типового насоса при изменении частоты вращения рабочего колеса и оценить полученные результаты.

#### **Теоретическое обоснование**

Насосы относятся к вспомогательному оборудованию пищевых производств. Это машины, предназначенные для создания и поддержания постоянного потока жидкости. Разделяются насосы на два класса: динамические и объемные. В динамических насосах перемещение жидкости происходит за счет динамического взаимодействия между рабочими частями насоса и жидкостью; в объемных насосах - за счет периодического изменения объема камеры при возвратно-поступательном или вращательном движении рабочего органа. Динамические насосы можно разделить на два подкласса - лопастные и трения. Из подкласса лопастных насосов можно выделить следующие группы: центробежные, вихревые, осевые и диагональные. Из подкласса насосов трения наиболее широкое распространение получили струйные и эрлифтные насосы. Класс объемных насосов также можно разделить на два подкласса: роторные насосы и работающие на принципах возвратно-поступательного движения. Роторные насосы разделяются на три

группы: шестеренчатые (шестеренные), винтовые и шибберные. К группе возвратно-поступательных насосов относятся: поршневые, плунжерные, диафрагменные, шланговые и пневматические.

**Центробежные насосы** нашли наиболее широкое применение в народном хозяйстве. Они используются для перекачивания маловязких жидкостей с температурой до 100 °С. Рабочее колесо - основной орган насосов этого типа. Рабочее колесо расположено в корпусе насоса, который имеет патрубки для подвода и отвода жидкости. Преимущества центробежных насосов: возможность непосредственного соединения с быстроходным электродвигателем, равномерность потока, малые габариты и масса. К недостаткам насосов следует отнести: низкий КПД при малой подаче и большом напоре, понижение КПД при перекачивании вязких жидкостей.

Полный напор ( $H$ ), создаваемый рабочим колесом, можно рассчитать по формуле:

$$H = \frac{v_o^2}{g} = \frac{\pi^2 \cdot n^2 \cdot D^2}{g} \quad (2.1)$$

где  $v_o$  - окружная скорость рабочего колеса, м/с;

$g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$n$  - частота вращения рабочего колеса, 1/с;

$D$  - диаметр рабочего колеса, м.

Мощность, потребляемую насосом, рассчитывают по формуле:

$$N = \frac{M \cdot H \cdot \rho_{ж}}{100 \cdot \eta} \quad (2.2)$$

где  $M$  - производительность насоса, м<sup>3</sup>/с;

$\eta$  - КПД центробежного насоса ( $\eta = 0,2 - 0,4$ );

$\rho_{ж}$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Взаимосвязь между частотой вращения рабочего колеса, производительностью, напором и мощностью, потребляемой насосом, можно выразить следующими уравнениями:

$$\frac{n}{n_2} = \frac{M}{M_2}; \quad \frac{n}{n_2} = \frac{H}{H_2}; \quad \frac{n}{n_2} = \frac{N}{N_2} \quad (2.3)$$

где  $n_1$ ,  $n_2$  - соответственно паспортная и измененная частота вращения рабочего колеса насоса;

$H_1$ ,  $M_1$ ,  $N_1$  - соответственно напор, производительность и потребляемая мощность при паспортном числе оборотов;

$H_2$ ,  $M_2$ ,  $N_2$  - соответственно напор, производительность и потребляемая мощность при измененном числе оборотов.

Коэффициент быстроходности насоса рассчитывают по формуле:

$$N_6 = 3,65 * n * M^{0,5} / H^{0,75} \quad (2.4)$$

### **Методика и порядок выполнения работы.**

Порядок проведения работы представлен в виде блок-схемы алгоритма на рисунке 2.1.

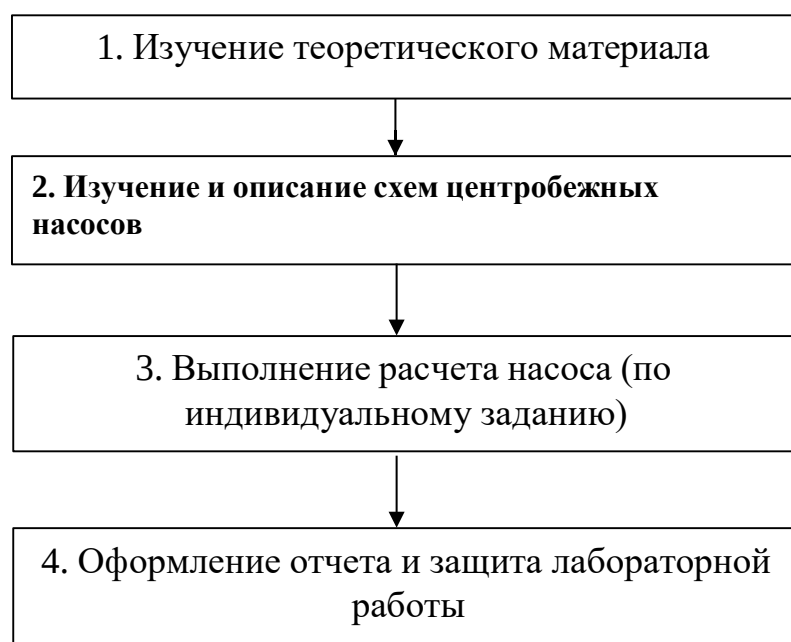


Рисунок 2.1 – Блок-схема алгоритма выполнения лабораторной работы

## Пояснения к блокам

**БЛОК 1.** Теоретический материал изучают по лекциям и рекомендуемым источникам литературы.

**БЛОК 2.** Изучение и описание схем насосов выполняют согласно индивидуальному заданию по учебным пособиям и справочной литературе с составлением схем и обоснованием выбранного типа насоса.

**БЛОК 3.** Расчет насоса выполняют по индивидуальному заданию (таблица 5.1) по приведенному примеру.

**БЛОК 4.** Оформление отчета и защита лабораторной работы.

Индивидуальные задание приведены в таблице 2.1.

**Таблица 2.1 – Индивидуальные задания для расчетов**

| № п/п | Типоразмер электронасоса (по ГОСТ 3347-75) | Подача, м <sup>3</sup> /ч | Напор, м | Частота вращения раб колеса, с <sup>-1</sup> | Мощность элетродви-гателя, кВт |
|-------|--------------------------------------------|---------------------------|----------|----------------------------------------------|--------------------------------|
| 1     | Г2-ОПА (36-1Ц1, 8-12)                      | 6,3                       | 12,5     | 46,9                                         | 0,8                            |
| 2     | Г2-ОПБ (36-1Ц2, 8-20)                      | 10,0                      | 20,0     | 47,8                                         | 1,5                            |
| 3     | Г2-ОПВ (36-1Ц2, 8-31)                      | 10,0                      | 31,5     | 48,0                                         | 3,0                            |
| 4     | 50МЦ25-31 (50-1Ц7, 1-31)                   | 25,0                      | 31,5     | 48,3                                         | 5,5                            |
| 5     | 75МЦ50-31 (75-1Ц14,0-31)                   | 50,0                      | 31,5     | 48,6                                         | 10,0                           |
| 6     | Г2-ОПД (50-3Ц7, 1-20)                      | 25,0                      | 20,0     | 48,5                                         | 5,5                            |
| 7     | 36 МЦ 6-12                                 | 6,0                       | 12,0     | 46,7                                         | 0,6                            |
| 8     | 36 МЦ 10-20                                | 10,0                      | 20,0     | 47,8                                         | 1,5                            |
| 9     | О-85-800Г                                  | 600,0                     | 4,6      | 13,0                                         | 17,0                           |
| 10    | О-85-800Г                                  | 800,0                     | 4,2      | 13,0                                         | 17,0                           |
| 11    | О-85-800Г                                  | 900,0                     | 3,5      | 13,0                                         | 17,0                           |
| 12    | О-85-1100Г                                 | 900,0                     | 7,9      | 16,0                                         | 30,0                           |
| 13    | Г2-ОПГ                                     | 12,5                      | 3,0      | 15,5                                         | 1,1                            |
| 14    | Е8-36МЦС13-10                              | 13,0                      | 10,0     | 48,0                                         | 1,1                            |
| 15    | Г2-ОПЕ                                     | 25,0                      | 3,0      | 15,5                                         | 2,2                            |
| 16    | РЗ-ОНС                                     | 12,0                      | 2,0      | 7,75                                         | 1,1                            |

### Порядок выполнения задания

1. Приводится краткая характеристика центробежных насосов, их устройство и принцип работы.

2. Рассчитывается диаметр рабочего колеса типового центробежного насоса согласно индивидуальному заданию. Для этого можно использовать формулу (5.1) для определения полного напора насоса.

3. Рассчитать изменение полного напора насоса при изменении частоты вращения рабочего колеса в сторону уменьшения для быстроходных насосов или увеличения для тихоходных насосов с шагом  $6 \text{ с}^{-1}$ . При расчетах использовать формулу (5.1).

4. Рассчитать изменение производительности насоса при изменении частоты вращения рабочего колеса по данным п. 3. При расчетах можно воспользоваться зависимостью закона пропорциональности (формула 5.3).

5. Изобразить графически полученные зависимости и оценить полученные результаты.

6. Рассчитать мощность, потребляемую насосом, при изменении его производительности (п. 4), зависимость изобразить графически и оценить полученные результаты. Потребляемую мощность можно рассчитать по формуле (5.2).

7. Рассчитать коэффициенты быстроходности насоса при изменении частоты вращения рабочего колеса (п. 3, 4). Для расчетов можно воспользоваться формулой (5.4).

В зависимости от коэффициента быстроходности насосы делят на три группы: тихоходные ( $n_6 = 40 - 80$ ), нормальные ( $n_6 = 80 - 140$ ), быстроходные ( $n_6 = 140 - 300$ ). Увеличение коэффициента быстроходности ведет к уменьшению отношения  $D_2/D_1$ , где  $D_2$  - наружный диаметр лопастного колеса,  $D_1$  - наибольший диаметр отверстия входа потока жидкости в лопастное колесо. Для тихоходных насосов это соотношение должно составлять, ориентировочно, 21,5; для нормальных - 2,0, а для быстроходных - 1,8-1,4.

Анализ формулы расчета коэффициента быстроходности позволяет сделать следующие выводы:

- увеличение подачи жидкости и уменьшение полного напора ведут к увеличению коэффициента быстроходности и наоборот; насосы с одинаковой

производительностью и напором, но имеющие разные коэффициенты быстроходности имеют разные размеры: размер насосов с большим коэффициентом быстроходности меньше;

- при одинаковой скорости вращения рабочего колеса и одинаковой производительности насосы с большим коэффициентом быстроходности будут работать при меньших напорах; при одинаковых скоростях вращения рабочего колеса и одинаковых напорах насосы с большим коэффициентом быстроходности будут давать большую подачу.

8. Рассчитать зависимость и изобразить её графически между полным напором и производительностью насоса при постоянном вращении рабочего колеса. Для расчетов можно воспользоваться формулой (5.4). Дать анализ полученным результатам.

### Пример выполнения расчетов

#### Исходные данные для расчетов:

Типоразмер насоса - Г2 - ОПБ: подача -  $10 \text{ м}^3 / \text{ч}$ ; напор - 31,5 м; частота вращения рабочего колеса -  $48 \text{ с}^{-1}$ ; мощность электродвигателя - 3,0 кВт.

1. Рассчитываем диаметр рабочего колеса, используя формулу (5.1):

$$D = \sqrt{\frac{31,5 \cdot 9,8}{(3,14 \cdot 48)^2}} = 0,12 \text{ м}$$

2. Задаемся значениями частоты вращения рабочего колеса:  $n_2 = 42 \text{ с}^{-1}$ ;  $n_3 = 36 \text{ с}^{-1}$ ;  $n_4 = 30 \text{ с}^{-1}$ ;  $n_5 = 24 \text{ с}^{-1}$ . Рассчитываем изменение полного напора, производительности и потребляемой мощности, используя зависимости (5.3), например:

$$\begin{aligned} H_2 &= H_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 = 31,5 \cdot \left(\frac{42}{48}\right)^2 = 24,1 \text{ м}; \\ M_2 &= M_1 \cdot \frac{n_2}{n_1} = 10 \cdot \frac{42}{48} = 8,75 \text{ м}^3 / \text{ч}; \\ N_2 &= N_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 = 3 \cdot \left(\frac{42}{48}\right)^3 = 2,01 \text{ кВт}; \end{aligned}$$

Результаты расчетов сводим в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты расчетов

| Частота вращения, $n, \text{с}^{-1}$ . | Полный напор, $H, \text{м}$ | Производительность, $M, \text{м}^3 / \text{ч}$ | Потребляемая мощность, $N, \text{кВт}$ |
|----------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 48                                     | 31,5                        | 10,0                                           | 3,00                                   |
| 42                                     | 24,1                        | 8,75                                           | 2,01                                   |
| 36                                     | 17,7                        | 7,50                                           | 1,27                                   |
| 30                                     | 12,3                        | 6,25                                           | 0,73                                   |
| 24                                     | 7,9                         | 5,00                                           | 0,38                                   |

3. Рассчитываем коэффициент быстроходности по формуле (5.4):

$$n_{\#1} = \frac{3,65 \cdot 48 \cdot \sqrt{10}}{\sqrt[4]{31,5^3}} = 41,67;$$

$$n_{\#2} = \frac{3,65 \cdot 42 \cdot \sqrt{8,75}}{\sqrt[4]{24,1^3}} = 41,69 ;$$

$$n_{\#3} = \frac{3,65 \cdot 36 \cdot \sqrt{7,5}}{\sqrt[4]{17,7^3}} = 41,70 ;$$

$$n_{\#4} = \frac{3,65 \cdot 30 \cdot \sqrt{6,25}}{\sqrt[4]{12,3^3}} = 41,68 ;$$

$$n_{\#5} = \frac{3,65 \cdot 24 \cdot \sqrt{5}}{\sqrt[4]{7,9^3}} = 41,57 .$$

4. Рассчитываем зависимость между полным напором и производительностью насоса при постоянном вращении рабочего колеса ( $n = 48 \text{ с}^{-1}$ ) и коэффициенте быстроходности  $n_6 = 41,7$ , используя формулу (5.4):

$$M_1 = \left( \frac{41,7 \cdot \sqrt[4]{31,5^3}}{48 \cdot 3,65} \right)^2 = 10,02 \text{ м}^3 / \text{с} ;$$

$$M_2 = \left( \frac{41,7 \cdot \sqrt[4]{24,1^3}}{48 \cdot 3,65} \right)^2 = 6,7 \text{ м}^3 / \text{с} ;$$

$$M_3 = \left( \frac{41,7 \cdot \sqrt[4]{17,7^3}}{48 \cdot 3,65} \right)^2 = 4,2 \text{ м}^3 / \text{с} ;$$

$$M_4 = \left( \frac{41,7 \cdot \sqrt[4]{12,3^3}}{48 \cdot 3,65} \right)^2 = 2,4 \text{ м}^3 / \text{с} ;$$

$$M_5 = \left( \frac{41,7 \cdot \sqrt[4]{7,9^3}}{48 \cdot 3,65} \right)^2 = 1,3 \text{ м}^3 / \text{с} .$$

## **Лабораторная работа 8**

### **Изучение технологического процесса**

#### **электроmemбранной обработки биологического сырья**

**Цель и содержание работы:** познакомиться с процессом обессоливания биологических объектов методом электродиализа; изучить принципиальные схемы процесса электродиализа; познакомиться с основными типами электродиализных установок; исследовать закономерности процесса электродиализной обработки молочной сыворотки.

#### **Теоретическое обоснование**

Электродиализ относится к мембранным процессам и мембранным технологиям. Мембранные технологии вызывают огромный интерес у специалистов различных отраслей промышленности как наиболее экологически чистые, интенсивные и наименее энергоемкие. Суть электродиализной обработки заключается в направленном переносе ионов через ионоселективную мембрану под действием электрического поля. Применяется он для обессоливания воды и других жидкостей. Особенно эффективен процесс при использовании электрохимически активных мембран, которые избирательно пропускают катионы или анионы. Процесс сочетает в себе понятия диализа, осмоса, электроосмоса, электролиза.

Диализ – диффузионный процесс переноса растворенного вещества через мембрану. Мембрана пропускает низкомолекулярные вещества и задерживает коллоидные частицы и макромолекулы. Движущей силой процесса является разность концентраций вещества с одной и другой стороны мембраны.

Осмос – процесс переноса растворителя через полупроницаемую перегородку (мембрану). Мембрана может разделять чистый растворитель и раствор или два раствора с разной концентрацией. Через поры мембраны проходит только растворитель. Движущей силой процесса является более высокое осмотическое давление с одной стороны мембраны. За счет этого

происходит выравнивание концентраций растворов или снижение концентрации вещества в растворе.

Электроосмос – процесс переноса растворителя через полупроницаемую мембрану под действием внешнего электрического поля. Мембрана в этом случае способна пропускать только молекулы растворителя.

Электролиз – совокупность электрохимических окислительно-восстановительных процессов, которые проходят на поверхности электродов, погруженных в электролит, при прохождении электрического тока. Применяется для получения многих веществ (металлов, водорода, хлора и др.), нанесения металлических покрытий, воспроизведения формы предметов. Механизм переноса ионов при электродиализе схематично представлен на рисунке 9.1.

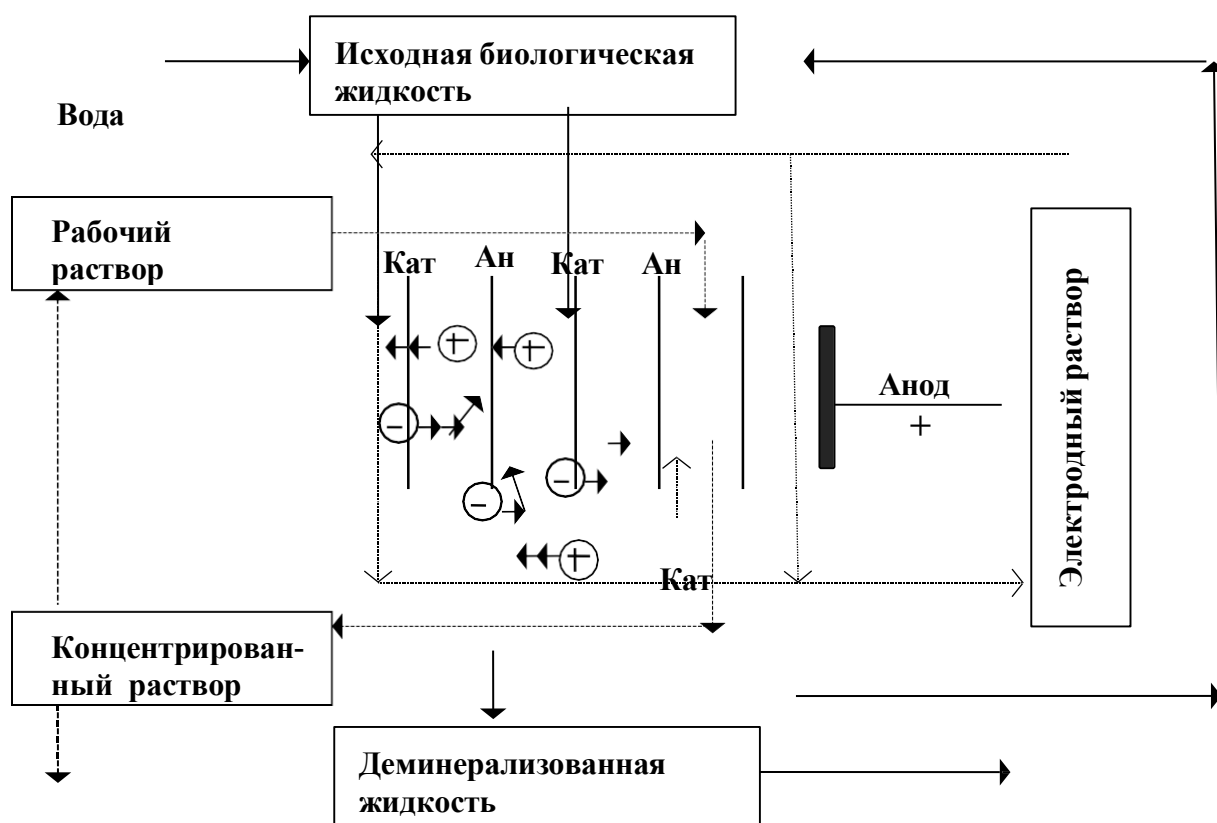


Рисунок 9.1 - Схема переноса ионов при электродиализе.

**Аппаратура и материалы:** лабораторная электродиализная установка, рефрактометр, кондуктометр, титровальная установка, весы лабораторные, баня водяная, мерники металлические емкостью 1 дм<sup>3</sup>; раствор гидроксида

натрия 0,1 н., 1 %-й спиртовой раствор фенолфталеина, цилиндры на 100 – 500 см<sup>3</sup>, пипетки на 10 см<sup>3</sup>, прибор для отмеривания раствора формалина на 1 см<sup>3</sup>.

### Указания по технике безопасности

При выполнении исследований следует соблюдать общие правила техники безопасности, рассмотренные в методических указаниях к выполнению лабораторной работы 1. Особенное внимание следует уделить правилам работы с растворами щелочей, электробезопасности при работе с установками под высоким напряжением. Перед началом работы с лабораторной электродиализной установкой ознакомиться с правилами ее эксплуатации. Работу с установкой осуществлять только под контролем преподавателя или лаборанта!

### Методика и порядок выполнения работы

Порядок выполнения работы приведен на рисунке 9.2.



Рисунок 9.2 - Блок-схема алгоритма выполнения работы «Изучение технологических процессов электромембранной обработки биологического сырья».

Пояснения к блок-схеме.

**БЛОК 1.** По литературным источникам выполнить принципиальную схему промышленной электродиализной установки типа «фильтр-пресс», указать материальные потоки сырья, рабочего и электродного растворов.

Изучить устройство лабораторной электродиализной установки, вычертить схему; привести описание работы.

**БЛОК 2.** Подгруппа разбивается на 3-4 бригады. Порядок выполнения работы.

1. Для проведения исследований готовят модельные образцы молочной сыворотки с массовой долей сухих веществ 6, 12, 18, 24 % объемом 1 дм<sup>3</sup> путем растворения расчетных навесок сухой молочной сыворотки в питьевой или дистиллированной воде при температуре 40 – 45 °С. Определяют титруемую кислотность, массовую долю сухих веществ и удельную электропроводность приготовленных образцов сыворотки.

2. Образцы молочной сыворотки обрабатывают на электродиализной установке в течение 20 – 30 минут. В процессе работы с интервалом в 3 – 5 минут отбирают образцы сыворотки объемом 15 – 20 см<sup>3</sup> для определения массовой доли сухих веществ, титруемой кислотности и удельной электропроводности. В процессе электродиализа фиксируют электрические характеристики процесса (сила тока, напряжение); изменение состояния электродного и рабочего растворов (визуально); температуру обрабатываемого сырья, электродного раствора и рассола.

3. По завершении процесса электродиализа проводят ополаскивание и мойку электродиализной установки.

**БЛОК 3.** Для каждой контрольной точки рассчитать уровень деминерализации (De) и производительность (M) установки по формулам:

$$De = [(\chi_0 - \chi) / \chi_0] * 100 \%, \quad (9.1)$$

$$M = V * De * C / (S * t), \quad (9.2)$$

где  $\chi_0, \chi$  – удельная электропроводность сыворотки в начальный и текущий момент времени;

V – объем перерабатываемого сырья, м<sup>3</sup>;

C – массовая доля сухих веществ сыворотки в текущий момент времени, %;

S – суммарная рабочая поверхность мембран, м<sup>2</sup>;

$t$  – продолжительность обработки, ч.

Результаты исследований и расчетов заносят в таблицы 9.1. и 9.2.

Таблица 8.1 – Результаты исследований процесса электродиализа.

| № образца | Продолжительность обработки, мин. | Сила тока, А | Напряжение, В | Удельная электропроводность | Титруемая кислотность, °Т | Массовая доля сухих веществ, % |
|-----------|-----------------------------------|--------------|---------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------------|
|           |                                   |              |               |                             |                           |                                |

Таблица 9.2 – Результаты расчета показателей эффективности процесса электродиализа.

| № образца | Продолжительность обработки, мин. | Уровень деминерализации, % | Производительность, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ |
|-----------|-----------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------|
|           |                                   |                            |                                                              |
|           |                                   |                            |                                                              |

БЛОК 4. Для образцов сыворотки с фиксированными значениями массовой долей сухих веществ строят графики зависимости титруемой кислотности, массовой доли сухих веществ, удельной электропроводности, уровня деминерализации и производительности установки от времени обработки. По результатам исследований всех бригад строят графики зависимости уровня деминерализации и производительности установки по завершении обработки сыворотки от массовой доли сухих веществ исходных образцов.

Содержание отчета и его форма

Отчет о выполнении работы должен содержать:

- титульный лист;
- цель и алгоритм выполнения работы;
- теоретическое обоснование проводимых исследований;
- описание методики проведения эксперимента;
- результаты исследований, графические зависимости;
- выводы.

**Контрольные вопросы и защита работы**

Контрольные вопросы:

- сущность и теоретические основы процесса электродиализа биологических жидкостей;
- классификация и характеристика полупроницаемых мембран для электромембранных процессов;
- аппаратное оформление процесса электродиализа молочного сырья;
- показатели эффективности процесса электродиализа.

Защита работы проводится на следующем после ее выполнения лабораторном занятии в форме устного опроса.

## **Лабораторная работа № 9**

### **Изучение влияния технологических факторов на процессы концентрирования целевых продуктов**

**Цель и содержание работы:** изучить классификацию оборудования для концентрирования и сушки целевых продуктов биотехнологических производств; рассмотреть устройство и принцип действия различных типов вакуум-выпарных и сушильных установок, исследовать влияние технологических факторов на эффективность процесса сушки концентрированных молочных продуктов.

#### **Теоретическое обоснование**

Концентрирование целевых продуктов биотехнологических производств проводят для достижения следующих целей:

- получение готовых форм препаратов (молочная кислота, жидкий концентрат лизина);
- получение пересыщенных растворов целевых продуктов для их выделения в кристаллической форме (лизин, триптофан, рибофлавин);
- предварительное концентрирование продуктов перед сушкой (кормовые дрожжи, кормовой концентрат лизина).

В зависимости от термолабильности, летучести, требуемого уровня качества целевых продуктов в биотехнологических производствах используют следующие методы концентрирования:

- вакуум-выпаривание;
- обратный осмос;
- криоконцентрирование.

**Аппаратура и материалы:** рефрактометр, весы лабораторные, баня водяная, шкаф сушильный, цилиндры на 100 см<sup>3</sup>, пипетки на 10 см<sup>3</sup>.

#### **Указания по технике безопасности**

При выполнении исследований следует соблюдать общие правила техники безопасности, рассмотренные в методических указаниях к

выполнению лабораторной работы 1. Особенное внимание следует уделить правилам работы с сушильными шкафами, электробезопасности.

### **Методика и порядок выполнения работы**

Порядок выполнения работы приведен на рисунке 10. 1.

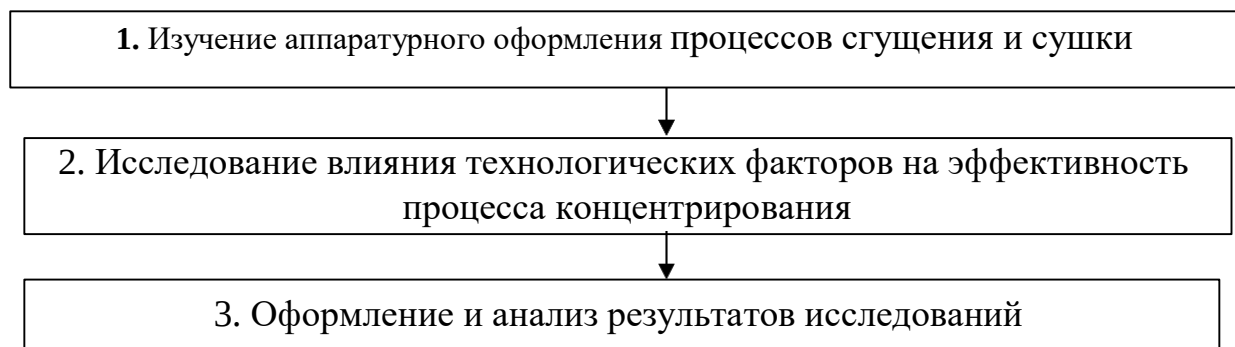


Рисунок 10. 1 – Блок-схема алгоритма выполнения работы «Изучение влияния технологических факторов на процессы концентрирования целевых продуктов».

### **Пояснения к блок-схеме**

**БЛОК 1.** Материал изучают по лекциям и рекомендуемым источникам литературы. В отчете о работе необходимо отразить следующие вопросы:

- способы классификации вакуум-выпарных установок;
- области применения вакуум-выпарных установок различных конструкций (циркуляционных, пленочных, емкостных с паровой рубашкой и мешалкой) в биотехнологических производствах.

Выполнить принципиальные схемы, описать устройство и принцип действия следующих типов вакуум-выпарных аппаратов:

- циркуляционных аппаратов с выносной греющей камерой (с естественной и принудительной циркуляцией продукта);
- пленочных аппаратов;
- роторно-пленочных аппаратов;
- емкостных аппаратов с мешалкой и рубашкой.

**БЛОК 2.** В рамках выполнения данного задания исследуют влияния температуры и массовой доли сухих веществ концентрированного продукта на скорость удаления влаги и значение массовой доли остаточной влаги в сгущенном продукте. Для проведения исследований используют образцы сухих молочных продуктов (сухой сыворотки, сухого обезжиренного молока), восстановленных до массовой доли сухих веществ 30, 35, 40, 45 %.

Последовательность выполнения работы.

1. Готовят навески сухих молочных продуктов и восстанавливают в воде, нагретой до температуры 40 – 45 °С.

2. Для каждого значения массовой доли сухих веществ высушиваемого продукта отбирают по четыре образца объемом 3 см<sup>3</sup>, соответствующих продолжительности процесса сушки 30, 60, 90, 120 минут. Исследуемые образцы помещают в предварительно взвешенные бюксы с фильтровальной бумагой. Определяют массу бюкса с высушиваемым продуктом.

3. Нагревают высушиваемый продукт в бюксах до температуры 90 – 95 °С на электроплитке, после чего помещают высушиваемые образцы в сухожаровой шкаф при температуре 105, 115 или 125 °С (по заданию преподавателя).

4. По истечении заданного времени (30, 60, 90, 120 минут) бюксы с продуктом помещают в эксикатор. Через 10 – 15 минут после завершения сушки определяют массу бюкса с высушенным продуктом.

**БЛОК 3.** Результаты исследований заносят в таблицу 10. 1.

Таблица 10. 1 – Результаты исследований процесса сушки

| № образца | Время сушки, мин. | Масса бюкса с продуктом, г | Масса испаренной влаги, W, г | $\Delta W_i = W_i - W_{i-1}$ | $\Delta W_i / \Delta \tau$ |
|-----------|-------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Контроль  | 0                 |                            |                              |                              |                            |
| 1         | 30                |                            |                              |                              |                            |
| 2         | 60                |                            |                              |                              |                            |
| 3         | 90                |                            |                              |                              |                            |
| 4         | 120               |                            |                              |                              |                            |

Примечание: для всех образцов принять  $\Delta \tau = 30$  мин.

По результатам исследований построить графики зависимости массы испаренной влаги от времени ( $W = f(\tau)$ ) и скорости сушки от времени ( $\Delta W_i / \Delta \tau = f(\tau)$ ).

Проанализировать, как влияют массовая доля сухих веществ продукта, направляемого на сушку, и температура воздуха в сушильной камере на скорость процесса и конечное значение массовой доли сухих веществ продукта.

Содержание отчета и его форма

Отчет о выполнении работы должен содержать:

- титульный лист;
- цель и алгоритм выполнения работы;
- классификации вакуум-выпарных аппаратов установок, их назначение в биотехнологических производствах;
- принципиальные схемы, описание устройства и принципа действия вакуум-аппаратов ок различных конструкций;
- описание методики проведения исследований;
- результаты исследований, графические зависимости;
- выводы.

### **Контрольные вопросы и защита работы**

Контрольные вопросы:

- способы классификации вакуум-выпарных аппаратов;
- области применения процессов концентрирования в биотехнологических производствах;
- конструкции и принцип действия циркуляционных, пленочных, роторно-пленочных, емкостных вакуум-выпарных аппаратов;
- кинетика процесса сушки концентрированных молочных продуктов.

Защита работы проводится на следующем после ее выполнения лабораторном занятии в форме устного опроса.

## **Лабораторная работа 10**

### **Изучение влияния технологических факторов на процессы сушки целевых продуктов**

**Цель и содержание работы:** изучить классификацию оборудования для сушки целевых продуктов биотехнологических производств; рассмотреть устройство и принцип действия различных типов сушильных установок, исследовать влияние технологических факторов на эффективность процесса сушки концентрированных молочных продуктов.

#### **Теоретическое обоснование**

Сушку целевых продуктов биотехнологических производств проводят для достижения следующих целей:

- получение готовых форм препаратов (молочная кислота, жидкий концентрат лизина);
- получение пересыщенных растворов целевых продуктов для их выделения в кристаллической форме (лизин, триптофан, рибофлавин);
- предварительное концентрирование продуктов перед сушкой (кормовые дрожжи, кормовой концентрат лизина).

Метод сушки целевых продуктов определяется рядом факторов: агрегатным состоянием и дисперсной фазой, в которых находится высушиваемый объект; необходимостью максимального сохранения нативных свойств биообъекта или, наоборот, инактивации биологически активных веществ и клеток микроорганизмов; требуемым уровнем себестоимости продукта (кормовое средство, пищевой концентрат, фармпрепарат).

С учетом вышеперечисленных факторов в биотехнологических производствах могут быть реализованы следующие способы сушки целевых продуктов:

- конвективная сушка (распылительные, вихревые, барабанные сушилки);
- кондуктивная сушка (валяцевые, ленточные, шахтные сушилки);

- сушка при пониженных температурах под вакуумом (вакуум-сушилки, вакуум-сушильные шкафы);
- лиофильная сушка (сублимационные сушилки).

**Аппаратура и материалы:** рефрактометр, весы лабораторные, баня водяная, шкаф сушильный, цилиндры на 100 см<sup>3</sup>, пипетки на 10 см<sup>3</sup>.

### **Указания по технике безопасности**

При выполнении исследований следует соблюдать общие правила техники безопасности, рассмотренные в методических указаниях к выполнению лабораторной работы 1. Особенное внимание следует уделить правилам работы с сушильными шкафами, электробезопасности.

### **Методика и порядок выполнения работы**

Порядок выполнения работы приведен на рисунке 11. 1.



Рисунок 11. 1 – Блок-схема алгоритма выполнения работы «Изучение влияния технологических факторов на процессы концентрирования и сушки целевых продуктов».

Пояснения к блок-схеме

**БЛОК 1.** Материал изучают по лекциям и рекомендуемым источникам литературы. В отчете о работе необходимо отразить следующие вопросы:

- способы классификации вакуум-выпарных установок;

- области применения вакуум-выпарных установок различных конструкций (циркуляционных, пленочных, емкостных с паровой рубашкой и мешалкой) в биотехнологических производствах;

- способы классификации сушильных установок;

- области применения сушилок различных конструкций (распылительных, вальцевых, барабанных, сублимационных) при получении целевых продуктов биотехнологических производств.

Выполнить принципиальные схемы, описать устройство и принцип действия следующих типов вакуум-выпарных аппаратов:

- циркуляционных аппаратов с выносной греющей камерой (с естественной и принудительной циркуляцией продукта);

- пленочных аппаратов;

- роторно-пленочных аппаратов;

- емкостных аппаратов с мешалкой и рубашкой.

Выполнить принципиальные схемы, описать устройство и принцип сушильных установок следующих конструкций:

- распылительных (дисковых и форсуночных);

- вальцевых;

- барабанных;

- сублимационных;

- сушилок с «кипящим слоем» продукта.

**БЛОК 2.** В рамках выполнения данного задания исследуют влияния температуры воздуха в сушильной камере и массовой доли сухих веществ концентрированного продукта на скорость удаления влаги и значение массовой доли остаточной влаги в высушенном продукте. Для проведения исследований используют образцы сухих молочных продуктов (сухой сыворотки, сухого обезжиренного молока), восстановленных до массовой доли сухих веществ 30, 35, 40, 45 %. Последовательность выполнения работы.

1. Готовят навески сухих молочных продуктов и восстанавливают в воде, нагретой до температуры 40 – 45 °С.

2. Для каждого значения массовой доли сухих веществ высушиваемого продукта отбирают по четыре образца объемом  $3 \text{ см}^3$ , соответствующих продолжительности процесса сушки 30, 60, 90, 120 минут. Исследуемые образцы помещают в предварительно взвешенные бюксы с фильтровальной бумагой. Определяют массу бюкса с высушиваемым продуктом.

3. Нагревают высушиваемый продукт в бюксах до температуры  $90 - 95^\circ\text{C}$  на электроплитке, после чего помещают высушиваемые образцы в сушильный шкаф при температуре 105, 115 или  $125^\circ\text{C}$  (по заданию преподавателя).

4. По истечении заданного времени (30, 60, 90, 120 минут) бюксы с продуктом помещают в эксикатор. Через 10 – 15 минут после завершения сушки определяют массу бюкса с высушенным продуктом.

### **БЛОК 3. Результаты исследований заносят в таблицу 11. 1.**

Таблица 11. 1 – Результаты исследований процесса сушки

| № образца | Время сушки, мин. | Масса бюкса с продуктом, г | Масса испаренной влаги, W, г | $\Delta W_i = W_i - W_{i-1}$ | $\Delta W_i / \Delta \tau$ |
|-----------|-------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Контроль  | 0                 |                            |                              |                              |                            |
| 1         | 30                |                            |                              |                              |                            |
| 2         | 60                |                            |                              |                              |                            |
| 3         | 90                |                            |                              |                              |                            |
| 4         | 120               |                            |                              |                              |                            |

Примечание: для всех образцов принять  $\Delta \tau = 30$  мин.

По результатам исследований построить графики зависимости массы испаренной влаги от времени ( $W = f(\tau)$ ) и скорости сушки от времени ( $\Delta W_i / \Delta \tau = f(\tau)$ ).

Проанализировать, как влияют массовая доля сухих веществ продукта, направляемого на сушку, и температура воздуха в сушильной камере на скорость процесса и конечное значение массовой доли сухих веществ продукта.

Содержание отчета и его форма

Отчет о выполнении работы должен содержать:

- титульный лист;

- цель и алгоритм выполнения работы;
- классификации вакуум-выпарных аппаратов и сушильных установок, их назначение в биотехнологических производствах;
- принципиальные схемы, описание устройства и принципа действия вакуум-аппаратов и сушилок различных конструкций;
- описание методики проведения исследований;
- результаты исследований, графические зависимости;
- выводы.

### **Контрольные вопросы и защита работы**

Контрольные вопросы:

- способы классификации вакуум-выпарных аппаратов;
- способы классификации сушильных установок;
- области применения процессов концентрирования и сушки в биотехнологических производствах;
- конструкции и принцип действия циркуляционных, пленочных, роторно-пленочных, емкостных вакуум-выпарных аппаратов;
- конструкции и принцип действия распылительных, вальцевых, барабанных, сублимационных, вихревых сушилок;
- кинетика процесса сушки концентрированных молочных продуктов;
- влияние технологических факторов на эффективность процесса сушки концентрированных молочных продуктов.

Защита работы проводится на следующем после ее выполнения лабораторном занятии в форме устного опроса.

## **Лабораторная работа № 11.**

### **Наблюдение массообменных процессов при ферментации без использования биореактора**

#### **Цель работы**

Изучить основные закономерности массообмена в процессах ферментации на простых моделях, понаблюдать за влиянием условий культивирования на рост микроорганизмов без применения специализированного оборудования.

#### **Задачи**

Ознакомиться с визуальными признаками массообменных процессов.

Сравнить рост культуры дрожжей в условиях с разной интенсивностью массообмена.

Наблюдать влияние состава среды на процесс ферментации.

Сделать выводы о важности массообмена для успешного культивирования микроорганизмов.

#### **Теоретическая часть**

Массообмен — перенос веществ между фазами. В биотехнологических процессах особенно важен перенос кислорода из воздуха в жидкую среду для дыхания аэробных микроорганизмов.

Факторы, влияющие на массообмен в простых системах:

площадь контакта фаз (чем больше поверхность соприкосновения воздуха и жидкости, тем эффективнее массообмен);

перемешивание (помогает обновлять поверхность контакта);

температура (влияет на скорость диффузии и активность микроорганизмов);

вязкость среды (густые среды затрудняют диффузию);

состав среды (наличие питательных веществ определяет скорость роста культуры).

Признаки активного массообмена:

выделение пузырьков газа ( $\text{CO}_2$ );

помутнение среды (рост биомассы);

изменение запаха;

образование пены (при активном брожении).

## **Оборудование и материалы**

### **Оборудование:**

4 стеклянные колбы или банки объёмом 500 мл;  
водяная баня или термостат (с возможностью поддержания температуры 28–30 °C);  
термометр;  
стеклянная палочка для перемешивания;  
мерный цилиндр;  
пипетки;  
марлевые или ватные пробки;  
часы или таймер.

### **Материалы:**

стерильная питательная среда (сусло или раствор сахара 5 %);  
чистая культура пекарских дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*;  
глицерин (для создания вязкой среды);  
дистиллированная вода.

## **Методика выполнения работы**

### **Опыт 1. Сравнение условий массообмена**

Подготовьте 4 ёмкости:

Ёмкость 1 — среда + дрожжи, закрытая плотной пробкой (минимальный массообмен);

Ёмкость 2 — среда + дрожжи, закрытая марлевой пробкой (свободный газообмен);

Ёмкость 3 — среда + дрожжи, периодически перемешиваемая (2–3 раза в час);

Ёмкость 4 — среда с повышенной вязкостью (с добавлением 2 % глицерина) + дрожжи, закрытая марлевой пробкой.

Во все ёмкости залейте по 200 мл питательной среды.

Добавьте одинаковое количество дрожжей (1 г на 200 мл среды).

Поместите все ёмкости в водяную баню при температуре 30 °С.

Наблюдайте в течение 6 часов, фиксируя каждые 2 часа:

наличие и интенсивность выделения пузырьков газа;

образование пены;

изменение прозрачности среды (помутнение);

запах.

Заполните таблицу наблюдений:

| Ёмкость | Условия<br>культивирования        | Выделение<br>газа | Образование<br>пены | Помутнение<br>среды | Запах |
|---------|-----------------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-------|
| 1       | Плотная пробка                    |                   |                     |                     |       |
| 2       | Марлевая пробка                   |                   |                     |                     |       |
| 3       | Перемешивание                     |                   |                     |                     |       |
| 4       | Вязкая среда +<br>марлевая пробка |                   |                     |                     |       |

Сделайте вывод: в какой ёмкости условия массообмена были наилучшими и почему.

## Опыт 2. Влияние температуры на массообмен

Возьмите две ёмкости с одинаковыми условиями (среда + дрожжи, марлевая пробка).

Поместите:

Ёмкость А — в термостат при 20 °С;

Ёмкость Б — в термостат при 30 °С.

Наблюдайте 4 часа, фиксируя выделение газа и помутнение среды каждые 30 минут.

Сравните результаты и сделайте вывод: как температура влияет на массообмен и рост культуры.

## Опыт 3. Визуальная оценка роста культуры

Выберите ёмкость с наилучшими условиями из опыта 1 (обычно это ёмкость

2 или 3).

Через 6 часов аккуратно отберите небольшую пробу.

Рассмотрите под микроскопом (при наличии) или нанесите каплю на предметное стекло.

Отметьте:

количество клеток;

их размер и форму;

признаки почкования (размножения).

Сделайте фото или зарисовки клеток.

Обработка результатов

Сравните таблицы наблюдений по всем опытам.

Ответьте на вопросы:

В каких условиях выделение газа было наиболее интенсивным?

Как вязкость среды повлияла на процесс?

При какой температуре рост культуры был активнее?

Какие визуальные признаки указывают на успешный процесс ферментации?

Обсудите результаты в группе и сформулируйте общие выводы.

### **Контрольные вопросы**

Что такое массообмен? Приведите пример массообменного процесса в быту.

Почему в закрытой ёмкости ферментация идёт хуже?

Как перемешивание помогает массообмену?

Почему вязкая среда замедляет рост микроорганизмов?

Как температура влияет на активность дрожжей?

Какие признаки говорят, что дрожжи «работают» (ферментируют)?

Почему марлевая пробка лучше плотной?

Приведите пример пищевого продукта, который получают с помощью ферментации.

Как можно улучшить массообмен в банке без перемешивания?

Почему важно контролировать условия культивирования в биотехнологии?

## **Оформление отчёта**

Отчёт должен содержать:

Титульный лист с указанием темы, ФИО студента, группы, даты.

Цель и задачи работы.

Краткое описание методики выполнения опытов.

Заполненные таблицы наблюдений.

Фотографии или зарисовки (если возможно) состояния сред и клеток дрожжей.

Ответы на контрольные вопросы.

Общий вывод по работе (что наблюдали, какие закономерности выявили, практическое значение результатов).

## **Техника безопасности**

Соблюдайте осторожность при работе с горячей водяной баней.

Используйте стерильные инструменты при работе с культурами.

Не пробуйте среды на вкус.

После работы продезинфицируйте оборудование и рабочее место.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ БИОТЕХНОЛОГИИ /  
PROCESSES AND APPARATUS OF BIOTECHNOLOGY

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ПО ОРГАНИЗАЦИИ  
САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

Направление подготовки 19.03.01 Биотехнология  
Направленность (профиль) Промышленная биотехнология

Ставрополь, 2026

**Введение**

В настоящее время перед высшей школой ставится задача подготовки высококвалифицированных, творчески мыслящих специалистов, способных к самообразованию и быстрой адаптации к меняющимся условиям производства в период становления и функционирования рыночной экономики. Важное место в повышении уровня подготовки и развития творческих способностей, будущих специалистов, занимает система самостоятельной работы студентов.

Самостоятельная работа студентов - это планируемая познавательная, организационно и методически направленная их деятельность, осуществляемая без непосредственной помощи преподавателя, организуемая на достижение конкретного результата.

Система внеаудиторной самостоятельной работы студентов в университете включает подготовку к лабораторным, практическим и семинарским занятиям, написание рефератов перевод текстов с иностранного языка, решение задач, выполнение расчетно-графических работ и домашних заданий, курсовое проектирование, производственная практика и дипломное проектирование.

Учебные планы предусматривают выделение на самостоятельную работу студентов 40 - 50% времени, предназначенного для теоретического изучения дисциплины. Для успешной самостоятельной работы студент должен иметь определенный минимум, который он приобретет в результате аудиторных занятий. Условиями успешной самостоятельной работы являются: наличие методической базы, консультации, учет и контроль результатов.

## **Общая характеристика самостоятельной работы студента**

Самостоятельная работа студентов - вид деятельности, при котором в условиях систематического уменьшения прямого контакта с преподавателем студентами выполняются учебные задания. К таким заданиям относятся контрольные и курсовые работы, рефераты, эссе, доклады и т.д.

При этом специфика самостоятельной работы студентов заключается в том, чтобы студенты самостоятельно получали новые знания. Из этого можно сделать следующий вывод:

Самостоятельная работа студентов - это практическое занятие с использованием различных методов обучения с использованием индивидуальных или групповых заданий, на котором студенты могут добывать новые знания, или обобщать ранее полученные знания.

Организация самостоятельной работы студентов осуществляется по трем направлениям:

- определение цели, программы, плана задания или работы;
- со стороны преподавателя студенту оказывается помощь в технике изучения материала, подборе литературы для ознакомления и написания курсовой работы, реферата и дипломной работы;
- контроль усвоения знаний, приобретения навыков по дисциплине, оценка выполненной контрольной и курсовой работы. Методика организации самостоятельной работы студентов зависит от структуры, характера и особенностей изучаемой дисциплины, объема часов на ее изучение, вида заданий для самостоятельной работы студентов, индивидуальных качеств студентов и условий учебной деятельности.

Процесс организации самостоятельной работы студентов включает в себя следующие этапы:

1. Подготовительный (определение целей, составление программы, подготовка методического обеспечения, оборудования);
2. Основной (реализация программы, использование приемов поиска информации, усвоения, переработки, применения, передачи знаний, фиксирование результатов, самоорганизация процесса работы);
3. Заключительный (оценка значимости и анализ результатов, их систематизация, оценка эффективности программы и приемов работы, выводы о направлениях оптимизации труда).

### **План-график выполнения самостоятельной работы**

На первом этапе необходимо ознакомиться с рабочей программой дисциплины, в которой рассмотрено содержание тем дисциплины лекционного курса, взаимосвязь тем лекций с практическими занятиями, темы и виды самостоятельной работы. По каждому виду самостоятельной работы предусмотрены определённые формы отчетности.

К лабораторному занятию студент должен подготовить ответы на вопросы, сделать конспект проведения экспериментов. К практическим заданиям студент должен выполнить дополнительные задания по теме занятия, проработать дополнительные научные источники, сделать конспект статьи (если это предусмотрено). Максимальное количество баллов студент получает, если он активно участвует в работе, владеет материалом, умеет логично и четко излагать мысли, творчески подходит к решению основных вопросов темы, показывает самостоятельность мышления.

Основанием для снижения оценки являются:

- слабое знание темы и основной терминологии;
- пассивность участия в групповой работе;
- отсутствие умения применить теоретические знания для решения практических задач.

### **Вопросы к собеседованию**

1. Свойства пищевых продуктов.
2. Практическое значение кинетических соотношений для проектирования аппаратов.
3. Характеристика неньютоновских жидкостей.
4. Область применения гидравлических машин.
5. Практическое применение в пищевой промышленности закономерностей истечения жидкости через отверстия и насадки.
6. Перемещение жидкостей. Принцип действия центробежных насосов. Явление кавитации.
7. Диафрагмовые (мембранные) насосы.
8. Перемещение газов. Принцип действия центробежных вентиляторов. Компрессорные машины.
9. Способы разделения неоднородных систем (нетрадиционные методы).
10. Насосы для создания глубокого вакуума. Устройство, принцип действия.
11. Достоинства и недостатки экспериментального метода исследования процессов и аппаратов
12. Достоинства и недостатки аналитического метода исследования процессов и аппаратов. Системный анализ технологических процессов.
13. Геометрическое подобие. Константы и инварианты подобия.
14. Новейшие представления о подобии, как методе мышления в обобщенных переменных.
15. Физический смысл и области применения критериев и чисел подобия: Фруда, Эйлера, Рейнольдса, Галилея, Архимеда, Грасгофа.
16. Этапы исследования процессов, аппаратов методом теории подобия.
17. Сравнительный анализ различных способов нагрева п/продуктов.
18. Электрофизические и нетрадиционные методы обработки пищевых материалов: воздействие электромагнитных и УФ- полей, ультразвука.
19. Обработка магнитными полями, термопластическая обработка.
20. Использование пара высокого давления в аппаратах и печах пищевой промышленности
21. Высококипящие теплоносители: минеральные и органические.
22. Основы конструктивного расчета теплообменников.
23. Основы расчета гидравлических потерь т/о.
24. Механический расчет т/о аппарата.
25. Энергетический КПД т/о аппарата.
26. Методы интенсификации теплообмена и повышение технико-экономических показателей.
27. Особенности тепло-и массообмена при осуществлении холодильной технологии.
28. Псевдооживление и пути его применения в пищевых технологиях
29. Аэродинамические свойства продуктов.
30. Триеры. Основы теории триеров.
31. Предельные размеры отсепарированных частиц, оптимальное расстояние между тарелками сепаратора.
32. Определение объема шламового пространства.
33. Энергетический расчет сепараторов.
34. Методы расчета центрифуг периодического и непрерывного действия.
35. Гранулирование сыпучих продуктов.
36. Очистка и концентрирование соков, пива, без/а напитков и вин.
37. Гомогенизация пищевых эмульсий.
38. Типы контактных устройств массообменных аппаратов.
39. Промышленные адсорбенты и их основные характеристики.
40. Особенности тепло-и массообмена при различных методах сушки: инфракрасном, в поле токов ВЧ и СВЧ.

41. Устройство и принцип действия сушилок с различными способами подвода тепла: конвективным, кондуктивным, терморadiационным.
42. Оптические и терморadiационные характеристики пищевых продуктов
43. Типы аппаратов для перегонки и ректификации в п/промышленности.
44. Методы экономии энергии в ректификационных установках.
45. Методы интенсификации экстрагирования. Аппаратура для проведения экстрагирования из твердых тел.
46. Роль в народном хозяйстве создания энергоресурсосберегающих экологически чистых технологий и высокопроизводительного оборудования.
47. Прогрессивные методы обработки пищевых продуктов

### **Критерии оценивания компетенций**

Оценка **«отлично»** выставляется студенту, если он уверенно владеет знаниями о методах для проектирования отдельных элементов технических и технологических систем, технических объектов, технологических процессов биотехнологического производства на основе применения базовых инженерных и технологических знаний

Оценка **«хорошо»** выставляется студенту, если он владеет знаниями о методах для проектирования отдельных элементов технических и технологических систем, технических объектов, технологических процессов биотехнологического производства на основе применения базовых инженерных и технологических знаний

Оценка **«удовлетворительно»** выставляется студенту, если он неуверенно владеет знаниями о о методах для проектирования отдельных элементов технических и технологических систем, технических объектов, технологических процессов биотехнологического производства на основе применения базовых инженерных и технологических знаний.

Оценка **«неудовлетворительно»** выставляется студенту, если он владеет обрывочными знаниями о методах для проектирования отдельных элементов технических и технологических систем, технических объектов, технологических процессов биотехнологического производства на основе применения базовых инженерных и технологических знаний

**Текущая аттестация** студентов в форме расчетно-графической работы проводится преподавателями, ведущими лабораторные и практические занятия по дисциплине.

Процедура проведения данного оценочного мероприятия включает в себя выполнение работы и собеседование.

Задания к расчетно-графической работе

1. Расчет кожухотрубного теплообменника для подогрева сухого белого вина.
2. Расчет теплообменника поверхностного типа для подогрева столового розового вина.
3. Расчет кожухотрубного теплообменного аппарата для подогрева красного десертного вина.
4. Расчет трубчатого теплообменника для подогрева белого столового вина.
5. Расчет аппарата типа «труба в трубе» для охлаждения сухого красного вина.
6. Расчет вертикального кожухотрубного теплообменника для производства брусничного морса.
7. Расчет подогревателя в процессе приготовления пивного сула.

8. Расчет пластинчатого теплообменника для пастеризации и охлаждения малинового сиропа.
9. Расчет установки для пастеризации и последующего охлаждения натурального вишневого сока.
10. Расчет аппарата для приготовления томатной пасты.
11. Расчет подогревателя в процессе производства виноградного сока.
12. Расчет подогревателя в процессе производства томатного сока.

**Промежуточная аттестация** в форме экзамена предусматривает проведение обязательной экзаменационной процедуры и оценивается 40 баллами из 100. В случае если рейтинговый балл студента по дисциплине по итогам семестра равен 60, то программой автоматически добавляется 32 премиальных балла и выставляется оценка «отлично». Положительный ответ студента на экзамене оценивается рейтинговыми баллами в диапазоне от **20** до **40**, оценка **меньше 20** баллов считается неудовлетворительной.

Процедура проведения экзамена осуществляется в соответствии с Положением о проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры - в СКФУ.

В экзаменационный билет включаются 2 вопроса и задача.

Для подготовки по билету отводится 30 минут.

При подготовке к ответу студенту предоставляется право пользования калькулятором, справочными таблицами.

#### **Вопросы к экзамену**

1. Законы переноса массы и энергии
2. Классификация процессов, особенности сырья пищевых производств.
3. Основные свойства пищевых материалов и продуктов
4. Деформация и вязкость пищевых систем.
5. Растяжение и сдвиг пищевых материалов.
6. Течение жидкостей
7. Теория подобия
8. Моделирование процессов и аппаратов.
9. Гидростатика, уравнение Эйлера, основное уравнение гидростатики
10. Гидростатика, законы Паскаля и Архимеда
11. Гидравлика. Расчеты трубопроводов
12. Гидравлика. Устройство и принцип действия насосов
13. Неоднородные полидисперсные пищевые системы
14. Гидромеханические процессы. Процессы разделение неоднородных систем.
15. Гидромеханические процессы. Фильтрация, осаждение.
16. Классификация процессов переработки по химическим и физическим свойствам разделяемых компонентов
17. Центробежное разделение неоднородных систем
18. Центрифуги, циклоны, осаждение в центробежном поле
19. Основы теории сепарирования, типы и назначение сепараторов
20. Гидромеханические процессы.
21. Гомогенизация пищевого сырья
22. Мембранные методы обработки пищевого сырья: гелевая фильтрация, гиперфильтрация
23. Мембранные методы обработки пищевого сырья: обратный осмос, электродиализ
24. Тепловые процессы. Основное уравнение теплопередачи, теплопроводность

25. Тепловые процессы. Конвекция, тепловое излучение и радиация
26. Основные законы массообменных процессов
27. Массообменные процессы. Выпаривание
28. Массообменные процессы. Сушка
29. Массообменные процессы. Кристаллизация и растворение
30. Биохимические процессы

#### **ЗАДАЧИ**

2. Расчет производительности и потребляемой мощности насосов
3. Расчет осадительного отстойника
4. Расчет отстойной центрифуги
5. Расчет рамного фильтр-пресса
6. Расчет мешалок
7. Расчет кожухотрубного теплообменника для молока
8. Расчет кожухотрубного теплообменника для сливок
9. Расчет кожухотрубного теплообменника для питательной среды
10. Расчёт пластинчатого аппарата
11. Расчет однокорпусного вакуум-аппарата
12. Расчет двухкорпусного вакуум-аппарата
13. Расчет вальцевой сушилки
14. Расчет распылительной сушилки
15. Расчет ферментера

#### **Выполнение расчетно-графической работы**

Расчетно-графическая работа включает расчетно-пояснительную записку и графическую часть. Расчетно-пояснительная записка включает обоснование способов производства биотехнологической продукции, характеристику сырья, питательных сред и культивируемых биообъектов, материальные расчеты биотехнологической продукции, подбор оборудования в технологическую линию, расчет и описание аппарата, список использованной литературы, приложения.

Графическая часть состоит из 3-4 чертежей, на которых должны быть представлены: технологические линии производства целевых продуктов, суточный график работы машин и аппаратов, компоновка производственных помещений.

Пояснительная записка оформляется на одной стороне листа формата А4 и должна содержать:

- титульный лист;
- задание;
- содержание;
- введение;
- обоснование выбранных способов производства биотехнологической продукции;
- характеристику сырья, питательных сред и культивируемых биообъектов;
- биологические и физико-химические основы получения целевых продуктов;
- материальные расчеты биотехнологической продукции;
- расчет и подбор оборудования в линию;
- расчет и подбор аппарата;
- список использованной литературы.

Текст записки оформляется в соответствии с требованиями ГОСТов 2.105-68, 2.304-81, 7.32-81.

Пояснительная записка выполняется на одной стороне листа формата А4 с ограничительной рамкой на первых трех-пяти листах, которая отстоит от левого края на 20 мм и на 5 мм от остальных. Расстояние от рамки до текста следует оставлять: с левой стороны - 5 мм, с правой – 3 мм.

Нумерация страниц – сквозная, начиная с титульного листа. Номер проставляется в правом верхнем углу листа без точек или тире на всех страницах, кроме титульного листа и задания на курсовое проектирование.

Наименование разделов пишут прописными буквами, располагают симметрично тексту; подразделов – с абзаца строчными буквами. Каждый раздел следует начинать с новой страницы. Разделы и подразделы нумеруют арабскими цифрами, например: «3.4.». Ссылки на литературный источник указываются в квадратных скобках - [8]. Нумерация источников литературы – сквозная по мере упоминания, либо в алфавитном порядке. Дословно выписанная группа слов заключается в кавычки с указанием литературного источника.

В тексте не допускается:

- сокращение слов, кроме установленных правилами;
- замена слов буквенными обозначениями;
- сокращение обозначений физических величин, если они употребляются без цифр (за исключением заголовков таблиц и расшифровки формул);
- использование в тексте математических знаков без цифр; в этих случаях следует писать слово, например «минус ...»;
- применение индексов стандартов (ГОСТ, ОСТ, ТУ) без указания регистрационного номера нормативного документа.

Если в тексте приводится более одной формулы, их нумеруют арабскими цифрами, используя сквозную нумерацию в рамках данного раздела. Номер указывают с правой стороны листа на уровне формулы в круглых скобках. При небольшом количестве формул допускается использовать их сквозную нумерацию по всему тексту записки. Пример оформления формул приведен ниже:

$$M_{п.м.} = (K * M_{п.с.}) / 100, \text{ кг}, \quad (4.2)$$

где  $M_{п.м.}$  – масса посевного материала, кг;

$K$  – посевная доза, %;

$M_{п.с.}$  – масса питательной среды, кг.

### 5.1.3. Таблицы.

Нумерация таблиц – сквозная, в рамках раздела или по всему тексту пояснительной записки. Пример оформления таблицы приведен ниже.

Таблица 3.1. - Химический состав кукурузного экстракта

| Наименование компонента | Средняя концентрация, % | Пределы колебаний, % |
|-------------------------|-------------------------|----------------------|
|                         |                         |                      |

Иллюстрации (чертежи, схемы, графики) обозначают словом «Рисунок». Рисунки располагают, как правило, на отдельном листе непосредственно после упоминания в тексте так, чтобы их было удобно рассматривать без поворота или с поворотом на 90 градусов по часовой стрелке. Название размещается под рисунком, ниже приводится расшифровка условных обозначений, использованных при выполнении рисунка. Нумерация рисунков – сквозная в рамках раздела; при наличии небольшого количества рисунков допускается их сквозная нумерация по всему тексту записки.

Обоснование выбранных способов производства биотехнологической продукции.

В данном разделе приводится краткая характеристика продуктов, выпускаемых на проектируемом предприятии:

- химический и (или) микробиологический состав;
- физико-химические и биохимические свойства;
- требования, предъявляемые к качеству готовой продукции;
- основные направления использования (в пищевой промышленности, животноводстве и растениеводстве, медицине, технике, других отраслях).

На основании анализа специальной литературы, периодических изданий, патентных источников информации из двух-трех существующих промышленных способов производства целевого продукта (продуктов) выбирают наиболее целесообразный метод для организации производства на проектируемом предприятии. Критериями при обосновании подобного выбора являются доступность, экологическая безопасность и низкая стоимость сырья; степень сложности аппаратно-процессового оформления основных технологических операций; энерго- и материалоемкость технологического процесса; наличие побочных продуктов и возможность их переработки в рамках существующего технологического цикла.

При рассмотрении способов производства того или иного продукта следует привести их краткое описание с указанием режимов основных технологических операций (стерилизации или пастеризации питательных сред, ферментации, выделения и очистки целевых продуктов). Обязательной является ссылка на использованный источник информации, указание регистрационного номера патента, авторского свидетельства, нормативной документации (ГОСТа, ОСТа, ТУ и др.).

Характеристика сырья, питательных сред и культивируемых биообъектов.

В разделе приводят общую характеристику перерабатываемого проектируемым предприятием биосырья (виды, химический состав, физико-химические показатели, биологическая ценность), а также специфические требования, предъявляемые при культивировании конкретных биообъектов (качественный и количественный состав источников углерода, азота, фосфора, макро- и микроэлементов; наличие стимуляторов и ингибиторов биохимических процессов).

При переработке биосырья растительного и животного происхождения рекомендуется учитывать данные о его среднем составе, характерном для сырьевой зоны предприятия. При использовании в качестве сырья побочных продуктов перерабатывающей промышленности (молочной сыворотки, мелассы, спиртовой барды и др.) данные о составе и показателях качества сырья принимают по информации базового предприятия. В случаях, когда производственный цикл проектируемого предприятия предусматривает приготовление синтетических питательных сред на основе препаратов углеводов, аминокислот, витаминов, минеральных веществ, данные о составе и квалификации компонентов среды принимаются на основе соответствующих нормативных документов.

Подбор состава и рецептур питательных сред проводят с учетом специфики культивируемых биообъектов, технологии производства целевых продуктов. При описании рецептур питательных сред обязательна ссылка на литературный или патентный источник, технологическую инструкцию.

Далее дают краткую характеристику культивируемого биообъекта: для промышленных штаммов микроорганизмов – морфологические, культуральные и биохимические свойства, способ получения (концентрирование, распылительная сушка, лиофилизация), условия хранения; для ферментных препаратов – биохимические свойства, происхождение (микробное, растительное, животное), способ получения (например, для микробных препаратов – глубинный или поверхностный); для иммобилизованных клеток или препаратов помимо перечисленных выше показателей указывают способ иммобилизации.

За исходные данные при выполнении материальных расчетов принимают:

- годовую (суточную) производительность предприятия по базовому продукту или основному виду перерабатываемого сырья;
- распределение сырья на каждый вид продукции;
- расчетный состав сырья, полуфабрикатов, основных и побочных продуктов по массовой доле сухих веществ или одного из компонентов (белка, жира и др.);
- рецептуры питательных сред;

- нормы расхода сырья на выработку готовой продукции с учетом предельно допустимых потерь на отдельных этапах технологического процесса;
- практические значения экономических коэффициентов, расходных коэффициентов по субстратам и кислороду, потерь продуктов на различных стадиях производства.

Данные материальных расчетов используют при подборе технологического оборудования, составлении графика работы машин и аппаратов.

#### Расчет и подбор оборудования в линию

Целью данного раздела является аппаратное оформление технологических процессов, включенных в принципиальную схему получения биотехнологической продукции. Подбор и расчет оборудования начинают с конструирования линий машин и аппаратов, необходимых для осуществления проектируемых технологических процессов.

На первом этапе конструирования линий составляют таблицу, в левой части которой для каждого проектируемого продукта последовательно выписывают все технологические процессы, а в правую часть заносят соответствующие им основные и вспомогательные машины. Например, процесс – стерилизация питательной среды, основное оборудование – теплообменник трубчатый, вспомогательное оборудование – насос центробежный, выдерживатель.

При выборе типов технологического оборудования предпочтение отдают машинам, позволяющим при заданной производительности линии по перерабатываемому сырью или готовому продукту сократить потребление электроэнергии, тепло- и холодоносителей, производственные площади. Также необходимо предусмотреть максимальную механизацию и автоматизацию технологического процесса.

Расчет и подбор машин в технологическую линию сводится к определению количества единиц однотипного оборудования и продолжительности их работы в смену (сутки). При этом машины и аппараты можно условно разделить на три группы, методика расчета для каждой из которых имеет особенности:

- машины и аппараты непрерывного или полунепрерывного действия, подбор которых сопровождается расчетом их конструктивных элементов;
- машины и аппараты, число которых определяется по количеству выпускаемых изделий;
- машины и аппараты периодического действия, подбираемые по их номинальному рабочему объему или другим характеристикам без расчета их элементов.

К первой группе относят машины и аппараты, предназначенные для осуществления теплообменных (пастеризаторы, стерилизаторы, охладители, подогреватели) и массообменных (фильтры, центрифуги, сепараторы, экстракторы, ректификационные колонны, ультрафильтрационные и вакуум-выпарные аппараты, сушилки) процессов. Их подбор сводится к расчету необходимых площадей теплообмена или массообмена, установлению паспортных площадей теплообмена или массообмена и определению количества единиц оборудования как частного от деления этих величин. В общем случае количество машин и аппаратов этой группы может быть рассчитано по формуле:

$$K_{\text{маш}} = M_{\text{см}} / (G_{\text{пасп}} * \tau), \quad (1)$$

где  $M_{\text{см}}$  – масса перерабатываемого за рабочую смену сырья (полуфабриката) в соответствии с данными материального расчета, кг;

$G_{\text{пасп}}$  - паспортная производительность машины, кг/ч;

$\tau$  - продолжительность работы единицы оборудования в смену, ч.

Максимальная продолжительность непрерывной работы оборудования устанавливается по справочным данным. Оптимальное эффективное время работы оборудования составляет для семичасовой рабочей смены 5,0 – 5,5 ч, для восьмичасовой смены – 6,0-6,5 ч.

Количество вакуум-выпарных аппаратов и сушильных установок определяют исходя из массы испаренной влаги (по данным материального расчета) и паспортной производительности аппарата по испаренной влаге.

Ко второй группе относятся аппараты для фасования жидких, концентрированных и порошкообразных продуктов, укупорочные, этикерочные, упаковочные машины. Их количество рассчитывают по формуле:

$$K_{\text{МАШ}} = (\tau_{\text{ОБР}} * N) / (60 * \tau_{\text{ЭФ}} * K_{\text{ИСП}}), \quad (2)$$

где  $\tau_{\text{ОБР}}$  – время обработки единицы изделия, мин;

$N$  – количество изделий, вырабатываемых в смену;

$\tau_{\text{ЭФ}}$  – эффективное время работы оборудования в смену, ч;

$K_{\text{ИСП}}$  – общий коэффициент использования машины.

Для фасовочных автоматов количество единиц фасовки, выпускаемых за одну рабочую смену, можно определить по формуле:

$$N = M_{\text{ПР}} / M_{\text{НЕТ}}, \quad (3)$$

где  $M_{\text{ПР}}$  – масса фасуемого продукта, кг,

$M_{\text{НЕТ}}$  – масса нетто одного фасованного изделия, кг.

К третьей группе относятся резервуары, емкостные аппараты для приготовления растворов компонентов питательных сред, инокуляторы, ферментаторы, растительные камеры, другие виды емкостных аппаратов. Количество единиц оборудования в данном случае определяют по формуле (результат следует округлять до целого числа в большую сторону):

$$K_{\text{МАШ}} = (V_{\text{ОБР}} / (V_{\text{НОМ}} * K_{\text{ЗАП}})) * (1 + (\tau_{\text{РЦ}} / 24)), \quad (4)$$

где  $V_{\text{ОБР}}$  – сменный объем обрабатываемого сырья (полуфабриката), м<sup>3</sup>;

$V_{\text{НОМ}}$  – номинальный геометрический объем аппарата, м<sup>3</sup>;

$K_{\text{ЗАП}}$  – коэффициент заполнения аппарата, для резервуаров, емкостного оборудования, аппаратов для анаэробных ферментаций принимают равным 0,8-0,9; для ферментаторов с аэрирующими устройствами – 0,5-0,7;

$\tau_{\text{РЦ}}$  – продолжительность рабочего цикла, ч.

При подборе оборудования рекомендуется выдерживать производительность отдельных машин или групп однотипных аппаратов равной общей производительности линии по перерабатываемому сырью или вырабатываемому продукту. Целесообразно с точки зрения экономии производственных площадей и сокращения эксплуатационных расходов проектировать по каждому процессу минимальное количество машин минимальной производительности. Для удобства эксплуатации однотипные машины, работающие в одной линии, рекомендуется устанавливать одной производительности.

Результаты подбора оборудования сводят в таблицу (приложение 2). Для проверки правильности подбора оборудования строят график работы машин и аппаратов, который позволяет установить продолжительность и очередность работы машин, определить почасовой расход электроэнергии, пара, горячей воды, холода. График выполняют на миллиметровой бумаге стандартного формата. Построение графика осуществляют в соответствии с методическими разработками по дисциплине «Основы проектирования и оборудование предприятий биотехнологической промышленности».

Для построения графика работы машин и аппаратов необходимы следующие исходные данные:

- последовательность технологических операций;
- сведения о параметрических рядах технологического оборудования;
- продолжительность подготовительно-заключительного и эффективного времени работы оборудования непрерывного и полунепрерывного действия;
- фактическое время работы, наполнения и опорожнения резервуаров, емкостных аппаратов;
- продолжительность приемки сырья.

Последовательность технологических операций определяется выбранным способом производства и технологическим процессом получения готового продукта.

Параметрические ряды представляют собой совокупность технологического оборудования, объединенного по назначению, типу и мощности. Сведения о них принимают по отраслевым каталогам технологического оборудования.

Продолжительность подготовительно-заключительных операций принимают по фактическим данным, полученным во время прохождения производственной практики или по справочным данным. Фактическое время наполнения и опорожнения резервуаров и емкостных аппаратов определяют по формуле:

$$\tau_{\text{НАП}} = (M_C / I_{\text{НАП}}), \quad (5)$$

где  $M_C$  - масса сырья, поступающего на переработку, кг;

$I_{\text{НАП}}$  - интенсивность наполнения или опорожнения емкостного аппарата, кг/ч.

Продолжительность приемки сырья рекомендуется принимать равной 1-2 часам.

Графическая часть курсового проекта состоит из 3 – 4 листов формата А1 и по составу имеет следующее содержание:

- аппаратурно-процессовые технологические схемы получения проектируемых продуктов (1 лист);
- график работы машин и аппаратов (1 лист);
- чертеж конструируемого аппарата (1 лист).

Чертежи выполняются в соответствии с ГОСТ – ЕСКД. Масштабы изображений в соответствии с ГОСТ 2.302 – 68:

- масштабы уменьшения 1:2; 1:2,5; 1:4; 1:5; 1:10; 1:15; 1:20; 1:25; 1:40; 1:50; 1:75; 1:100; 1:200; 1:400; 1:500; 1:800; 1:1000;
- масштабы увеличения 2:1; 2,5:1; 4:1; 5:1; 10:1; 20:1; 40:1; 50:1; 100:1.

Для архитектурно-строительных чертежей рекомендуется применять масштабы: 1:50; 1:100; 1:200.

Все надписи на чертежах выполняются стандартным шрифтом, согласно ГОСТ 2.304 – 68. Размер шрифта определяется высотой прописных букв в мм: 2,5; 3,5; 5; 7; 10; 14; 20; 28; 40.

Согласно ГОСТ 2.303 – 68 на чертежах применяются восемь типов линий: сплошная основная (толщина линии  $S = 0,6 - 1,5$  мм); сплошная тонкая, сплошная волнистая, штриховая, штрихпунктирная тонкая, сплошная тонкая с изломами (толщина перечисленных линий  $(1/2 - 1/3) S$ ); штрихпунктирная утолщенная (толщина линии  $(1/2 - 2/3) S$ ); разомкнутая – для линий сечения (толщина линии  $(1 - 3/2) S$ ).

### **Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

#### **1. Перечень основной литературы:**

1. Гайворонский, К. Я. Технологическое оборудование предприятий общественного питания и торговли : [учебник] / К.Я. Гайворонский, Н.Г. Щеглов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : ФОРУМ, 2013. - 480 с. - Библиогр.: с. 474. - ISBN 978-5-8199-0501-2

2. Мерчалов, С.В. Конспект лекции для изучения дисциплины «Технологическое оборудование для переработки продукции живот-новодства». Раздел 1. Технологическое оборудование для обработки и переработки молока. Тема «Основы разделения молока на фракции и конструкции сепараторов-сливкоотделителей» Электронный ресурс : учебное пособие / сост. С.В. Мерчалов. - Воронеж : Воронежский Государственный Аграрный Университет им. Императора Петра Первого, 2016. - 46 с. - Книга находится в баз

3. Пуляев, С. М. Механическое оборудование и технологические комплексы : Учебное пособие / Пуляев С. М. - Москва : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2015. - 480 с. - Книга находится в базовой версии ЭБС IPRbooks. - ISBN 978-5-7264-1001-2

4. Самосюк, В. Г. Технологическое оборудование для производства молока / Самосюк В. Г. - Минск : Белорусская наука, 2013. - 494 с. - Книга находится в базовой версии ЭБС IPRbooks. - ISBN 978-985-08-1572-9

2. Перечень дополнительной литературы:

1. 1. Верболоз, Е. И. Технологическое оборудование : Учебное пособие для бакалавров и магистров направления 151000 - Технологические машины и оборудование / Верболоз Е. И. - Саратов : Вузовское образование, 2014. - 205 с. - Книга находится в базовой версии ЭБС IPRbooks.

2. Лисин, П. А. Современное технологическое оборудование для тепловой обработки молока и молочных продуктов. Пастеризационные установки, подогреватели, охладители, заквасочники. Справочное пособие / П.А. Лисин ; К.К. Полянский ; Н.А. Миллер. - Санкт-Петербург : Гиорд, 2011. - 132 с. - ISBN 978-5-98879-106-5  
Электрон.текстовые данные. — СПб. : Университет ИТМО, 2016. — 90 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67239.html>

3. Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (модулю)

1. Электронная версия методических указаний лабораторным работам
2. Электронная версия методических указаний к самостоятельной работе
3. Электронная версия методических указаний к практическим занятиям

4. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины (модуля)

1. [www.genetika.ru/journal/](http://www.genetika.ru/journal/) – портал журнала «Биотехнология»;
2. [www.biorosinfo.ru/archive/journal/](http://www.biorosinfo.ru/archive/journal/) портал «Вестник биотехнологии и физико-химической биологии».
3. [www.foodprom.ru](http://www.foodprom.ru) – портал журнала «Пищевая промышленность».