

**Міністерство освіти і науки України  
Національний університет біоресурсів  
і природокористування України**

**Сухенко Ю.Г., Жеплінська М.М., Муштрук М.М.**

**Процеси і апарати харчових виробництв**

**Лабораторний практикум  
Навчальний посібник**

**За редакцією доктора технічних наук, професора  
Ю.Г. Сухенка**

**Київ  
ЦП «КОМПРИНТ»  
2018**

**УДК 664(075.8)** Рекомендовано вченою радою НУБіП України як  
**ББК 36.81 я73** навчальний посібник для студентів вищих навчальних  
**П84** закладів (протокол № від .. 2018 р.)

Рецензенти: доктор технічних наук, професор Штефан Є.В.  
(Національний університет харчових технологій)

доктор технічних наук, професор Стадник І.Я.  
(Тернопільський національний технічний університет ім.  
Івана Пулюя)

доктор технічних наук, професор Лопатько К.Г.  
(Національний університет біоресурсів і  
природокористування України)

**П84 Сухенко Ю.Г., Жеплінська М.М., Муштрук М.М.** Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум: [Навчальний посібник] / За ред. проф. Ю.Г. Сухенка. – К. ЦП «КОМПРИНТ», 2018. – 234 с.

## **ISBN**

Навчальний посібник містить описи лабораторних робіт, що охоплюють методикирозрахунків з процесів і апаратів харчових виробництв, а також основні теоретичні положення, довідкові дані та приклади інженерних розрахунків процесів і апаратів, які застосовують під час проектування обладнання харчових виробництв. Розроблені варіанти завдань для самостійної роботи спонукають студентів застосувати сучасні комп'ютерні технології до їх розв'язання, забезпечують якісне сприйняття ними навчального матеріалу.

Посібник призначений для студентів спеціальності 181 «Харчові технології». Може бути використаний для підготовки студентів за спеціальностями: 162 «Біотехнологія та біоінженерія», 208 «Агроінженерія» та 133 «Галузеве машинобудування», а також може бути корисним спеціалістам підприємств харчових і переробних галузей АПК, аспірантам і науковим співробітникам.

**ББК 36.81 я73**

**ISBN**

©Ю.Г. Сухенко, М.М.  
Жеплінська, М.М. Муштрук

## **ПЕРЕДМОВА**

Програма підготовки студентів у вищих навчальних закладах за спеціальністю 181 «Харчові технології» передбачає вивчення дисципліни «Процеси і апарати харчових виробництв».

Дисципліна є науковим підґрунтям, на якому можуть створюватись нові технології та апаратура. Вивчення наукових основ процесів і апаратів відіграє значну роль у формуванні професійних знань майбутніх фахівців харчової і переробної промисловості. Навчальною дисципліною передбачено вивчення загальних властивостей та закономірностей однотипних процесів, що відбуваються у багатьох технологіях. Узагальнення характерних процесів галузі сприяє формуванню у майбутніх фахівців необхідних знань, умінь і навичок для застосування їх сукупності у технологіях харчових виробництв.

Дисципліна «Процеси і апарати харчових виробництв» розглядає тільки загальні процеси, що найчастіше відбуваються у харчових технологіях. Низку специфічних процесів, таких як біохімічні, мікробіологічні або суто хімічні, розглядають під час вивчення конкретних технологічних дисциплін. Поряд із процесами подається також їх апаратне оформлення.

З метою забезпечення належного рівня фахової підготовки бакалаврів із спеціальностей „Технологія зберігання, консервування та переробки м'яса”, “Технологія зберігання, консервування та переробки риби і морепродуктів” необхідно підготувати студента до вивчення спеціальних дисциплін навчального плану, навчити вільно володіти

### Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

основними технологічними процесами виробництва галузі, забезпечити опанування студентами методиками розрахунку процесів і апаратів, принципами моделювання і оптимізації. Накопичений досвід підготовки фахівців за спеціальністю “Харчові технології” свідчить, що всі наукові положення дисципліни «Процеси і апарати харчових виробництв» та практичні питання мають безпосереднє відношення до їх майбутньої практичної чи наукової діяльності. Процеси і апарати харчових виробництв у навчальних планах займають проміжне місце між циклом загальноосвітніх і спеціальних дисциплін, в яких вивчають конкретні технології харчових виробництв.

Вивчення дисципліни направлено на оволодіння студентами фізичної сутності технологічних процесів, розуміння умов їх здійснення у визначених апаратах, способів керування ними, отримання знань і навичок для процесів і апаратів харчових виробництв.

Лабораторний практикум з дисципліни «Процеси і апарати харчових виробництв» дасть змогу студентам зрозуміти сутність процесів, що мають місце у технології галузі, і обґрунтовано підійти до вибору способу переробки сировини у продукти. Вивчення цієї дисципліни дасть майбутнім фахівцям можливість правильно вибирати і керувати технологічними процесами для забезпечення виробництва високоякісної продукції.

Завдання лабораторного практикуму з цієї дисципліни полягає у тому, щоб зміцнити теоретичні знання, закріпити навички загальноінженерної підготовки майбутніх фахівців, ознайомити їх фізико-хімічними основами технологічних процесів, забезпечити опанування

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
студентами методик розрахунку апаратів, принципів їх моделювання і оптимізації.

Практикум містить описи віртуальних лабораторних робіт з базовими теоретичними відомостями, які потрібні для їх виконання, індивідуальні завдання та довідковий матеріал.

У кожній роботі викладено мету, основні теоретичні положення, методичні вказівки для її проведення, форму звіту, варіанти індивідуальних завдань з елементами наукових досліджень, а також запитання і завдання для самоперевірки.

Окремі розділи навчального посібника написали: передмову, розділ 1 – доктор технічних наук, професор Сухенко Ю.Г., розділ 2 - кандидат технічних наук, доцент Жеплінська М.М., розділ – 3 – кандидат технічних наук, доцент Муштрук М.М.

## **ВСТУП**

Курс «Процеси і апарати харчових виробництв» належить до загально-інженерних дисциплін. Він завершує цикл загально-професійних дисциплін та передуює спеціальній підготовці кадрів вищої кваліфікації для харчової і переробної промисловості.

Характерною особливістю курсу є розгляд теоретичних основ використовуваних фізико-хімічних процесів для переробки сировини незалежно від конкретного виробництва.

Перевагою єдиного підходу до вивчення основних процесів харчових виробництв є те, що майбутній інженер отримує ґрунтовну загальнотехнічну підготовку, розуміння загальних закономірностей процесів харчових технологій, що ґрунтуються на знаннях, отриманих раніше при вивченні фізики, вищої математики, фізичної хімії, теплотехніки, електротехніки та інших фундаментальних дисциплін.

Такий підхід забезпечує формування теоретичної основи для вивчення спеціальних технологічних дисциплін, отримання навичок з розрахунків та конструювання машин і апаратів харчових виробництв.

Після вивчення курсу «Процеси і апарати харчових виробництв» студент повинен знати:

- 1) теоретичні основи фізико-хімічних процесів, які застосовуються у харчових і переробних виробництвах;
- 2) методик розрахунків процесів і апаратів галузі;
- 3) основні конструкції машин і апаратів;
- 4) сфери застосування конкретних машин і апаратів.

Студент повинен уміти:

- 1) обґрунтувати застосування машин і апаратів в технологічному процесі і оцінити основні техніко-економічні показники їх роботи;
- 2) виконувати проектні і перевірочні розрахунки машин і апаратів для реалізації основних фізико-хімічних процесів харчових виробництв;

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

3) планувати і проводити необхідні дослідження на експериментальному і промисловому обладнанні.

## 1. ОСНОВНІ ПРОЦЕСИ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

### 1.1. Класифікація основних процесів харчових виробництв

#### Поняття процесів, апаратів, машин.

Будь-яка технологія – це сукупність процесів, за допомогою яких сировина перетворюється в кінцевий продукт.

*Процес* — це послідовні і закономірні зміни в системі (продукті, матеріалі), що приводять до виникнення в ній нових властивостей.

Під терміном «*машина*» розуміють механізм (або поєднання механізмів і допоміжних пристроїв), призначений для перетворення механічної енергії в корисну роботу. Наприклад, дробарка, різальна машина. У машинах здійснюється механічний вплив на продукт, властивості якого, як правило, не змінюються, а змінюються лише форми, розміри і деякі інші фізичні властивості.

*Апарат* — це пристрій або пристосування, призначене для проведення того або іншого фізико-хімічного чи біологічного процесу. Наприклад, варильний казан, кип'ятильник. В апаратах відбуваються теплообмінні, масообмінні, хімічні та інші процеси, що зумовлюють зміни хімічних чи фізичних властивостей або агрегатного стану оброблюваного продукту.

Відмінності в поняттях «машина» і «апарат» іноді можуть ототожнюватися. Так, в хліборізальній машині енергія перетвориться в корисну роботу, пов'язану з утворенням шматків хліба за рахунок здійснення процесу різання.

У зв'язку з цим для спрощення термінології в курсі процесів і апаратів харчових виробництв умовно прийнято всі машини відносити до апаратів.

**Класифікація процесів.** Класифікація дозволяє чітко розділити предмет, що вивчається, на окремі розділи, що об'єднують явища або

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
об'єкти, в основі яких лежать загальні закономірності.

Необхідність класифікації процесів заключається в тому, що на її основі можна розрізнити і на перший погляд незв'язані між собою процеси об'єднати в класи, групи, види і розглядати їх на основі єдиних наукових закономірностей. Це дозволяє застосовувати загальні методи аналізу.

Наукова класифікація процесів і апаратів повинна відповідати трьом основним умовам:

- класифікація має бути однозначною, тобто кожному ступеню класифікації повинна відповідати одна визначена класифікаційна ознака;

- класифікація має бути вичерпною, тобто в ній необхідно охопити всі можливі класифікаційні ознаки;

Розглянемо ці умови стосовно класифікації процесів харчових виробництв.

На підставі всіх цих умов можна виділити три види (системи) класифікації процесів харчових виробництв. Перший вид класифікації заснований на організаційно-технічній структурі процесів, другий, — на зміні параметрів процесу в часі, третій — на кінетичних закономірностях процесів.

*Класифікація за організаційно-технічною ознакою.* Відповідно до даної ознаки класифікації всі процеси поділяють на три класи: періодичної дії, безперервної і комбіновані.

У процесах періодичної дії завантаження і вивантаження сировини здійснюються через визначені проміжки часу, тобто процес проходить періодами. Періодичні процеси здійснюються, як правило, в одному апараті. Прикладом періодичних процесів може бути процес замісу тіста в тістомісильних машинах.

Безперервні процеси здійснюються в проточних апаратах, в яких надходження початкової сировини і вивантаження готової продукції

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
здійснюються безперервно. Всі стадії безперервного процесу відбуваються одночасно, але роз'єднані в часі. Це означає, що безперервні процеси здійснюються, як правило, в різних апаратах, що складають єдину безперервну діючу установку.

Як приклади безперервних процесів можна назвати обжарювання м'яса або випічку млинців на безперервно діючих апаратах.

Комбіновані процеси - це такі процеси, які на одних стадіях здійснюються безперервно, а на інших - періодично.

Як приклад комбінованих процесів - процес виробництва різних виробів з тіста. Перша стадія - приготування тіста- здійснюється періодично, а друга - випічка виробу - може здійснюватися безперервно.

*Класифікація за зміною параметрів процесу в часі.*  
Визначальними параметрами процесів харчових виробництв є температура, швидкість, концентрація, консистенція продукту і багато інших. Залежно від зміни цих параметрів всі процеси поділяють на сталі (стаціонарні) і несталі (нестаціонарні). У стаціонарних процесах значення кожного з параметрів є постійними в часі і залежать лише від положення даної точки системи в просторі. У загальному вигляді це можна представити таким чином:

$$П = П(x, y, z), \quad (1.1)$$

де  $П$  - будь який параметр системи, що бере участь в процесі;  
 $x, y, z$  - координати системи.

У нестаціонарних процесах параметри залежать не тільки від положення даної точки системи в просторі, але і від часу:

$$П = f(x, y, z, t), \quad (1.2)$$

де  $t$  - час процесу.

Узагальнюючи, можна сказати, що переважна більшість періодичних процесів відносяться до нестаціонарних.

Як правило, безперервні процеси є стаціонарними, оскільки в кожен момент часу в кожній конкретній точці системи параметри процесу

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
залишаються постійними.

*Класифікація за кінетичними закономірностями.* У загальному вигляді кінетичні закономірності характеризуються наступною залежністю: швидкість процесу прямо пропорційна рушійній силі і обернено пропорційна опору. Це положення може бути представлене у вигляді загального рівняння

$$I = x/R = Kx, \quad (1.3)$$

де  $I$  - швидкість процесу;

$R$  - опір;

$K$  - провідність (величина, обернена опору);

$x$  - рушійна сила процесу.

Всі процеси хімічної, харчової технології, а також технології продуктів громадського харчування можна поділити на сім класів.

*Гідромеханічні процеси.* До них відносяться ті процеси, які протікають в рідинних або газових системах під зовнішньою дією. Швидкість цих процесів зумовлюється законами гідро- і аеродинаміки.

Рушійною силою гідромеханічних процесів є перепад тисків:

$$X_r = \Delta P.$$

*Механічні процеси* описуються законами механіки твердих тіл. Рушійною силою механічних процесів є різниця зусиль в різних точках оброблюваного об'єкту:

$$X_M = \Delta F.$$

*Теплові процеси.* До них відносяться процеси, швидкість яких описується законами теплопередачі. Рушійна сила теплових процесів — різниця температур:

$$X_T = \Delta t.$$

*Масообмінні процеси,* які часто називають дифузійними, характеризуються перенесенням одного або декількох компонентів початкової речовини з однієї фази в іншу. Наприклад, під час сушіння матеріалів вода переходить в пару, яка, у свою чергу, поступає в

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
сушильний агент і навколишнє середовище. Рушійна сила різноманітних масообмінних процесів є різницею концентрацій:

$$X_{MO} = \Delta C.$$

*Хімічні процеси (реакційні)* описуються законами хімічної кінетики.

*Мікробіологічні процеси* описуються біологічними законами життєдіяльності мікроорганізмів. Прикладами можуть служити процес приготування дріжджового тіста, процеси сквашування молока, квашення капусти тощо.

*Електрофізичні процеси* протікають під впливом електричного струму. Рушійною силою цих процесів є різниця потенціалів:

$$X_{\text{эф}} = \Delta U.$$

Хімічні, мікробіологічні і електрофізичні процеси в курсі дисципліни «Процеси і апарати харчових виробництв» не розглядаються.

У навчальному посібнику більш повно розглянуто такі класи процесів: гідромеханічні, механічні, теплові, масообмінні та гідравлічні. Кожен з цих класів можна поділити на підкласи, групи і види, хоча подальша деталізація класифікації носить умовний характер (див. табл. 1.1).

Ця умовність пояснюється тим, що часто неможливо відокремити один процес від іншого, оскільки вони протікають одночасно. Прикладом може служити процес варіння: це, безумовно, тепловий процес, але одночасно він і масообмінний, оскільки при варінні окремі компоненти продуктів переходять у воду.

Умовність класифікації пояснюється і тим, що часто окремі процеси характеризуються одночасно ознаками і законами, пов'язаними з різними явищами природи. При цьому деякі процеси, хоча і виділені в різні класи, можуть бути об'єднані загальними закономірностями їх фізичної суті. Так, загальні фізичні закономірності лежать в процесах перемішування, диспергування, розділення рідких і твердих систем.

Окрім перерахованих класифікацій харчових виробництв, всі

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
технологічні процеси можуть бути поділені на специфічні, характерні лише для даного виду виробництва, і загальні, які зустрічаються в багатьох харчових і хімічних виробництвах.

*Таблиця 1.1*

Умовна класифікація основних процесів харчових виробництв

1	2	3
1. Гідромеханічні процеси	1.1. Утворення неоднорідних рідинних систем	1.1.1. Перемішування 1.1.2. Диспергування 1.1.3. Піноутворення 1.1.4. Псевдорозрідження 1.1.5. Руйнування і видалення неоднорідних шарів
	1.2. Розділення неоднорідних рідинних систем	1.2.1. Відстоювання 1.2.2. Фільтрування 1.2.3. Центрифугування
	1.3. Розділення неоднорідних газових систем	1.3.1. Осаджування під дією сили тяжіння 1.3.2. Фільтраційне осадження 1.3.3. Циклонне осадження 1.3.4. Електроосадження
2. Механічні процеси	2.1. Утворення однорідних і неоднорідних твердих пластичних і сипких систем	2.1.1. Подрібнення 2.1.2. Перемішування 2.1.3. Пресування
	2.2. Розділення неоднорідних твердих і сипких систем	2.2.1. Розділення неоднорідних багатокомпонентних систем з отриманням однокомпонентних 2.2.2. Класифікація (розділення) неоднорідних систем за розмірами компонентів
3. Теплові процеси	3.1. Без зміни агрегатного стану	3.1.1. Нагрівання 3.1.2. Охолодження

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

	3.2. Зі зміною агрегатного стану	3.2.1. Конденсація 3.2.2. Пароутворення (кипіння, випаровування, згущення) 3.2.3. Заморожування - розморожування 3.2.4. Плавлення-затвердіння.
4. Масообмінні процеси	4.1. Сорбційні	4.1.1. Абсорбція 4.1.2. Адсорбція
	4.2. Інші	4.2.1. Перегонка (ректифікація) 4.2.2. Екстрагування 4.2.3. Розчинення 4.2.4. Кристалізація 4.2.5. Сушіння

*Специфічні процеси* пов'язані і обумовлені їх цільовим призначенням. Так, найбільш характерними специфічними тепловими процесами, що мають певне цільове призначення, є пастеризація і стерилізація. При цих процесах нагрівання продуктів пов'язаний не тільки з підвищенням їх температури, але і з тим, щоб подавити життєдіяльність мікроорганізмів і знищити їх.

До *загальних процесів* можуть бути віднесені перемішування, нагрівання, охолодження, конденсація і т. д.

### **1.2. Механічні процеси**

#### **1.2.1. Подрібнення твердих матеріалів**

Ефективним способом подрібнення твердих матеріалів є ударне руйнування. Машини ударної дії мають кращі технологічно-економічні показники в порівнянні з машинами іншого принципу дії. Серед машин ударної дії найбільш перспективними є молоткові дробарки, які використовуються в тих випадках, коли на одному ступені подрібнення необхідно отримати високодисперсну суміш подрібнених частинок.

### Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Молоткові дробарки добре подрібнюють крихкі матеріали (зерно, сіль, цукор і ін.) і менш ефективні при подрібненні вологих матеріалів і продуктів з високим вмістом жиру. Найбільше розповсюдження отримали дробарки з вільно підвішеними молотками. Молотки повинні переміщуватись з такою коловою швидкістю, при якій забезпечується первинне руйнування матеріалу в момент удару по ньому молотків. Цю необхідну швидкість можна визначити приблизно, виходячи з закону кількості руху:

$$P\tau = m(W_2 - W_1), \quad (1.4)$$

де  $m$  - маса частинки, яка підлягає подрібненню, кг;

$W_2$  - швидкість частинки після удару по молотку, м/с;

$W_1$  - швидкість частинки до удару по молотку, м/с;

$P$  - сила удару, необхідна для первинного руйнування частинки, Н;

$\tau$  - тривалість удару, яка може дорівнювати  $10^{-5}$  мс.

Оскільки  $W_1$  значно менше  $W_2$ , то можна прийняти  $P\tau = mW_2$ .

Ефективність подрібнення молоткових дробарок оцінюється ступенем подрібнення, продуктивністю, питомою витратою енергії при проведенні процесу.

Ступенем подрібнення  $i$  називається відношення середнього розміру частинок початкового діаметру  $D_{cp}$  до середнього розміру частинок подрібненого продукту  $d_{cp}$ :

$$i = D_{cp} / d_{cp}, \quad (1.5)$$

Продуктивність молоткових дробарок залежить не тільки від виду і властивостей матеріалу, але і від числа обертів валу, на якому кріпляться молотки, розмірів дробарки і решітки на виході з дробарки. Продуктивність молоткових дробарок  $Q$  визначається за формулою

$$Q = K_T \rho \cdot D_p \cdot L_n, \quad (1.6)$$

де  $K_T$  - емпіричний коефіцієнт, який залежить від типу і розмірів отворів решітки, фізико-механічних властивостей сировини і конструктивних особливостей молоткових дробарок;

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

$\rho$  - густина подрібненого матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

$D_p$  - діаметр ротора дробарки, м;

$L$  - довжина ротора дробарки, м;

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

Споживана потужність електродвигуна дробарки  $N$  на процес подрібнення визначаємо за формулою

$$N = K_1 K_2 D_p^2 n, \quad (1.7)$$

де  $K_2$  - емпіричний коефіцієнт, який залежить в основному від отриманого ступеня подрібнення і фізико-механічних властивостей подрібнюваного матеріалу, кВт.с/кг.

Значення емпіричних коефіцієнтів  $K_1$ ,  $K_2$  наступні: для сит з діаметром отворів до 3 мм  $K_1$  дорівнює  $3,6 \cdot 10^{-5}$  -  $4,7 \cdot 10^{-5}$ ; для лускоподібних сит з діаметром отворів від 4-5 до 10 мм значення  $K_1 = 6,0 \cdot 10^{-5}$  -  $10,5 \cdot 10^{-5}$  (меншого значення коефіцієнта  $K_1$  набувають для сит з меншим розміром отворів);  $K_2$  дорівнює 2,0 - 4,0 (меншого значення коефіцієнта  $K_2$  набувають при крупному помелі, а більшого - при дрібному помелі).

Часто механічне подрібнення здійснюють на молоткових дробарках (рис. 1.1). Дробарка працює від електродвигуна, на валу якого закріплені молотки, що обертаються в робочій камері, в якій відбувається подрібнення. Матеріал з бункера поступає в робочу камеру дробарки, де в результаті ударної дії молотків і стирання матеріалу при русі в кільцевому шарі, що обертається, об стінки робочої камери дробарки відбувається інтенсивне руйнування. Матеріал знаходиться в зоні подрібнення до тих пір, поки частинки його не пройдуть через змінну решітку, яку встановлюють в нижній частині дробарки. Подрібнений матеріал збирається в ємкість. Змінюючи розміри отворів решітки, регулюють подрібнення роздробленого продукту. При вивантаженні ємкості відгвинчують пробку і отриманий продукт через патрубок поступає в ємкість для готового продукту.

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

При роботі дробарки через бункер всмоктується повітря. Воно проходить через решітку в збірну ємність, з якої віддаляється через пилефільтруючий рукав.

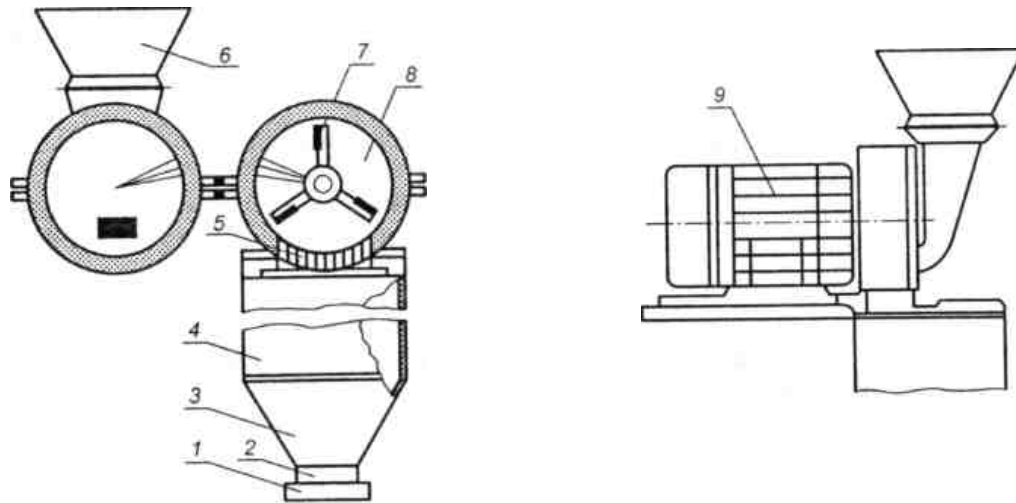


Рис. 1.1. Схема молоткової дробарки:

1- пробка; 2- патрубок; 3 - ємність; 4- пилефільтруючий рукав;  
5- змінні решітки; 6- бункер; 7- молотки; 8 –робоча камера;  
9- електродвигун.

### **1.2.2. Визначення дисперсності сипких матеріалів**

Для визначення середнього розміру частинок до і після подрібнення середню пробу матеріалу просівають через набір сит з отворами різних розмірів і отримують декілька фракцій. Для кожної фракції знаходять середній розмір частинок фракції як напівсуму розмірів отворів в ситі, через яких пройшли частинки і на яких частинки залишилися:

$$d_{cp} = (d_{i-1} + d_2)/2. \quad (1.8)$$

Практичним шляхом розмір максимальних частинок визначається розміром отворів сита, через які проходить весь матеріал даної фракції, а розмір мінімальних частинок — розміром отворів сита, на якому дана фракція матеріалу знаходиться.

Середній розмір частинок в суміші визначають за формулою

$$d_i^{\phi} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (x_i / d_{cp_i})}, \quad (1.9)$$

де  $d_{cp1} \dots d_{cpn}$  - середній розмір частинок кожної фракції;

$x_1 \dots x_n$  - відносний масовий вміст кожної фракції в суміші.

$$X_i = \frac{G_i}{\sum_{i=1}^n G_i}, \quad (1.10)$$

де  $G_i$  - маса залишку на ситі  $i$ .

Еквівалентний діаметр частинки для полідисперсного шару, що складається з частинок різного діаметру, розраховується за формулою

$$d_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (x_i / d_i)}, \quad (1.11)$$

де  $n$  - число фракцій;  $d_i = (d_{i-1} + d_i) / 2$  - середній ситовий розмір  $i$ -фракції, м;  $d_{i-1}$  - розмір прохідного сита, м;  $d_i$  - розмір непрохідного сита, м;

$x_i = M_i / \sum_{y=1}^n M_y$  - масова частка матеріалу в  $i$ -фракції;  $M_i$  - маса матеріалу, що залишилася на ситі  $i$ , кг.

### 1.3. Гідромеханічні процеси

#### 1.3.1. Перемішування в рідких середовищах

Одним з типових гідромеханічних процесів є перемішування. Перемішування — це процес багатократного переміщення макрооб'ємів текучого середовища один відносно одного у всьому об'ємі апарату, які протікають за рахунок імпульсу, що передається середовищу механічною мішалкою, струменем рідини або газу.

Процес перемішування широко використовується в харчовій промисловості при приготуванні суспензій, емульсій, для інтенсифікації процесів нагрівання і охолодження оброблюваних систем, а також для інтенсифікації процесів масообміну в перемішуваному середовищі.

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Найбільше розповсюдження в даний час отримали механічні мішалки різних типів (лопатеві, пропелерні, турбінні, якірні, шнекові). При перемішуванні такими мішалками виникає складний тривимірний рух середовища, яке перемішується. Основним є тангенціальний рух, який викликає в об'ємі апарату радіальні і аксіальні потоки. Складний характер руху середовища в апараті не дозволяє отримати аналітичний опис процесу, тому при сталому режимі для цього використовують різні критеріальні рівняння, отримані методами теорії подібності.

Важливою характеристикою роботи будь-якої механічної мішалки є витрата енергії на обертання робочого елемента при відомих розмірах мішалки і заданих фізичних властивостях середовища. Потужність, споживана мішалками, залежить від багатьох чинників. Методи і розрахункові формули, прийняті в даний час для визначення потужності, ще не можуть вважатися достатньо повними. Ця обставина обумовлює необхідність проведення експериментальних досліджень, на основі яких отримують необхідні критеріальні рівняння.

Процес перемішування з гідродинамічної точки зору може бути розглянутий як процес зовнішнього обтікання тіла потоком в'язкої рідини, отже, можна отримати загальне критеріальне рівняння, яке описує процес:

$$Eu_M = f(Re_M, Fr_M, \Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_K), \quad (1.12)$$

де  $Eu_M = N / \rho n^3 d^5$  - критерій Ейлера для перемішування (визначальний критерій);

$Re_M = \rho n d^2 / \mu$  - критерій Рейнольдса для перемішування (визначальний критерій);

$Fr_M = n^2 d / g$  - відцентровий критерій Фруда (визначальний критерій);

$\rho$  - густина перемішуваного середовища, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu$  - коефіцієнт динамічної в'язкості середовища, Пас;  $g$  - прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$d$  - діаметр робочого елемента мішалки, м;

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

$n$  - частота обертання мішалки, об/с;

$N$  - потужність, споживана мішалкою при сталому режимі, Вт;

$\Gamma_1 = H/d$  - симплекс геометричної подібності;

$\Gamma_2 = D/d$  - симплекс геометричної подібності;

$H$  - рівень середовища в апараті, м;

$D$  - діаметр апарату, м.

Таким чином, узагальнена залежність для визначення потужності на валу мішалки за умови геометричної подібності матиме вигляд

$$Eu_M = c Re_M^k Fr_M^m, \quad (1.13)$$

де  $c, k, m$  — величини, які визначаються експериментально.

У випадках, коли на поверхні середовища не утворюється воронка (наприклад, при установці відбивних перегородок або при зануренні робочого елемента мішалки на достатню глибину), впливом сили тяжіння можна нехтувати і з рівняння виключити критерій Фруда. Тоді узагальнене рівняння для визначення потужності, яку споживає мішалка, набере вигляду

$$Eu_M = c Re_M^k \quad (1.14)$$

звідки

$$N = (\rho n^3 d^5) c Re_M^k \quad (1.15)$$

### **1.3.2. Псевдозрідження**

Для інтенсифікації процесів тепло- і масообміну, процесів змішування сипких матеріалів, агломерації, гранулювання і інших процесів широко використовуються апарати з псевдозрідженим шаром (ПШ) зернистого матеріалу (зважений, киплячий шар).

Якщо через нерухомий шар матеріалу, який лежить на решітці (рис. 1.2), пропустити знизу вгору потік зріджуючого агента (рідина або газ), то стан шару визначатиметься швидкістю зріджуючого агента, віднесеного до повного поперечного перерізу порожнього апарату:

$$\omega = V/f_a \quad (1.16)$$

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

де  $V$  -об'ємна витрата зріджуючого агента, м<sup>3</sup>/с;

$f_a = \pi d^2/4$  - площа поперечного перерізу апарату, м<sup>2</sup>;

$d$  — діаметр поперечного перерізу апарату, м.

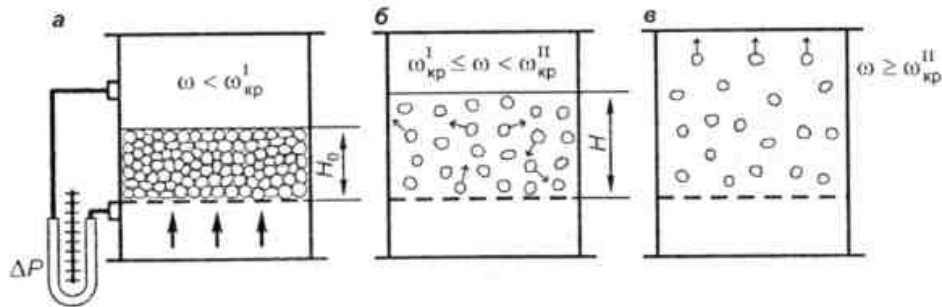


Рис. 1.2. Структура шару залежно від швидкості зріджувального агента: а - нерухомий шар; б - псевдозріджений шар; в - віднесення частинок з апарату.

Всі розрахунки за визначенням параметрів псевдозрідженого шару ґрунтуються саме на використанні швидкості зріджуючого агента. Це пов'язано з тим, що виміряти дійсну швидкість повітря в проміжках між твердими частинками важко:

$$\omega^3 \geq \omega_{кр}^{II} \cdot H_0.$$

При швидкостях потоку нижче першої критичної  $\omega_{кр}^I$  (швидкість початку псевдозрідження) шар залишається нерухомим шаром (НШ). Зріджувальний агент рухається через шар в режимі фільтрації.

При досягненні зріджуючим агентом першої критичної швидкості  $\omega_{кр}^I$  шар переходить в псевдозріджений шар (ПШ). При цьому тверді частинки починають переміщуватися в шарі. Подальше збільшення швидкості приводить до збільшення висоти шару (шар розширюється).

При досягненні зріджуючим агентом другої критичної швидкості  $\omega_{кр}^{II}$  (швидкість віднесення) шар руйнується, а частинки в режимі

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
пневмотранспорту виносяться з апарату.

Розширення ПШ характеризується порозністю  $\varepsilon$ , яка визначається як відношення об'єму порожнин  $V_{п}$  в шарі до об'єму всього шару  $V_{сл}$ :

$$\varepsilon = \frac{V_{п}}{V_{сл}} = \frac{V_{сл} - V_{Т}}{V_{сл}} = 1 - \frac{V_{Т}}{V_{сл}}, \quad (1.17)$$

де  $V_{Т}$  - об'єм, твердих частинок в шарі, м<sup>3</sup>;

$V_{сл} = f_a H$  - об'єм шару, м<sup>3</sup>;

$H$  - висота псевдозрідженого шару, м.

Відомо, що порізність нерухомого шару твердих частинок однакового діаметру складає приблизно 0,4. В процесі псевдозрідження об'єм залишається величиною постійною, отже, його можна визначити за параметрами нерухомого шару:

$$V_{Т} = f_a H_0 (1 - \varepsilon), \quad (1.18)$$

де  $H_0$  - висота нерухомого шару частинок, м.

Підставивши (1.18) в (1.17), можна отримати формулу для розрахунку порізності за зміряними значеннями висот шару:

$$\varepsilon = 1 - \frac{f_a H_0 (1 - \varepsilon_0)}{f_a H} = 1 - (1 - \varepsilon_0) \frac{H_0}{H}, \quad (1.19)$$

З формули (1.18) видно, що із збільшенням швидкості зріджуючого агента порізність шару росте. При швидкості віднесення, граничній для псевдозрідженого шару, можна вважати, що  $V_{сл} \geq VT$ , отже,  $\varepsilon = 1$ . Таким чином, псевдозріджений шар може існувати в межах від  $\varepsilon = \varepsilon_0 = 0,4$  ( $\omega < \omega_{кр}^1$ ) до  $\varepsilon = 1$  ( $\omega \geq \omega_{кр}^1$ ).

З деяким наближенням ці межі можна прийняти і для частинок неправильної форми.

Шар твердих частинок є для зріджувального агента гідравлічним опором, отже, диференційним манометром (див. рис. 1.2) можна виміряти перепад тиску, що виникає при русі зріджуючого агента через цей шар.

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

На рис. 1.3 показані графіки типових змін гідравлічного опору шару  $\Delta P$  і порозності  $\epsilon$ .

У момент початку псевдозрідження вага зернистого матеріалу, що припадає на одиницю площі поперечного перетину апарату, врівноважується силою гідравлічного опору шару:

$$\Delta P_c = G_c / f_a , \quad (1.20)$$

де  $G_c$  — вага матеріалу в шарі,  $H$ .

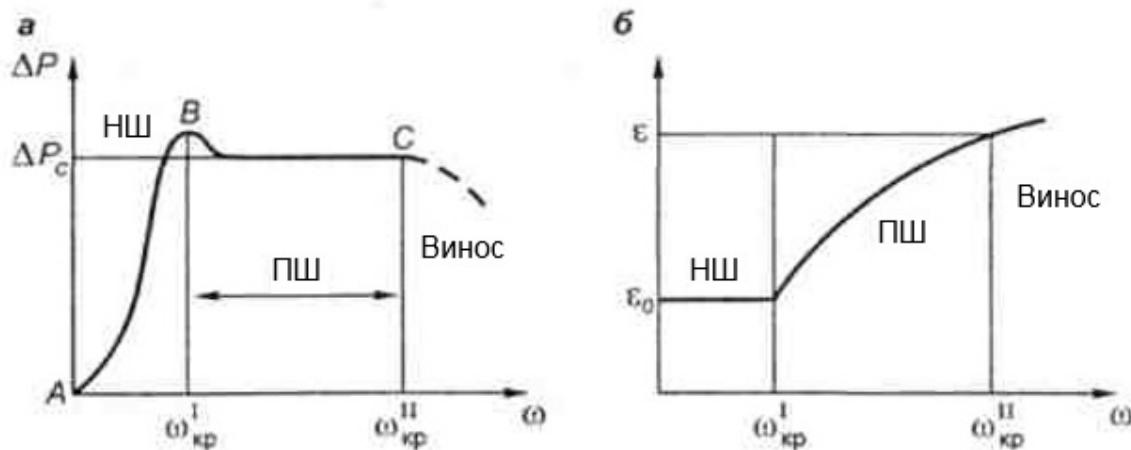


Рис. 1.3. Залежності: а-  $\Delta P = f(\omega)$ ; б-  $H = f(\omega)$

З урахуванням архімедових сил, використовуючи формули (1.13) і (1.15), отримаємо

$$\Delta P_c = gH_0(\rho_q - \rho_c) \cdot (1 - \epsilon_0). \quad (1.21)$$

Оскільки опір ПШ залишається величиною постійною, то його можна визначити за формулою (1.21) для будь-якого значення  $\epsilon$ :

$$\Delta P_c = gH(\rho_q - \rho_c) \cdot (1 - \epsilon_0). \quad (1.22)$$

Якщо  $\rho_q \gg \rho_c$  (наприклад, система «газ — тверді частинки»), то формулу (1.22) можна записати так:

$$\Delta P_c = gH_0\rho_q(1 - \epsilon_0). \quad (1.23)$$

З графіка (рис. 1.3) видно, що гідравлічний опір псевдозрідженого шару залишається величиною постійною і не залежить від швидкості зріджуючого агента. Ця постійність обумовлена тим, що до частинок, які

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
знаходяться в зваженому стані, застосовується наступне співвідношення:

$$G = R + A,$$

де  $R = \xi \frac{\rho_c \omega_g^2}{2} f$  - сила опори твердої частинки, Н;

$G = mg = V_c \rho_c g$  - сила тяжіння, Н;

$A = V_c \rho_c g$  - сила Архімеда, Н;

$\xi$  - коефіцієнт опору твердої частинки (залежить від режиму обтікання);

$f$  - площа поперечного перетину частинки, м<sup>2</sup>;

$m$  - маса частинки, кг;

$\rho_c$  - густина чекаючого агента, кг/м<sup>3</sup>;

$V_c$  - об'єм твердої частинки, м<sup>3</sup>;

$\rho_c$  - густина твердих частинок, кг/м<sup>3</sup>;

$\omega_g = \omega/\varepsilon$  - дійсна швидкість зріджувального агента в проміжках між частинками, м/с.

Таким чином

$$R = G - A, \quad (1.24)$$

Звідки

$$\xi \frac{\rho_c \omega_g^2}{2} f = V_c g (\rho_c - \rho_c). \quad (1.25)$$

Поділивши праву і ліву частини рівняння (1.25) на  $f$  і підставивши в нього значення  $\omega_g$ , отримаємо

$$\xi = \frac{\rho_c \omega^2}{2\varepsilon^2} = \frac{V_c g (\rho_c - \rho_c)}{f}, \quad (1.26)$$

або, при  $\rho_c \gg \rho_c$ :

$$\Delta P = \frac{V_c g \rho_c}{f} = \frac{mg}{f}. \quad (1.27)$$

З формули (1.27) виходить, що перепад тиску, який виникає при псевдозрідженні твердої частинки, дорівнює масі частинки, що ділиться на площу поперечного перетину частинки. Отже, коли всі частинки шару

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
 перейдуть в псевдозріджений стан, перепад тиску складе

$$\Delta P = G_c / f_a \quad (1.28)$$

де  $G_c$  - вага частинок шару, Н.

З рівнянь (1.27) і (1.28) видно, що перепад тиску для псевдозрідженого шару є величина постійна, не залежна від швидкості газу. Ця постійність для шару пояснюється тим, що при підвищенні витрати зріджуючого агента відбувається одночасне збільшення порізності шару, а отже, дійсна швидкість зріджуючого агента між частинками залишається величиною постійною.

Розрахунок критичних швидкостей для псевдозрідженого шару проводиться з використанням залежності між критеріями Лященко і Архімеда (див. рис. 1.4):

$$Ly = f(Ar), \quad (1.29)$$

де  $Ly = \frac{\omega^3 \rho_c^2}{\mu_c (\rho_x - \rho_c) g}$  - критерії Лященко;

$Ar = \frac{d^3 \rho_c (\rho_x - \rho_c) g}{\mu_c^2}$  - критерії Архімеда;

$\mu_c$  — динамічний коефіцієнт в'язкості, Па.с.

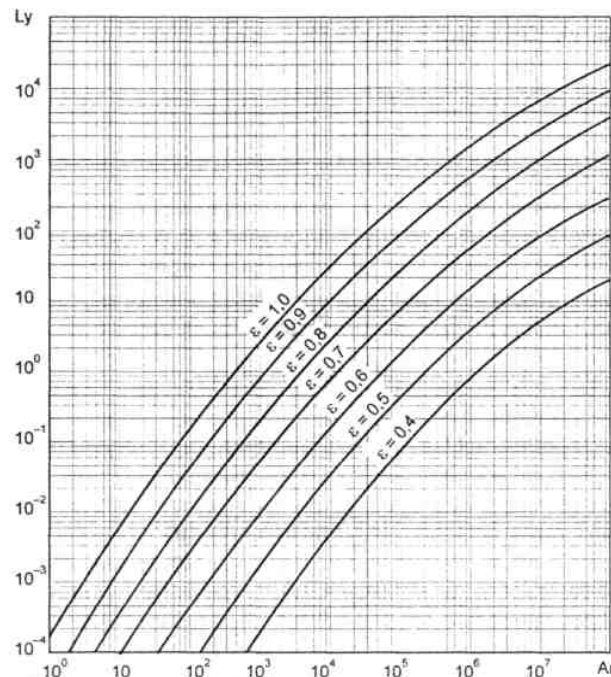


Рис. 1.4. Залежність критерію  $Lu$  від критерію  $Ar$  і порізності шару  $\varepsilon$

Для розрахунку критичних швидкостей можна застосовувати формулу Тодеса, отриману з аналізу експериментальних даних:

$$Re = \frac{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,61\sqrt{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}}, \quad (1.30)$$

де  $Re = \frac{\omega d_c \rho_c}{\mu_c}$  - критерій Рейнольдса.

Розрахунок швидкості початку псевдозрідження ( $\varepsilon = \varepsilon_0 = 0,4$ ):

$$Re_{kp}^1 = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}}, \quad (1.31)$$

де  $Re_{kp}^1 = \frac{\omega_{kp}^I d_c \rho_c}{\mu_c}$

Розрахунок швидкості віднесення ( $\varepsilon = 1$ ):

$$Re_{kp}^2 = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}}$$

де  $Re_{kp}^2 = \frac{\omega_{kp}^{II} d_c \rho_c}{\mu_c}$ .

Для частинок неправильної форми замість  $d_c$  використовується еквівалентний діаметр  $d_e$ . Еквівалентний діаметр  $d_e$  для частинок неправильної форми розраховують як діаметр умовної кулі  $d_{ш}$ , об'єм якої  $V$  дорівнює об'єму реальної частинки, помноженому на коефіцієнт форми  $\varphi$ :

$$d_e = d_{ш} \varphi, \quad (1.33)$$

де  $d_{ш} = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}$  - діаметр умовної кулі, м;

$\varphi = f_{ш} / f_p = \frac{\pi d_{ш}^2}{f_p}$  — чинник форми;

$f_p$  - поверхня реальної частинки, м<sup>2</sup>.

Коефіцієнт форми розраховується як відношення поверхні частинки

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
з діаметром  $d_{ш}$  до поверхні реальної частинки, причому коефіцієнт форми завжди менший або дорівнює одиниці.

Для полідисперсного шару, що складається з частинок різного діаметру

$$d_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (x_i / d_i)}, \quad (1.34)$$

де  $n$  - число фракцій;

$d_i$  - середній ситовий розмір  $i$ -фракції, м;

$x_i = M_i / \sum_{\gamma=1}^n M_\gamma$  — масова частка матеріалу в  $i$ -фракції.

## 1.4. Теплообмінні процеси

### 1.4.1. Нагрівання і охолодження рідких систем

На підприємствах харчової промисловості одним з найбільш поширених процесів є теплова обробка продуктів.

Залежно від характеру і мети технологічного процесу теплова обробка повинна забезпечувати підтримування температури продукту на певному рівні, а також його нагрівання або охолодження.

Для сталого процесу переходу теплоти застосовується загальне рівняння теплопередачі:

$$Q = kF\Delta t_{cp}, \quad (1.35)$$

де  $Q$  - кількість теплоти, що подається, Вт;

$k$  - коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>К);

$F$  - поверхня теплообміну, м<sup>2</sup>;

$\Delta t_{cp}$  - середня різниця температур між середовищами.

Середню різницю температур розраховують за формулою

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\sigma} - \Delta t_m}{2,31g \left( \frac{\Delta t_{\sigma}}{\Delta t_m} \right)}, \quad (1.36)$$

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

де  $\Delta t_{\delta}$  і  $\Delta t_M$  - більша і менша різниці температур між середовищами.

Якщо відношення  $\Delta t_{\delta}/\Delta t_M \leq 2$ , то з достатньою точністю замість теоретичної можна застосовувати простішу формулу:

$$\Delta t_{cp} = (\Delta t_{\delta} + \Delta t_M) / 2. \quad (1.37)$$

Коефіцієнт теплопередачі визначається за формулою

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (1.38)$$

де  $\alpha_1$ - коефіцієнт тепловіддачі від гарячого середовища до стінки, Вт/(м<sup>2</sup>К);

$\beta$ - товщина стінки, м;

$\lambda$ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки, Вт/(м. К);

$\alpha_2$ - коефіцієнт тепловіддачі від стінки до холодної рідини, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

При русі середовища всередині труб коефіцієнт тепловіддачі розраховують по одній з наступних формул:

а) при турбулентному режимі ( $Re > 10\,000$ )

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_{СТ}} \right)^{0,25} \quad (1.39)$$

б) при перехідному режимі ( $10\,000 > Re > 2320$ )

$$Nu = 0,008 Re^{0,9} Pr^{0,43}; \quad (1.40)$$

в) при ламінарному режимі ( $Re < 2320$ )

$$Nu = 0,17 Re^{0,33} Pr^{0,43} Gr^{0,1} \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_{СТ}} \right)^{0,25} \quad (1.41)$$

При русі середовища в міжтрубному просторі кожухотрубного теплообмінника за відсутності перегородки

$$Nu = 1,16 d_3 Re^{0,6} Pr^{0,23}, \quad (1.42)$$

де  $d_3 = \frac{D_e^2 - nd_n^2}{nd_n}$  - еквівалентний діаметр міжтрубного простору, м;

$D_e$ - внутрішній діаметр кожуха теплообмінника, м;

$d_n$ - зовнішній діаметр внутрішньої труби, м;

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

$n$ - число труб.

При експлуатації теплообмінних апаратів втрати теплоти  $Q_{\text{п}}$  стінками апарату в навколишнє середовище відбуваються як за рахунок теплового випромінювання, так і за рахунок конвекції:

$$Q_{\text{п}} = \alpha_{\text{с}} F(t_{\text{см}} - t_{\text{в}}), \quad (1.43)$$

де  $F$ -зовнішня поверхня апарату,  $\text{м}^2$ ;

$t_{\text{см}}$  - температура зовнішньої стінки апарату  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{\text{в}}$ - температура навколишнього повітря  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\alpha_{\text{с}}$  - коефіцієнт тепловіддачі,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Для апаратів з температурою зовнішньої стінки до  $150^{\circ}\text{C}$ , що знаходяться в приміщенні,  $\alpha_{\text{с}} = 9,74 + 0,07(t_{\text{см}} - t_{\text{в}})$ .

### **1.4.2. Рекуперація теплоти**

Харчові рідини під час пастеризації або стерилізації необхідно нагрівати до високої температури, а потім охолодити до порівняно низької температури. Роздільно проводити ці два процеси економічно не вигідно. Якщо гарячу рідину пустити в трубах теплообмінного апарату, а холодну подавати в міжтрубний простір, то гаряча рідина охолоне, а холодна нагріється, внаслідок чого будуть заощаджена теплота для нагріву і холод для охолодження цих рідин. Процес зворотної передачі теплоти від вже нагрітого гарячого середовища до середовища, що поступає на підігрів, з метою утилізації теплоти гарячого середовища в техніці прийнято називати регенерацією теплоти.

Кількість теплоти, що йде на стерилізацію або нагрівання без регенерації, розраховують за формулою

$$Q = mC(t_3 - t_1), \quad (1.44)$$

де  $t_3$ - температура продукту після пастеризації або стерилізації  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_1$ - температура продукту до нагрівання  $^{\circ}\text{C}$ ;

$C$  - теплоємність,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

$m$  - продуктивність апарату, кг/с.

Холодний продукт, проходячи через регенератор, нагріватиметься від температури  $t_1$  до температури регенерації  $t_2$ , яка декілька менше температури  $t_3$ .

Кількість теплоти, використовуваної в регенераторі, розраховується за формулою

$$Q_p = mc(t_2 - t_1). \quad (1.45)$$

Ефективність роботи регенератора характеризується коефіцієнтом регенерації, який представляє собою відношення кількості теплоти, використаної в регенераторі, до кількості теплоти, необхідної для нагрівання продукту від його початкової температури до температури пастеризації або стерилізації:

$$\varepsilon = \frac{Q_p}{Q} = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1}. \quad (1.46)$$

### **1.4.3. Випарювання**

Випарювання — це процес видалення при кипінні рідкого леткого компоненту з розчинів або неоднорідних рідких систем з метою збільшення концентрації нелетких компонентів.

Випарюванню піддаються однорідні розчини нелетких речовин в летючому розчиннику (наприклад, цукри або солі у воді) і неоднорідні системи — такі специфічні для м'ясної і молочної промисловості, як кров, бульйони, екстракти, молочні продукти.

Випарювання відрізняється від процесу випаровування. Випаровування відбувається з поверхні рідкої системи при будь-якій температурі, тоді як випарювання проходить у всьому об'ємі рідкої системи при температурі, відповідній температурі кипіння при даному тиску, і є інтенсивнішим процесом.

В процесі випарювання летюча складова частина системи кипить і випаровується. Кількість системи, що залишається, зменшується, а вміст

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

нелетких компонентів залишається незмінним. Таким чином, концентрація сухих речовин в ході процесу безперервно зростає.

Основним чинником, що визначає інтенсивність випарювання і продуктивність випарного апарату, є температурний перепад  $\Delta t$  — різниця між температурами теплоносія (наприклад, гріючої пари  $t_{г.п.}$ ) і температурою кипіння рідкої системи  $t_{кип.}$ :

$$\Delta t = t_{г.п.} - t_{кип.} \quad (1.47)$$

Температура кипіння розчинів завжди вища за температуру розчинників. Вона залежить від хімічної природи розчинених речовин і розчинників і зростає із збільшенням концентрації розчинів і зовнішнього тиску.

Різниця між температурою кипіння розчину  $t$  і чистого розчинника  $t_p$  при однаковому зовнішньому тиску називається температурною депресією  $\Delta_1$ , яку іноді називають фізико-хімічною депресією:

$$\Delta_1 = t - t_p \quad (1.48)$$

Поряд з температурною депресією підвищення температури кипіння розчину визначається також гідростатичною і гідравлічною депресіями.

Якщо рідина кипить всередині вертикальної трубки, то температура кипіння на поверхні буде нижча, ніж внизу кип'ятельної трубки, оскільки до тиску вторинної пари в паровому просторі додається ще гідростатичний тиск стовпа рідини.

Якщо тиск вторинної пари над розчином  $p_{в.п.}$  відомо, то з таблиць властивостей водяної пари можна знайти температуру вторинної пари  $t_{в.п.}$ .

Додаючи до тиску пари  $p_{в.п.}$  величину додаткового тиску  $\Delta p$ , отримують загальний тиск:

$$p = p_{в.п.} + \Delta p \quad (1.49)$$

Додатковий тиск приймають як середній тиск по висоті шару розчину  $H$ :

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

$$\Delta p = \frac{\rho g H}{2}, \quad (1.50)$$

де  $\rho$  - густина рідкої системи, кг/м<sup>3</sup>.

По цьому тиску з таблиць властивостей водяної пари знаходять температуру  $t$ .

Значення гідростатичної депресії:

$$\Delta_2 = t - t_{в.п.} \quad (1.51)$$

Внаслідок підвищення тиску в апараті, гідравлічних втрат при проходженні вторинної пари через пастки, сепараторів, вихідний паропровід і т.д. підвищення температури кипіння розчину називається гідравлічною депресією  $\Delta_3$ .

Таким чином, температура кипіння рідкої системи у випарному апараті визначається за формулою

$$t_{\text{кип}} = t_{в.п.} + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3, \quad (1.52)$$

де  $t_{в.п.}$  - це температура вторинної пари при тиску, що дорівнює тиску в конденсаторі випарної установки.

Такий спосіб розрахунку  $t_{\text{кип}}$  можливий тільки за умови, що відомий тиск в конденсаторі випарної установки. У іншому випадку температура кипіння розчину може бути визначена за наступною формулою:

$$t_{\text{кип}} = t_{в.п.} + \Delta_1 + \Delta_2, \quad (1.53)$$

де  $t_{в.п.}$  - температура вторинної пари у випарному апараті над розчином, відповідна його тиску.

Принцип роботи багатокорпусних випарних установок полягає в тому, що вторинна пара, отримана в першому апараті (корпусі), поступає на обігрів другого корпусу, в якому тиск в зоні кипіння має бути нижчим чим тиск вторинної пари в першому корпусі. Таким чином, випаровування в другому корпусі відбувається за рахунок використання теплоти вторинної пари з першого корпусу.

### **1.5. Масообмінні процеси**

### 1.5.1. Конвективне сушіння

Сушінням називають процес видалення вологи з вологих матеріалів шляхом її випаровування і відведення пари, яка утворилася. Найбільш поширеним способом проведення цього процесу в харчовій промисловості є конвективне сушіння, яка здійснюється при безпосередньому контакті сушильного агента (нагрітого повітря) з вологим матеріалом. Таким чином, сушильний агент є одночасно теплоносієм і середовищем, в яке переходить волога з матеріалу у вигляді пари. Властивість вологого повітря як сушильного агента визначається вмістом в ньому парів води і його температурою. Вміст водяної пари в сушильному агенті виражають через вологовміст— масу водяної пари, що доводиться на 1 кг абсолютно сухого повітря:

$$x = \rho_n / \rho_e,$$

де  $x$ - вологовміст сушильного агента, кг/кг;

$\rho_n$ - густина водяної пари, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_e$ - густина абсолютно сухого повітря, кг/м<sup>3</sup>.

Ступінь насичення повітря паром води можна визначити за відносною вологістю повітря:

$$\varphi = \rho_n / \rho_n^*,$$

де  $\varphi$ - відносна вологість повітря;

$\rho_n$ - парціальний тиск пари води в повітрі при даній температурі  $t$ ,

Па;

$\rho_n^*$ - тиск насиченої пари при тій же температурі  $t$ , Па.

При температурі повітря вище 100°C тиск насиченої пари дорівнює барометричному тиску ( $\rho_n^* = P$ ).

При  $\varphi=0$  повітря абсолютно сухе. При  $\varphi=1$  повітря повністю насичент паром води і не може використовуватися як сушильний агент.

Ентальпія (тепловміст) вологого повітря визначається кількістю

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
теплоти, що доводиться на 1 кг абсолютно сухого повітря, і виражається у вигляді суми ентальпій абсолютно сухого повітря і водяної пари:

$$i = C_{св}t + x(r_0 + C_{п}t),$$

де  $i$  - ентальпія вологого повітря, кДж/кг;

$C_{св}$  - питома теплоємність сухого повітря ( $C_{св}=1,01$  кДж/(кг·К));

$C_{п}$  - питома теплоємність пари ( $C_{п}=1,97$  кДж/(кг·К));

$r_0$  - питома теплота паротворення повітря при  $0^{\circ}\text{C}$ ;

$r_0=2493$  кДж/кг.

Після перетворень і підстановки чисельних значень формула для розрахунку ентальпії вологого повітря матиме вигляд

$$i = (1,01 + 1,97x)t + 2493x.$$

Таким чином, приведені вище формули і знання властивостей насиченої водяної пари (див. Додаток 1) дозволяють розрахувати основні параметри сушильного агента. З метою спрощення технічних розрахунків процесу сушки професор Л. К. Рамзін в 1918 р. запропонував діаграму стану вологого повітря, яка побудована з використанням приведених вище формул (діаграма побудована для барометричного тиску  $p = 9,94 \cdot 10^4$ ,  $p_a=99,4$  кПа).

На діаграмі (рис. 1.5) нанесені лінії постійних значень  $i$ ,  $x$ ,  $t$ ,  $\varphi$ . По діаграмі можна визначити парціальний тиск пари води в повітрі, температуру мокрого термометра  $t_m$ , при якій вологе повітря, охолоджуючись при  $i = \text{const}$ , досягне стану насичення ( $\varphi=1$ ); а також температуру точки роси  $t_p$ , при якій повітря, охолоджуючись при  $x=\text{const}$ , досягне стану насичення ( $\varphi=1$ ).

Для знаходження параметрів вологого повітря необхідно знати дві будь-які величини (координати точки  $M$ ). Приклад визначення основних параметрів повітря для точки  $M_2$  з координатами  $t_2 = 72^{\circ}\text{C}$  і  $\varphi = 60\%$  приведений на рис. 1.5 ( $i = 130$  кДж/кг,  $x = 0,022$  кг/кг,  $P_n = 3,33$  кПа,  $t_p = 27^{\circ}\text{C}$ ,  $t_m = 36^{\circ}\text{C}$ ).

Розпилювальні сушарки є конвективними і застосовуються в

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
харчовій промисловості для сушіння високовологих продуктів, наприклад  
молока, сироватки, замінників цільного молока, кави, фруктових і  
овочевих соків. Завдяки розвиненій поверхні випарювання і високій  
швидкості видалення вологи сушка займає мало часу. У цих умовах  
продукт не перегрівається, що забезпечує його високу якість. Схема  
однієї з таких сушарок наведена на рис. 1.6.

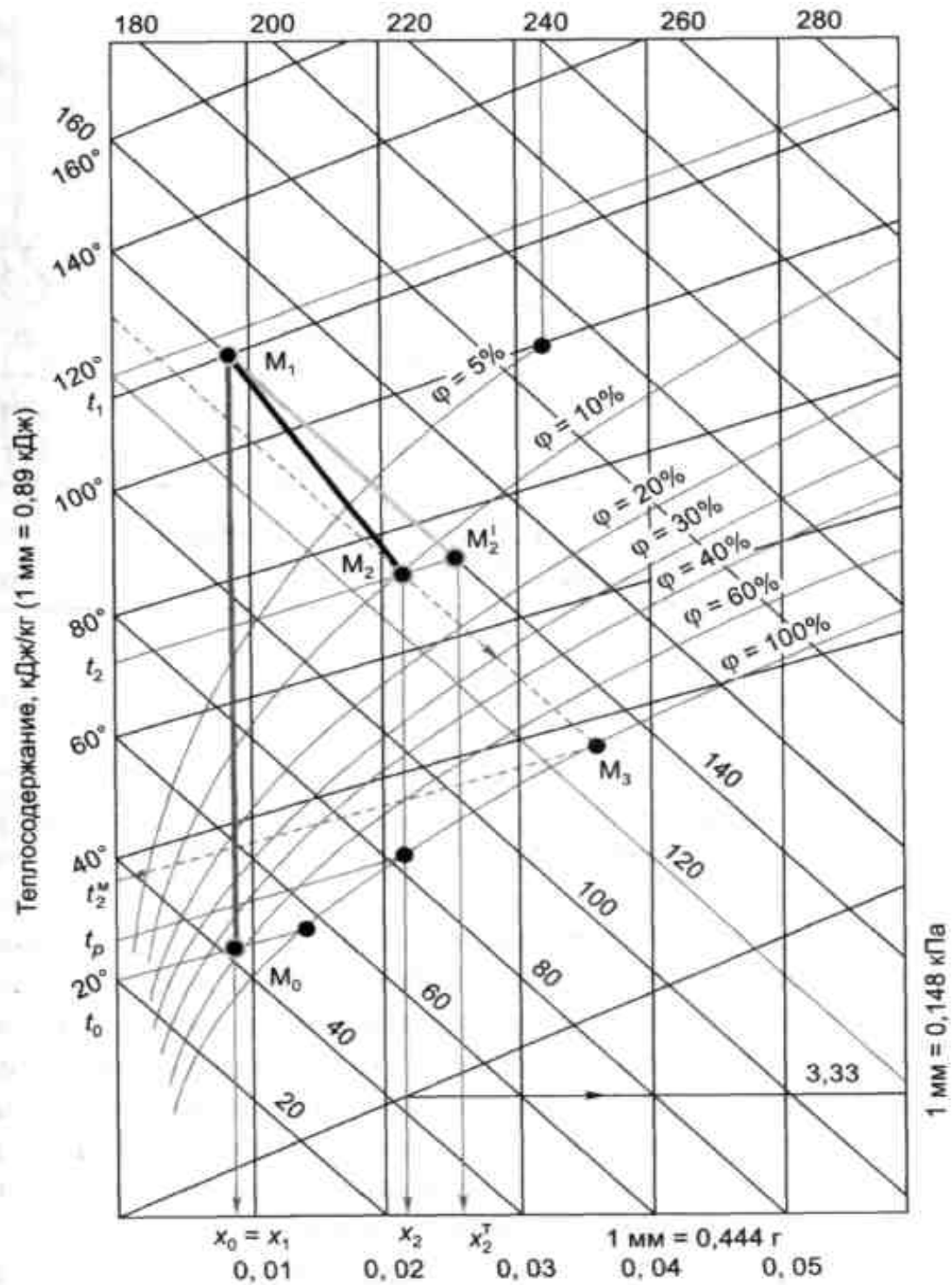


Рис. 1.5. Діаграма Рамзіна

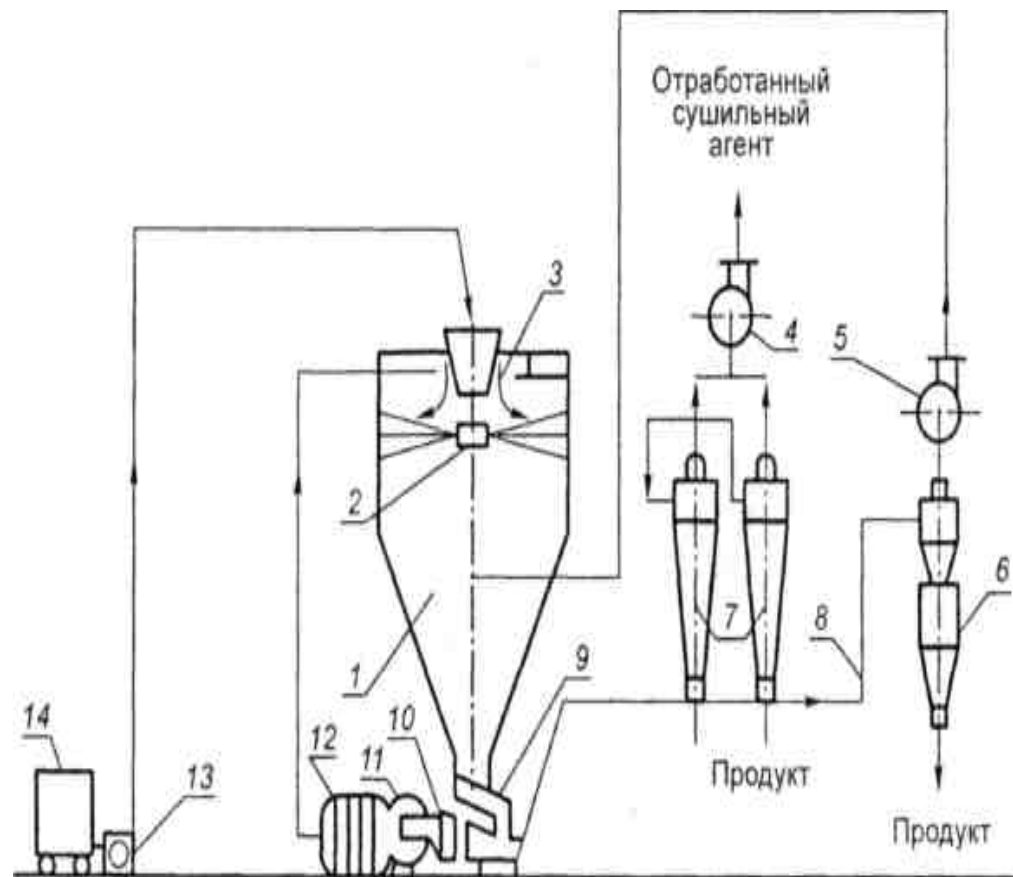


Рис 1.6. Схема промислової роспилювальної сушарки з відцентровим (дисковим) роспилювачем:

1 - сушильна камера; 2 - роспилювач; 3- повітророспилювальний пристрій; 4 - витяжний вентилятор; 5 - додатковий вентилятор; 6 - розвантажувальний циклон; 7 - циклони; 8 - пневмотранспортная лінія; 9 - вібролоток; 10 - фільтр; 11 – нагнітальний вентилятор; 12 -паровий калорифер; 13 - насос; 14 - бак.

У сушильній камері, виконаній у вигляді вертикального циліндра з конічним днищем, рідкий продукт, що безперервно поступає, диспергує на найдрібніші крапельки (до розміру  $10^{-4}$ м і менше) за допомогою швидкісного диска роспилювача. За допомогою повітророзподільного пристрою в зону роспилювання подається сушильний агент, який заздалегідь очищається від пилу фільтром і нагрівається в калорифері. За рахунок теплоти, що передається від сушильного агента до

### Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

крапельок, останні втрачають вологу і падають на днище камери у вигляді дрібних твердих частинок. Тверді частинки по конічному днищу сушильної камери зсипаються у вібралоток, звідки потрапляють на пневмотранспортну лінію, де переміщуються потоком холодного повітря. В процесі транспортування продукт охолоджується. У пневмотранспортну лінію поступає продукт з батареї циклонів, в яких здійснюється очищення відпрацьованого сушильного агента, а також повітря з пневмотранспортної лінії. Вивантаження готового продукту проводиться за допомогою розвантажувального циклону.

Циліндрові башти сушарок бувають двох видів: з плоским (порошок віддаляється з башти за допомогою спеціальних прибиральних механізмів) або з конічним дном (порошок переміщується до центрального розвантажувального отвору під дією сили тяжіння).

За способом розпилювання продукту сушарки бувають з форсунками і дисковими (відцентровими).

Розпилювальні сушарки залежно від руху повітря і частинок висушувального матеріалу можна розділити на три основні типи:

- 1) прямотечійні - напрями руху сушильного агента і частинок збігаються;
- 2) протитечійні - напрями руху сушильного агента і частинок протилежні;
- 3) зі змішаним потоком.

Залежно від властивостей висушувального матеріалу вибирають температуру сушильного агента, а також схему напрями руху сушильного агента і висушувального матеріалу. Так, наприклад, застосування протитечійних сушарок для молока недоцільно, оскільки сухі частинки молока на виході з сушильної камери зустрічаються з вхідним сушильним агентом, що може викликати перегрівання, а отже, псування продукту. В цьому випадку доцільно використовувати прямотечійні сушарки або сушарки зі змішаним потоком.

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Ефективність роботи сушильної установки можна оцінити за параметрами, що описані далі.

1. Питома витрата сушильного агента (кг сухого повітря/кг випарованої вологи)

$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{x_2 - x_0}, \quad (1.54)$$

де  $x_0$  і  $x_2$  - вологовміст сушильного агента на вході і виході з сушильної установки відповідно (кг вологи/кг сухого повітря);

$L$  - витрата сухого повітря, кг/с;

$W$  - масова витрата випарованої вологи, кг/с.

2. Питома витрата теплоти (кДж/кг випарованої вологи)

$$q = \frac{Q}{W} = \frac{i_1 - i_0}{x_2 - x_0}, \quad (1.55)$$

де  $i_0$  і  $i_1$  - ентальпії сушильного агента, відповідно, на вході в калорифер і в сушильну камеру (кДж/кг випарованої вологи).

3. Вологознімання з 1 м<sup>3</sup> робочого об'єму сушильної камери (кг випарованої вологи/1 м<sup>3</sup> сушильної камери за годину)

$$A = \frac{W}{V}, \quad (1.56)$$

де  $V$  - об'єм циліндричної частини сушильної камери, м<sup>3</sup>.

4. Тепловий ККД установки

$$\eta = r/q, \quad (1.57)$$

де  $r$  - теплота пароутворення при температурі мокрого термометра (кДж/кг випарованої вологи).

## 2. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ВІРТУАЛЬНИХ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

### 2.1. Структурна будова віртуальної лабораторної роботи

Лабораторні роботи запускаються автоматично, і на екран комп'ютера виводиться навігаційна флеш-оболонка (рис. 2.1) для вибору лабораторної роботи.

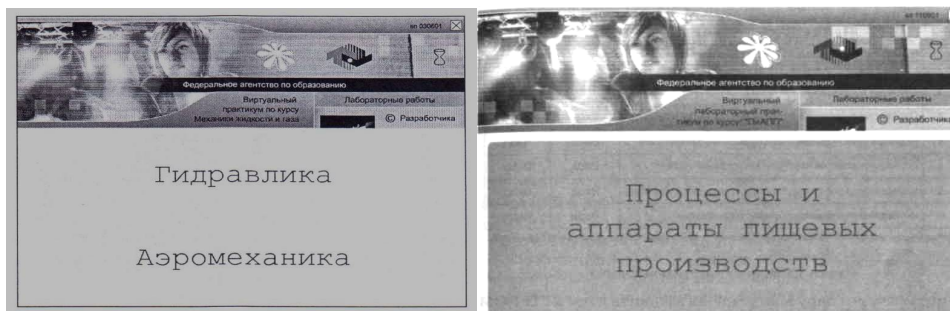
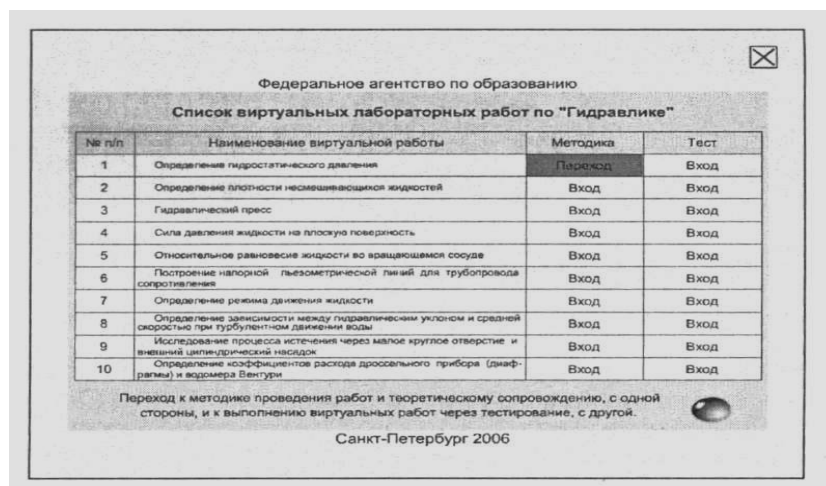


Рис 2.1. Навігаційні оболонки лабораторного практикуму з дисципліни «Процеси і апарати харчових виробництв»

Натиснувши сіру кнопку навігаційної оболонки з написом «Гидравлика Аэромеханика», або «Процессы и аппараты пищевых производств», можна перейти до панелі із списком віртуальних лабораторних робіт по даній дисципліні (рис. 2.2).



№ п/п	Наименование виртуальной работы	Методика	Тест
1	Определение гидростатического давления	Переход	Вход
2	Определение плотности несмешивающихся жидкостей	Вход	Вход
3	Гидравлический пресс	Вход	Вход
4	Сила давления жидкости на плоскую поверхность	Вход	Вход
5	Относительное равновесие жидкости во вращающемся сосуде	Вход	Вход
6	Изготовление напорной пьезометрической линии для трубопровода сопротивлением	Вход	Вход
7	Определение режима движения жидкости	Вход	Вход
8	Определение зависимости между гидравлическим уклоном и средней скоростью при турбулентном движении воды	Вход	Вход
9	Исследование процесса истечения через малое круглое отверстие и внешний ламинарный наводок	Вход	Вход
10	Определение коэффициентов расхода дроссельного прибора (диафрагмы) и водмера Венгури	Вход	Вход

Переход к методике проведения работ и теоретическому сопровождению, с одной стороны, и к выполнению виртуальных работ через тестирование, с другой.

Санкт-Петербург 2006

Рис. 2.2. Панель із списком віртуальних робіт

\*Методичні вказівки відкриваються в новому вікні, для можливості супроводу лабораторної роботи.

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Далі в списку необхідно вибрати перехід до відповідної лабораторної роботи: або відкрити сторінки з методичними вказівками до даної роботи, або, успішно виконавши тестування, безпосередньо приступити до її виконання.

Якщо натиснути на квадратну кнопку, розташовану в правому верхньому кутку, то панель із списком лабораторних робіт закриється і стане доступна панель навігаційної оболонки навчального диска (див. рис. 2.1).

Виконання віртуальних лабораторних робіт може проводитися по загальній схемі, що наведена на рис. 2.3.

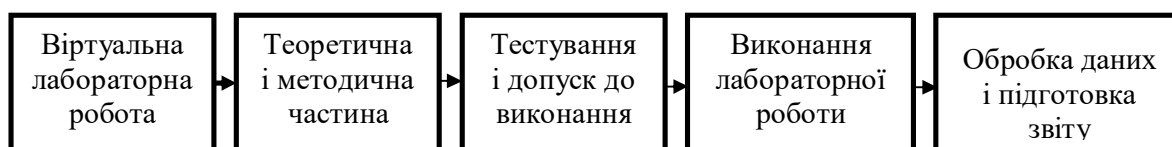


Рис. 2.3. Порядок виконання віртуальної лабораторної роботи.

Отже, спочатку слід увійти до теоретичного і методичного розділів, вивчити основи теорії даного експерименту, схематичну будову дослідної установки, порядок проведення даної лабораторної роботи, способи отримання і вимірювання дослідних даних і їх подальшої обробки - проведення розрахунків і побудови необхідних графіків. Тільки після цього можна переходити до наступного етапу (розділу).

Проте після вивчення відповідного методичного і теоретичного розділу, наприклад за допомогою даних методичних вказівок, можна відразу ж приступити до виконання вибраної лабораторної роботи, для чого достатньо натиснути кнопку «Вход» потрібного розділу тестування (рис. 2.2).

Наступний етап - віртуальне тестування і, при успішній здачі тестів,

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
отримання допуску до безпосереднього виконання роботи. Для цього необхідно правильно відповісти на всі п'ять контрольних питань з випадкової вибірки з даної тематики і набрати необхідні 25 балів, тоді в правій нижній частині тестуючого поля з'явиться кнопка «Переход к выполнению работы».

Для прикладу на рис. 2.4 приведена тестуюча програма до лабораторної роботи № 1 у тому випадку, коли на всі п'ять питань були дані правильні відповіді.

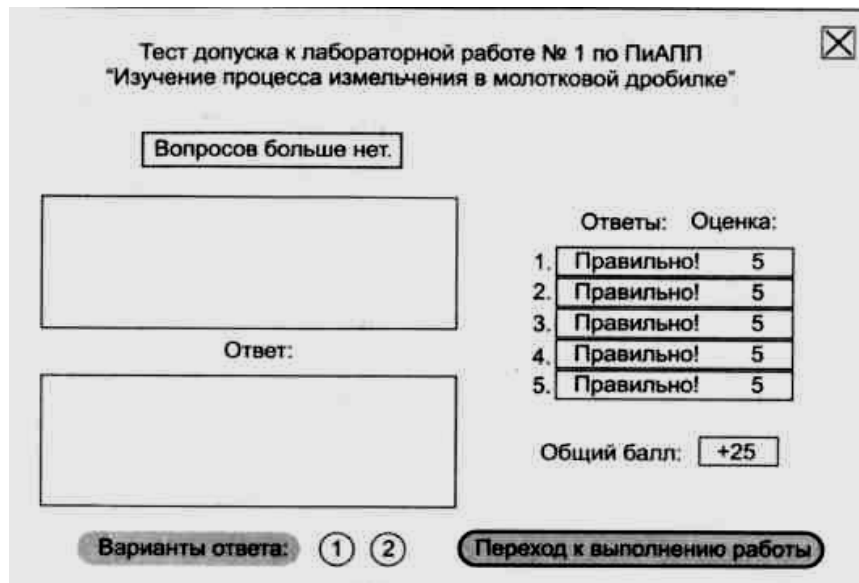


Рис. 2.4. Успішно виконана тестуюча програма

У разі невірних відповідей тестування необхідно пройти ще раз, натиснувши кнопку «Повторить?». Крім того, натисненням квадратної кнопки з хрестиком, розташованої у верхньому правому кутку вікна тестуючої програми, можна повернутися до панелі із списком робіт (рис. 2.2).

Далі слід натиснути кнопку «Переход к выполнению работы» і дочекатися закінчення завантаження її зображення на екран монітора. Внизу будуть розташовані номер і тема даної віртуальної лабораторної роботи і, якщо навести курсор на слово «Лаб. №\_\_»,

2.3

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

з'явиться інформаційне поле з докладною вказівкою теми і класифікації роботи. При натисненні і утриманні лівої кнопки миші з'явиться друге інформаційне поле з короткою інструкцією по виконанню даної лабораторної роботи. На полі кожної віртуальної лабораторної роботи в нижньому правому кутку розташована кнопка «Сброс», натиснення якої у будь-який момент приведе лабораторну роботу в початковий стан. При цьому відновити попередній її стан буде вже неможливо.

Текстове поле «Фамилия студента» заповнюється студентом самостійно. Для цього достатньо, помістивши курсор в центр поля, клікнути лівою кнопкою миші і набрати прізвище з клавіатури. Текстове поле з прізвищем дозволяє персоніфікувати дану лабораторну роботу на час її виконання і, якщо знадобиться, зберегти її потрібний стан, наприклад, в програмі Word для включення в звіт викладачеві. Перенесення повного зображення екрану з лабораторною роботою через системну кишеню (буфер обміну) комп'ютера в документ Word можна провести у будь-який момент за допомогою спеціальної клавіші клавіатури PrtScSysRq і вставити його на місце, відмічене курсором, за допомогою стандартної команди «Вставить». Надалі документ Word може бути роздрукований на принтері або збережений на будь-якому носієві.

Встановлений порядок переходу до виконання лабораторної роботи через тестування, можливість виведення двох інформаційних полів при наведенні покажчика миші на слово «Лаб. №», додавання прізвища студента у відповідне текстове поле і можливість у будь-який момент скористатися кнопкою «Сброс» — операції, загальні для всіх віртуальних лабораторних робіт. Тому повторних пояснень надалі приводитися не буде.

Дотримуючись інструкцій теоретичного розділу, а також приведеним нижче методичним вказівкам, студент виконує віртуальну лабораторну роботу і отримує дослідним шляхом необхідні дані для

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
розрахунків. Зробивши розрахунки, заповнивши клітинки відповідних таблиць, побудувавши графіки і склавши звіт, студент представляє матеріали роботи для перевірки викладачеві.

## **2.2. Механічні процеси**

### ***Лабораторна робота № 1.***

## **ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ В МОЛОТКОВІЙ ДРОБАРЦІ**

### **Мета роботи**

1. Ознайомлення з будовою і роботою молоткової дробарки.
2. Подрібнення в молотковій дробарці заданої порції матеріалу.
3. Проведення ситових аналізів. Визначення ступеня подрібнення матеріалу.
4. Встановлення залежності продуктивності дробарки і ступеня подрібнення від розмірів решітки.
5. Побудова кривих розподілу подрібненого матеріалу за розмірами.

### **Методика проведення роботи.**

Встановлюють змінну решітку із заданим розміром отворів  $d_5$ . За вказівкою викладача порцію зерна  $G_{нач}$  засипають в бункер. Включають електродвигун.

Відкривають засувку під бункером і одночасно включають секундомір. Після закінчення подрібнення зупиняють секундомір, вимикають електродвигун. Зважують подрібнений матеріал  $G_{кон}$ , потім проводять ситовий аналіз. Сита розташовують в порядку зменшення розмірів їх отворів зверху вниз (рис. 1.1).

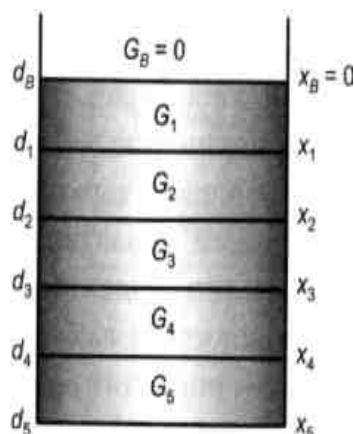


Рис. 1.1. Набір сит з розмірами отворів  $d$ :

$$d_1 = 3,0 \text{ мм}; d_2 = 2,0 \text{ мм};$$

$$d_3 = 1,0 \text{ мм}; d_4 = 0,5 \text{ мм};$$

$$d_5 = 0,0 \text{ мм}.$$

Масу зваженої сухої проби, вказану викладачем, поміщають на верхнє найбільш грубе сито і потім його струшують вручну. Після закінчення розсівання зважують залишок на кожному ситі ( $G_1, G_2, \dots, G_5$ ), включаючи також матеріал, що потрапив на дно збірника.

Дані вимірювань і результати ситового аналізу необхідно внести до табл. 1.1-1.2.

Досліди проводять при різних розмірах решіток. Для визначення середнього розміру частинок матеріалу до подрібнення проводять ситовий аналіз.

### Обробка дослідних даних

1. Продуктивність молоткової дробарки  $Q$  (кг/с) визначають, використовуючи данні табл. 1.1. за формулою  $Q = G_{\text{нач}}/t$

Таблиця 1.1

№ дослідю	Розмір решітки	Час $t$ , с	$G_{\text{нач}}$ , кг	$G_{\text{кон}}$ , кг
1				

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

2				
3				

2. За формулами (1.8) - (1.10), використовуючи дослідні дані ситового аналізу (табл. 1.2), визначають середній розмір частинок в суміші.

Таблиця 1.2

№ досліді	Діаметр отворів, мм					Залишок на ситі, г				
	$d_1$	$d_1$	$d_1$	$d_1$	$d_1$	$G_1$	$G_2$	$G_3$	$G_4$	$G_5$
1										
2										
3										

3. Ступінь подрібнення матеріалу визначають за формулою

$$i = D_{cp} / d_{cp}$$

4. Отримані розрахункові дані заносять в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

№	Розмір решітки	Середній розмір частинок кожної фракції, мм					Відносний масовий вміст кожної фракції в суміші, мм				
		$d_{cp.1}$	$d_{cp.2}$	$d_{cp.3}$	$d_{cp.4}$	$d_{cp.5}$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
1											
2											
3											
№	Середній розмір частинок в суміші $d_1^{\phi}$ , мм		Продуктивність, $Q$ , кг/с			Ступінь подрібнення, $i$					
1											
2											
3											

5. За результатами ситового аналізу представляють криві функції розподілу подрібненого матеріалу за діаметрами частинок  $R(d)$  (рис. 1.2).

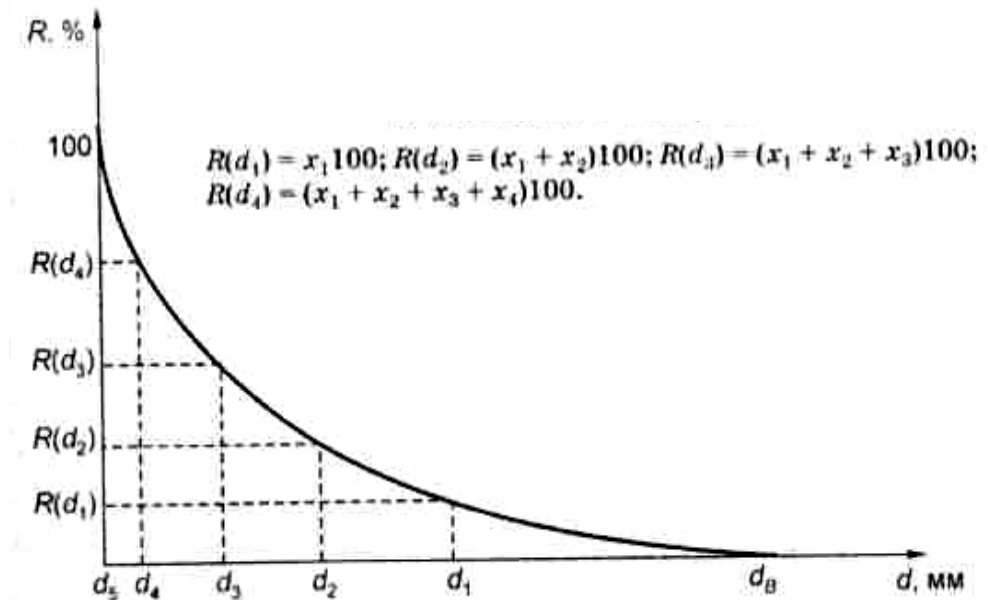


Рис. 1.2. Крива розподілу подрібненого матеріалу

Функція  $R(d)$  дорівнює вираженому у відсотках відношенню маси всіх частинок, діаметр яких більше  $d$ , до загальної маси проби подрібненого матеріалу. Величина  $d$  визначається за діаметром отворів сита.

6. За результатами дослідів будують залежності  $Q=f(t)$

В кінці роблять висновки про вплив розміру решітки в молотковій дробарці на ступінь подрібнення і продуктивність дробарки за вихідним матеріалом.

### Правила і порядок виконання лабораторної роботи

Мета даної лабораторної роботи - ознайомитися з роботою молоткової дробарки на прикладі дроблення трьох порцій гороху, кожна по 100 г. Подрібнення повинно проводитися з використанням трьох змінних решіток з отворами діаметром 1,0; 2,0 і 3,0 мм. Таким чином

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
можна буде оцінити ступінь впливу розміру отворів решітки на процес подрібнення і продуктивність дробарки.

За наслідками ситового аналізу і подальшого зважування різних фракцій роздробленого гороху можна буде побудувати криві розподілу подрібненого матеріалу за діаметрами частинок.

Віртуальне обладнання максимально наближене до реального і підкоряється тим же командам (рис. 1.3). Найбільш складним є вимірювання часу, затраченого на дроблення. У момент відкриття заслінки і початку процесу дроблення автоматично запускається таймер. Зупинити таймер можна буде тільки після завершення процесу дроблення, про що свідчитиме повернення стрілки ватметра до значення потужності холостого ходу і появи на таймері пелюсток, що обертаються. При цьому необхідно помістити курсор в область таймера і натиснути ліву кнопку миші.



Рис. 1.3. Початковий стан віртуальної установки

Всі маніпуляції на екрані проводяться за допомогою миші. Для управління кнопками приладів достатньо помістити курсор в червону область керованого об'єкта або на сам об'єкт, натиснути ліву кнопку і переміщувати мишу в потрібному напрямі.

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Під час роботи необхідно дотримуватися інструкції до виконання віртуальної лабораторної роботи, інакше можна отримати некоректні дані. Слід звернути увагу, що виміряний час, який витрачено на дроблення кожної порції гороху, необхідно вносити в таблицю вимірюваних параметрів самостійно, тоді як вага вимірюваних фракцій буде додаватися в таблицю автоматично.

### **Інструкція до виконання віртуальної лабораторної роботи**

1. Включіть синю кнопку «Пуск» на панелі керування електричним двигуном дробарки і визначте споживану потужність холостого ходу дробарки.

2. Почніть перший дослід дроблення порції гороху з решіткою № 1, встановленою в нижній частині дробарки, для чого натисніть червоний кружок засувки під бункером і визначте максимальну потужність, споживану електричним двигуном в процесі дроблення.

3. Після завершення процесу дроблення, коли споживана двигуном потужність впаде до значення холостого ходу, помістіть курсор в область таймера і натисніть ліву кнопку миші (див. рис 1.4). Запишіть в таблицю вимірюваних параметрів час, витрачений на дроблення даної порції гороху.

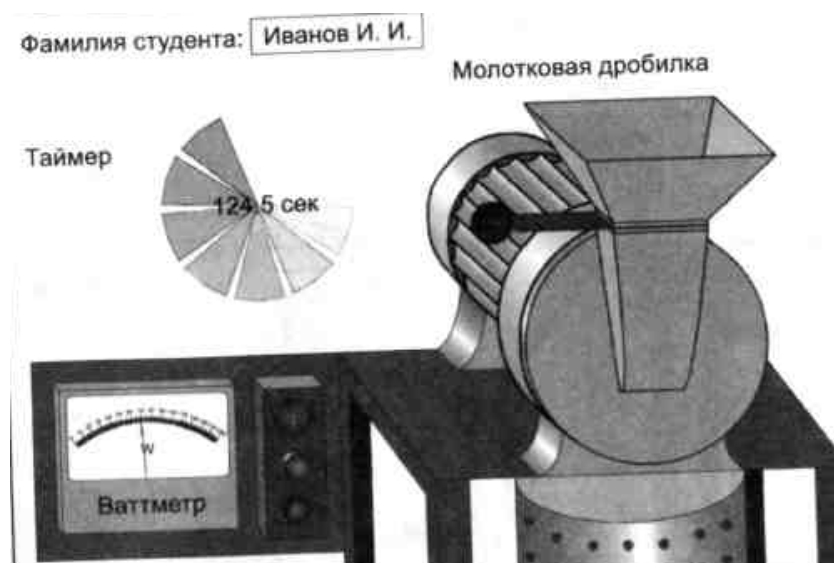


Рис. 1.4. Зупинка таймера після досягнення потужності холостого ходу

4. Вимкніть дробарку, натискаючи червону кнопку «Стоп» на панелі керування двигуном.

5. Натисніть кнопку червоного кольору, розташовану внизу пилефільтруючого рукава (рис. 1.3), і вивантажте подрібнений продукт в лоток.

6. Натисніть кнопку «Сложитъ» ситового просіювача. Помістіть лоток з продуктом над верхнім ситом розсіювача і переконайтеся в тому, що лоток накрив верхнє сито.

7. Натисніть кнопку «Включить» ситового просіювача і спостерігайте процес розсіювання роздробленого продукту за фракціями через сита протягом прискорених восьми віртуальних хвилин (рис. 1.5).

8. Зніміть порожній лоток і помістіть його під пилефільтруючий рукав.

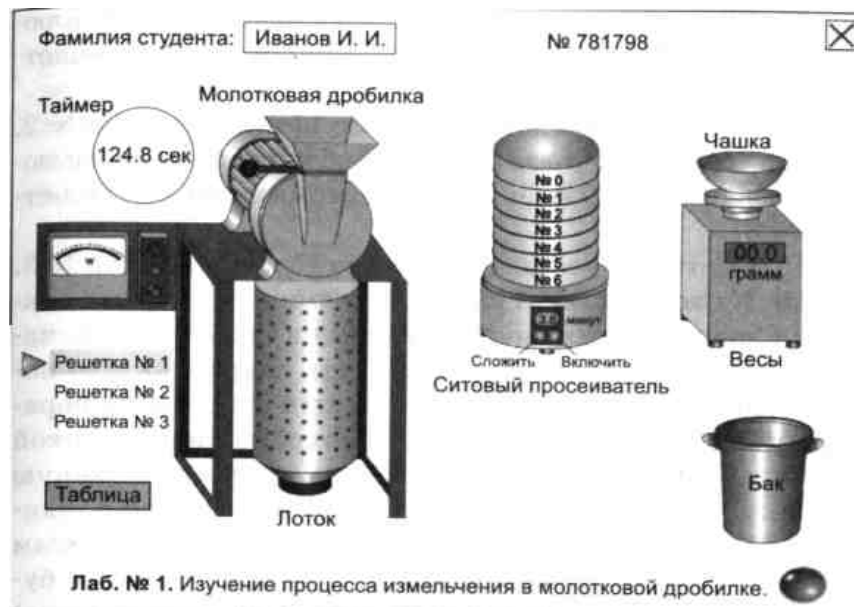


Рис. 1.5. Процесс розсіювання роздробленого продукту

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

9. Зніміть сито № 1 і помістіть його вниз, на вихідну позицію.

10. Зніміть сито № 2 і помістіть його над чашкою, яка встановлена на вагах. Переконайтеся, що вага даної фракції з'явилася на цифровому табло вагів, і перенесіть чашку в бак для її спорожнення.

11. Повторіть операцію зважування фракцій для всіх сит, що залишилися (рис. 1.6).

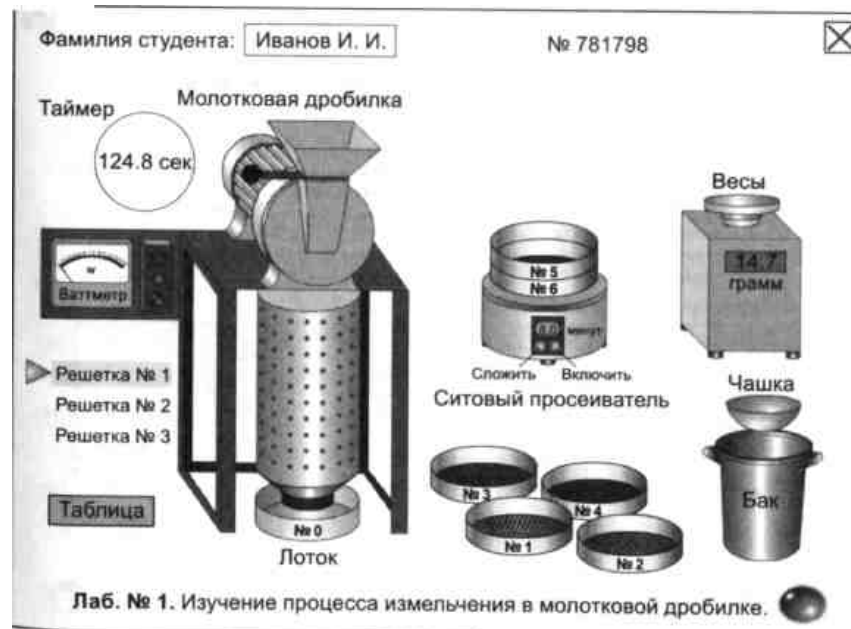


Рис. 1.6. Зважування четвертої фракції і видалення її в бак

12. Переконайтеся, що віртуальне устаткування переключилося в режим дроблення нової порції гороху з решіткою № 2.

13. Повторіть всі дії з 1 по 11 п. з решіткою № 2.

14. Переконайтеся, що віртуальне устаткування переключилося в режим дроблення нової порції гороху з решіткою № 3.

15. Повторіть всі дії з 1 по 11 п. з решіткою № 3.

16. До цього моменту всі дані і виміряні значення мають бути внесені до таблиці вимірюваних параметрів, і тому вона може бути збережена для наступного включення в звіт про виконану лабораторну роботу (рис. 1.7).

Фамилия студента:  № 781798

**Опытные данные и таблица измеряемых параметров**

**Т** *Данные лабораторной установки*

0.0 сек

1. Тип дробилки — исполтковая.	5. Количество сит — 6 шт.
2. Материал для измельчения — зероко.	5.1. Диаметр отверстий сита № 1 — $d_1 = 3(4,5)$ мм.
3. Вес измельчаемой порции — 100 грамм.	5.2. Диаметр отверстий сита № 2 — $d_2 = 2$ мм.
4. Количество сменных решеток — 3 шт.	5.3. Диаметр отверстий сита № 3 — $d_3 = 1$ мм.
4.1. Диаметр отверстий решетки № 1 — $d_{р1} = 1$ мм.	5.4. Диаметр отверстий сита № 4 — $d_4 = 0,7$ мм.
4.2. Диаметр отверстий решетки № 2 — $d_{р2} = 1$ мм.	5.5. Диаметр отверстий сита № 5 — $d_5 = 0,5$ мм.
4.3. Диаметр отверстий решетки № 3 — $d_{р3} = 3$ мм.	5.6. Диаметр отверстий сита № 6 — $d_6 = 0$ мм.

**Таблица измеряемых параметров**

№ опыта	Размер решетки, мм	$t$ , мм	$G_{\text{исп}}$ , грамм	$G_{\text{ост}}$ , грамм	$d_{\text{р}}$ , мм	$G_1$ , грамм	$G_2$ , грамм	$G_3$ , грамм	$G_4$ , грамм	$G_5$ , грамм
1	1	125	100	67.6	3	5.5	29.7	14.7	5.3	12.3
2	2	71	100	77.8	3	11.7	38	10.3	4.4	13.4
3	3	30	100	95	4.5	61	14.7	4.3	2.9	12.2

Поток № 2

**Лаб. № 1.** Изучение процесса измельчения в молотковой дробилке.

Рис. 1.7. Підсумкова таблиця

Перед збереженням підсумкової таблиці внесіть своє прізвище у відповідний рядок вводу «Фамилия студента» і натисніть клавішу PrtScSysRq на клавіатурі комп'ютера, тим самим екранне зображення таблиці зі всіма даними буде скопійоване в системну кишеню (буфер обміну) комп'ютера.

Відкрийте в програмі Word новий документ і за допомогою стандартної команди «Вставити» перенесіть екранне зображення лабораторної роботи з таблицею в документ Word. Тепер можна зберегти отриманий документ на будь-якому носіїві, додати його в звіт і передати викладачу для перевірки.

### Порядок оформлення звіту

Звіт про роботу оформлюється відповідно до вимог, які викладені в методичних вказівках, і повинен містити:

- мету роботи;
- схему експериментальної установки;
- таблицю дослідних даних;

### Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

- розрахункову частину з таблицею результатів розрахунку;
- графіки, побудовані на міліметровці в масштабі з обов'язковим нанесенням експериментальних точок;
- висновки, які відповідають меті роботи.

#### **Питання для перевірки та самоконтролю**

1. Що таке подрібнення?
2. Як проводиться ситовий аналіз?
3. Яким чином визначається ступінь подрібнення матеріалу?
4. Яка залежність продуктивності дробарки і ступеня подрібнення від розмірів решіток?
5. Що представляє собою крива розподілу?
6. Дробарки яких типів ви знаєте?

### **2.3. Гідромеханічні процеси**

#### ***Лабораторна робота № 2.***

### **ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТИ ПОТУЖНОСТІ ПРИ ПЕРЕМІШУВАННІ**

#### **Мета роботи**

1. Вивчити основні конструктивні елементи апарату з мішалкою і вимірювальну схему.
2. Отримати узагальнене критеріальне рівняння, що описує роботу одного типу мішалки.
3. Провести розрахунки потужності по отриманому критеріальному рівнянню і порівняти їх із виміряними.

#### **Опис установки**

Схема установки для дослідження процесу перемішування приведена на рис. 2.1. Мішалка приводиться в дію електродвигуном, зміну частоти обертання якого здійснюється шляхом зміни напруги живлення за допомогою лінійного автотрансформатора (ЛАТР). Потужність, споживана електродвигуном, вимірюється за допомогою ватметра.

Вимірюють частоту обертання валу мішалки за допомогою тахометра, який при вимірюваннях встановлюється на торець валу електродвигуна і утримується рукою. При вимірюваннях до тахометра не прикладається осьового зусилля, оскільки інакше це може привести до спотворення результатів вимірювання.

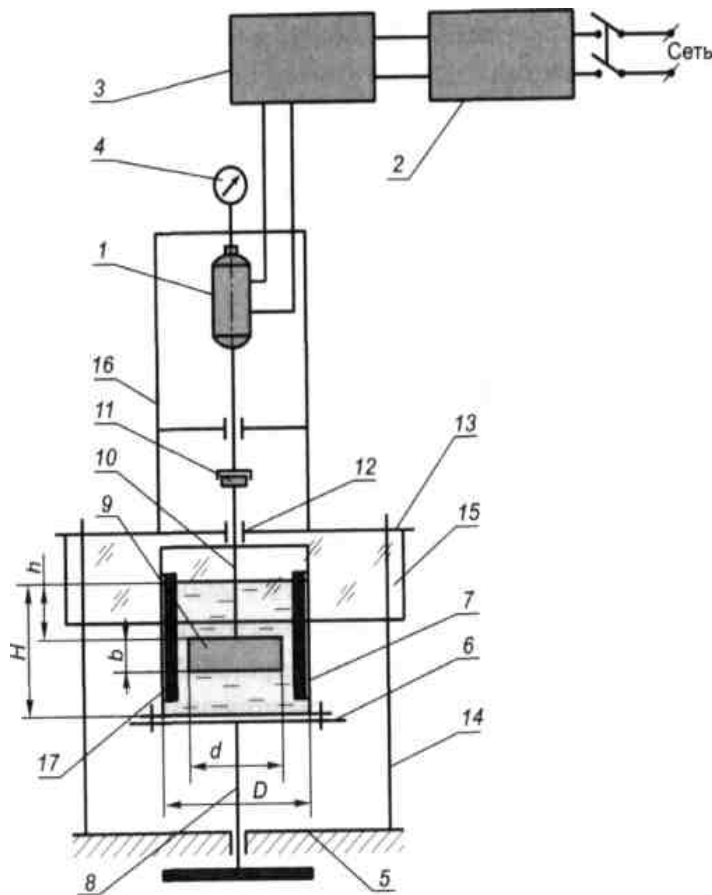


Рис. 2.1.Схема установки для дослідження процесу перемішування:  
1 - електродвигун; 2 -ЛАТР; 3 - ватметр; 4 - тахометр; 5 - станина;  
6 - підйомний стіл; 7 - корпус мішалки; 8 - ходовий гвинт; 9 - робочий  
елемент мішалки; 10 - вал; 11 - муфта; 12 - підшипники; 13 - плита;  
14 - стійкі; 15 - захисний екран; 16 - кожух; 17 - відбивні перегородки.

На станині встановлений підйомний стіл, на якому закріплюється корпус мішалки. За допомогою гвинта корпус мішалки може бути встановлений на різному рівні по висоті відносно робочого елемента. Рівень рідини в корпусі мішалки  $H$ , а також відстань від нижньої кромки лопаті до дна корпусу визначають за шкалою, нанесеною на бічній поверхні корпусу. Змінні робочі елементи мішалки кріпляться до валу, який через муфту сполучений з електродвигуном. Вал обертається в підшипниках, встановлених в плиті, яка стійками з'єднана із станиною. До

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
плити кріпиться захисний екран, а також кожух з електродвигуном.

### Методика проведення роботи

1. Перед пуском установки слід ознайомитися з змістом роботи і будовою установки.
2. Спочатку необхідно включити і підготувати до роботи систему вимірювання потужності (включити живлення).
3. Регулятор напруги живлення електродвигуна встановити на нуль.
4. Відповідно до завдання заповнити таблицю вихідних даних (табл. 2.1). Необхідні геометричні розміри вимірювати штангенциркулем.

Таблиця 2.1

Показник	Позначення	Одиниця вимірювання	Значення
Діаметр мішалки	$d$	м	
Діаметр корпусу мішалки	$D$	м	
Висота шару середовища	$H$	м	
Ширина лопаті	$b$	м	
Перегородки в корпусі	$z$	шт	
Глибина занурення робочого елемента	$h$	м	
Температура середовища	$t$	°C	
Густина середовища	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	
Коефіцієнт динамічної в'язкості середовища	$\mu$	Н·с/м <sup>2</sup>	
Тип мішалки	-	-	
Досліджуване середовища	-	-	

5. Відповідно до завдання закріпити робочий елемент мішалки заданого типу і розміру на валу, встановити корпус мішалки вказаного

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
типу на підйомному столі. Включити живлення електродвигуна.

6. Провести рандомізацію дослідів (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

№ досліду	Потужність, Вт	Частота обертання, об/хв			Середнє значення $n$ , об/хв	Рандомізація	
		1	2	3		Випадкове число	Послідовність замірів
1	$N_1$	$n_{11}$	$n_{12}$	$n_{13}$	$n_1$	70	7
2	$N_2$				$n_2$	69	6
3	$N_3$	...	...	...	$n_3$	7	1
4	$N_4$					34	2
5	$N_5$					59	4
6	$N_6$					61	5
7	$N_7$					46	3
8	$N_8$	$n_{81}$	$n_{82}$	$n_{83}$	$n_8$	75	8

Для компенсації систематичної погрішності, а також для того, щоб уникнути деякого не випадкового зв'язку між результатами вимірювань в досліді, використовується прийом, який має назву рандомізація. Його суть в тому, що досліді проводяться в випадковій послідовності, яка встановлюється за допомогою таблиці випадкових чисел. Для рандомізації з таблиці випадкових чисел з будь-якого стовбчика або рядка вибирається послідовність випадкових чисел і записується у відповідний стовбчик таблиці. 2.2. Вимірювання проводяться в порядку зростання або зменшення випадкових чисел.

7. Провести виміри споживаної потужності на холостому ході при заданих частотах обертання мішалки і заповнити табл. 2.2. Вимірювання проводити не менше трьох разів, кожного разу послідовно змінюючи частоту обертання.

8. Залити в корпус мішалки заданий об'єм дослідної системи і

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
 заміряти її температуру. За допомогою ходового гвинта встановити задану глибину занурення робочого елемента мішалки в рідину.

9. В умовах сталого режиму роботи мішалки провести вимірювання частоти обертання мішалки при заданих значеннях потужності. Для отримання надійних результатів провести не менше трьох серій вимірювань, кожен раз послідовно змінюючи частоту обертання. Результати вимірювань занести в табл. 2.2.

10. Після закінчення вимірювань вивести регулятор напруги на нуль і вимкнути живлення електродвигуна, вимкнути систему вимірювання потужності мішалки, опустити підйомний стіл, зняти корпус мішалки, злити досліджувану рідину в збірник і промити корпус, зняти мішалку.

### Обробка дослідних даних і складання звіту

1. Перш ніж перейти до обробки експериментальних даних, необхідно переконатися, що результати вимірювань відтворювані, тобто встановити, чи не було на них впливу неврахованих величин. З цією метою слід обробити дані паралельних дослідів по вимірюванню частоти обертання на основі експериментально-статистичних методів дослідження. Для цього необхідно записати вимірювання частоти обертання в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Дослідні дані

№ дослідів	Частота обертання, об/хв			Середнє значення $n$ , об/хв	Дисперсія, $S_j^2$
	1	2	3		
1	$n_{11}$	$n_{12}$	$n_{13}$	$n_1$	$S_1^2$
2	$n_{21}$	$n_{22}$	$n_{23}$	$n_2$	$S_2^2$
...					
$j$	$n_{j1}$	$n_{j2}$	$n_{j3}$	$n_j$	$S_j^2$
...					
8	$n_{81}$	$n_{82}$	$n_{83}$	$n_8$	$S_8^2$

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Таким чином, проведено є серій паралельних дослідів ( $e = 8$ ), що включають  $U$  вимірювань частоти обертання ( $U = 3$ ).

Для кожної серії паралельних дослідів обчислити середнє арифметичне значення вимірюваної частоти обертання:

$$\bar{n}_j = \frac{1}{U} \sum_{i=1}^U n_{ji} \quad (j = 1, 2, \dots, e; i = 1, 2, \dots, U). \quad (2.1)$$

Потім для кожної серії розраховують оцінку дисперсії:

$$S_j^2 = \frac{1}{(U-1)} \sum_{i=1}^U (n_{ji} - \bar{n}_j)^2. \quad (2.2)$$

Для перевірки відтворюваності дослідів знайти критерій Кохрена як відношення найбільшої з оцінок дисперсій до суми всіх оцінок дисперсій:

$$G_p = \frac{\max S_j^2}{\sum_{i=1}^e S_j^2}. \quad (2.3)$$

Значення критерію Кохрена  $G_T$  приведені в табл. 2.4. Вони відповідають довірчій вірогідності ( $P=0,95$ ), з якою приймається гіпотеза про відтворюваність дослідів.

Значення  $G_T$  визначити, виходячи з числа ступеню свободи  $f_2 = e$  і  $f_1 = (U - 1)$  за табл. 2.4.

Якщо виконується умова  $G_p \leq G_T$ , то досліді вважаються відтворюваними. В цьому випадку можна розрахувати генеральну дисперсію відтворюваності:

$$S_{\text{всеп}}^2 = \sum_{j=1}^e S_j^2 / e \quad (2.4)$$

Якщо дослід не відтворюється, то можна спробувати досягти відтворюваності виявленням і усуненням джерел нестабільності експерименту, а також використанням точніших методів і засобів.

Таблиця 2.4

Значення критерію Кохрена  $G_T$

Степень свободы $f_2 = e$	Степень свободы $f_1 = U - 1$					
	1	2	3	4	5	6
2	0,9985	0,9750	0,9392	0,9057	0,8584	0,8534
3	0,9669	0,8709	0,7977	0,7457	0,7071	0,6771
4	0,9065	0,7679	0,6841	0,6287	0,5895	0,5598
5	0,8412	0,6838	0,5981	0,5440	0,5063	0,4783
6	0,7808	0,6161	0,5321	0,4803	0,4447	0,4184
7	0,7271	0,5612	0,4800	0,4307	0,3907	0,3726
8	0,6798	0,5157	0,4377	0,3910	0,3595	0,3362
9	0,6385	0,4775	0,4027	0,3584	0,3286	0,3067

В загальному випадку розглянута методика оцінки відтворюваності досліду має універсальний характер і може бути використана при будь-яких експериментальних дослідженнях. При цьому мінімальні значення величини  $U$  беруться від 2 до 4.

2. За даними експериментів побудувати графік залежності потужності холостого ходу  $N_x$  від частоти обертання мішалки:  $N_x = f(n)$ .

3. Розрахувати корисну потужність, споживану мішалкою при перемішуванні рідини за заданою частотою обертання робочого елемента (див. табл. 2.6).  $N_x$  визначити з графіка  $N = N_p - N_x$ .

4. Для кожного досліду розрахувати за формулою (1.14) значення критеріїв  $Eu_m$  і  $Re_m$ .

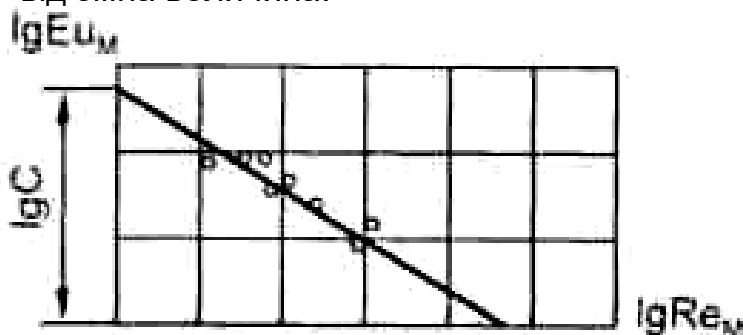
5. На підставі обчислених значень  $Eu_m$  і  $Re_m$  побудувати графік залежності  $\lg Eu_m$  від  $\lg Re_m$  визначити значення величин  $C$  і  $K$ , що входять в критеріальне рівняння (1.14). Прологарифмувавши рівняння (1.14), отримати рівняння прямої лінії в логарифмічних координатах:

$$\lg(Eu_m) = K \lg(Re_m) + \lg(C). \quad (2.5)$$

Показник степені визначається як тангенс кута нахилу  $\varphi$  до осі абсцис (рис. 2.2). Оскільки кут знаходиться в другій чверті, то  $K$ —

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

від'ємна величина.



*Примітка.* При побудові графіка за рис. 2.2 необхідно виконати наступні умови:

- 1) осі координат повинні починатися від нуля;
- 2) масштаби по осях мають бути однакові.

Рис. 2.2. Залежність  $\lg E_{u_m} = f(\lg Re_m)$

Постійна величина  $C$  знаходиться як відрізок, що відтинається прямою на осі координат, або з рівняння (2.5) при відомому  $K$ . Якщо  $C$  визначається за допомогою рівняння (2.5), то необхідно розрахувати 3-5 значень і знайти середнє.

Дані розрахунків внести до зведеної табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Зведена таблиця отриманих і розрахованих даних

№ дослідів	Частота обертання, об/хв		Потужність холостого ходу $N_x$ , Вт		Споживана потужність $N$ , Вт	
1						
2						
3						
№ дослідів	$E_{u_m}$	$\lg E_{u_m}$	$Re_m$	$\lg Re_m$	$N_{рас}$ , Вт	$\Delta$
1						
2						
3						

6. Записати отримане критеріальне рівняння, підставивши в нього експериментально визначені величини  $C$  і  $K$ . Розрахувати за формулою (1.15) потужність, споживану мішалкою при заданій частоті обертання, і

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
порівняти з експериментально отриманими значеннями (табл. 2.5).

7. Оцінити адекватність отриманого критеріального рівняння.  
Розрахувати відношення, яке дозволить оцінити погрішність отриманого критеріального рівняння в %:

$$\Delta = \frac{N_{рас} - N}{N_{рас}} 100 \quad (2.6)$$

Побудувати кореляційний графік залежності  $N_{рас} = f(n)$

### Правила і порядок виконання віртуальної роботи

Віртуальна установка по відтворенню процесу перемішування і визначенню витрати потужності включає посудину з водою, електродвигун з мішалкою, закріпленою на валу, лінійний автотрансформатор з можливістю регулювати напругу, що подається на електродвигун, вимірювача потужності споживаного при цьому струму і тахометр для вимірювання числа обертів валу двигуна (рис. 2.3).

Посудина має чотири перегородки для локалізації збурень і запобігання можливості утворення воронки. Двигун і тахометр встановлені на штативах і за допомогою спеціальних ручок можуть переміщатися по вертикалі.

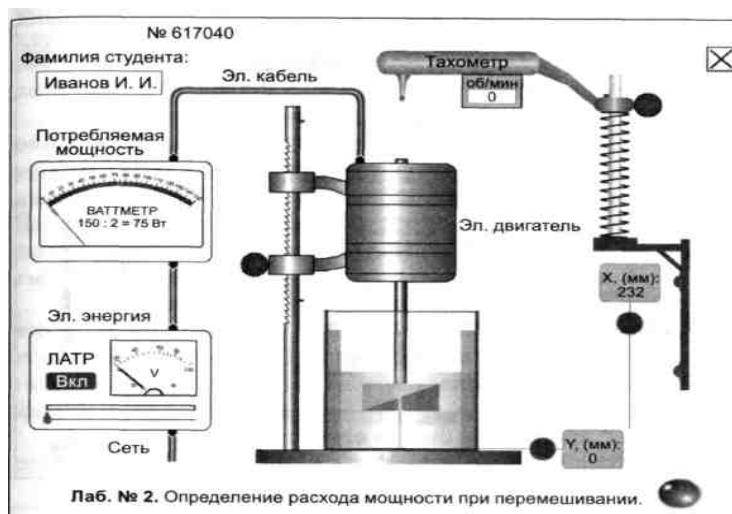


Рис. 2.3. Віртуальна установка для перемішування

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Крім того, віртуальна робота містить дві вимірювальні лінії по осі X і по осі Y, за допомогою яких можна проводити вимірювання розмірів висоти занурення двигуна з мішалкою в посудину, розмірів посудини і мішалки. Для переміщення ліній досить помістити курсор в область червоного круга і, натискаючи при цьому ліву кнопку миші, переміщати її в потрібному напрямі.

Таким же чином можна переміщати двигун по штативу і тахометр.

Починати виконання роботи слід з наведення курсора на мережевий вимикач «Вкл» ЛАТРа. При цьому в центрі екрану з'явиться панель з даними, які необхідно переписати в табл. 2.2 і 2.3 відповідно (див. рис. 2.4).



Рис. 2.4. Панель з даними

Не включаючи двигун, провести геометричні заміри посудини і мішалки і занести дані в табл. 2.2. Після включення ЛАТРа вимірювання по осі X буде заблоковано, оскільки ширину лопаті мішалки при її обертанні без погрішності виміряти вже неможливо.

Далі можна включити ЛАТР і за допомогою повзунка регулювати напругу, що подається на двигун. Зверніть увагу, що ватметр має 150 поділок, але максимальна потужність, яка вимірюється при цьому складе

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

75 Вт, отже, необхідно визначити ціну поділки ватметра.

Для вимірювання потужності холостого ходу слід перемістити двигун вгору, так щоб робочий елемент мішалки опинився над водою. Вимірювання частоти обертання провести в декількох точках діапазону споживання (не менше 8), наприклад від 5 до 45 Вт з кроком 5 Вт. Результати вимірювань занести в табл. 2.3.

Частоту обертання необхідно вимірювати тахометром, для чого досить помістити курсор в червону область круглої ручки тахометра і, натискуючи ліву кнопку миші, переміщати її вниз до дотику нижньої частини осі тахометра з віссю двигуна. При цьому на табло тахометра відбиватиметься число його обертів (рис. 2.5).

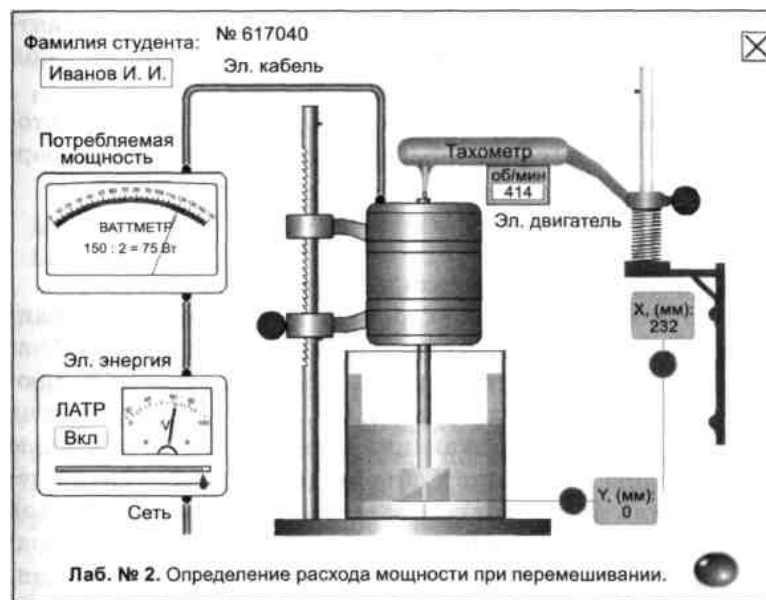


Рис. 2.5. Вимірювання частоти обертання вала мішалки тахометром

Послідовність вимірювань визначається рядом раніше отриманих випадкових чисел, наприклад, за збільшенням їх значень, а вимірювання частоти обертання повинно проводитися не менше трьох разів і усереднюватися. Далі по даних табл. 2.2 можна буде побудувати графік залежності потужності холостого ходу  $N_x$  від частоти обертання мішалки.

Наступний етап виконання віртуальної роботи - це вимірювання

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
витрати потужності при перемішуванні рідини. Для проведення експерименту слід опустити двигун з мішалкою на задану викладачем глибину  $h$ , наприклад 65мм.

Далі слід повторити серію вимірювань так само, як при вимірюванні потужності холостого ходу і додати ще 8 пунктів в табл. 2.2 в тій же послідовності (у відповідності з тими ж випадковими числами), але іншими значеннями споживаної потужності, наприклад від 25 до 60 Вт з кроком 5 Вт (задає викладач).

Заповнивши табл. 2.2, можна переходити до аналізу відтворюваності результатів вимірювань, для цього необхідно переписати виміряні частоти обертання в табл. 2.3 і розрахувати генеральну дисперсію відтворюваності.

Потім слід виконати розрахунки по п. 2-7 (розділ «Обробка даних і складання звіту»).

### **Питання для перевірки та самоконтролю**

1. Що називається перемішуванням?
2. Які види перемішування вам відомі?
3. Напишіть критеріальне рівняння для процесу механічного перемішування.
4. Для чого логарифмують критеріальне рівняння?
5. Як визначаються коефіцієнт  $C$  та показник степені  $K$  в лабораторній роботі?
6. Що таке рандомізація?
7. Як називається прилад для вимірювання частоти обертання мішалки?
8. Що таке холостий хід?

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

9. Яка необхідність вимірювати холостий хід?
  
10. Чому в критеріальному рівнянні відсутні такі критерії подібності як критерій Фруда і критерії геометричної подібності?

**Лабораторна робота № 3.**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ПСЕВДОЗРІДЖЕНОГО ШАРУ**

**Мета роботи**

1. Отримати експериментальні залежності  $\Delta P$  і  $\varepsilon$  від швидкості зріджувального агента.
2. Визначити за експериментальними даними значення першої критичної швидкості.
3. Визначити діаметр частинок шару або еквівалентний діаметр і фактор форми для частинок неправильної форми.
4. Визначити по залежності  $Ly=f(A_e)$  значення другої критичної швидкості. Порівняти його з розрахунком за формулою Тодеса.
5. Розрахувати вагу матеріалу в шарі.

**Опис лабораторної установки**

Установка (рис. 3.1) складається з двох змонтованих на щиті скляних циліндричних колонок. У кожній колонці є три металеві сітки, що є газорозподільниками. На двох сітках - шари з твердих частинок. Зріджуючий агент (повітря) за допомогою вентилятора поступає в об'ємний лічильник, а потім через вентилі поступає відповідно в колонки. Витрата повітря регулюється шляхом зміни напруги, що підводиться до електродвигуна від регулятора напруги, який через вимикач з'єднується з мережею. Перепад тиску, що виникає при русі повітря через колонки, вимірюється диференціальними манометрами, які за допомогою перемикачів можуть бути підключені до будь-якої з точок. Перемикачі кожної колонки мають три положення (а, б, в).

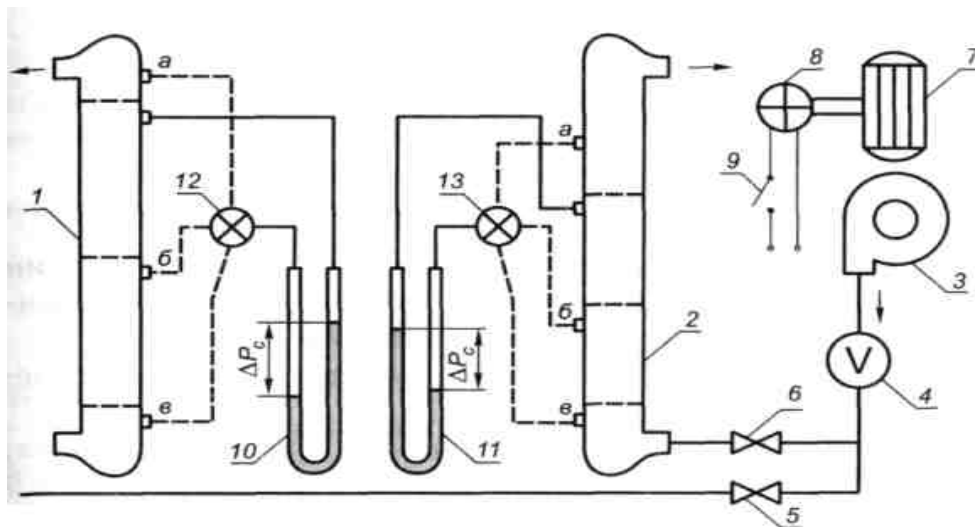


Рис. 3.1. Схема експериментальної установки:

- 1, 2- скляні циліндричні колонки;
- 3- вентилятор;
- 4- об'ємний лічильник;
- 5, 6- вентиля;
- 7- електродвигун;
- 8- регулятор напруги;
- 9- перемикач;
- 10, 11- диференціальні манометри;
- 12, 13- перемикачі.

### Методика виконання роботи

Перед пуском установки слід ознайомитися з змістом роботи, установкою і отримати завдання у викладача.

1. Відповідно до завдання відкрити один з вентилів — 5 або 6 (другий має бути закритий).
2. Ручку регулятора напруги вивести на нуль, а вимикач 9 поставити в положення «Сеть».
3. Встановивши витрату повітря через колонку за допомогою регулятора напруги, відповідним перемикачем послідовно заміряють перепади тиску по диференціальному манометру.

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

В положенні перемикача на рівні аперепад тиску розраховується за формулою

$$\Delta P_a = \Delta P_p. \quad (3.1)$$

В положенні б- за формулою

$$\Delta P_b = \Delta P_p + \Delta P_1 \quad (3.2)$$

В положенні в:

$$\Delta P_v = \Delta P_p + \Delta P_1 + \Delta P_2, \quad (3.3)$$

де  $\Delta P_p$ - перепад тиску, що виникає при русі зріджуючого агента через сітку;

$\Delta P_1, \Delta P_2$ - відповідно перепад тиску на першому і другому шарах.

У кожному досліді необхідно заміряти висоти досліджуваних шарів твердих частинок.

Витрату повітря виміряти за допомогою об'ємного лічильника. Результати вимірювань занести в звітну табл. 3.1 (див. далі).

4. Послідовно змінюючи витрату повітря, провести вимірювання вказаних вище величин.

Вимірювання повинні охоплювати діапазон зміни швидкості повітря від нуля до найбільшої швидкості, яку забезпечує вентилятор. Вимірювання слід організувати так, щоб забезпечити визначення першої критичної швидкості з максимально можливою точністю.

Після закінчення роботи вимикач 9 поставити в положення «Выкл» і ручку регулятора напруги вивести на нуль.

### **Обробка дослідних даних і складання звіту**

1. Визначити швидкість повітря (м/с) за формулою

$$\omega = \frac{V}{f_a} = \frac{V_K - V_H}{\tau} = \frac{4}{\pi d^2} \quad (3.4)$$

2. Розрахувати гідравлічні опори шарів твердих частинок  $\Delta P_i$ , переводячи при цьому покази диференціального манометра з мм вод. ст. в Па. Якщо опір  $\Delta P_p \ll \Delta P$ , то опором сітки при розрахунках можна

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

знехтувати.

3. Побудувати графік залежності  $\Delta P_p = f(\omega)$ , на якому відзначити дані для кожного з шарів. По графіку визначити значення  $\omega_{кр}^1$ .

4. За формулою (1.19) розрахувати порізність і побудувати графік залежності  $\varepsilon_1 = f(\omega)$ , на якому відзначити дані для кожного з шарів.

5. Розрахунок значень щільності і динамічної густини повітря можна проводити за такими формулами:

$$\rho = \rho_0 \frac{273}{T}; \quad (3.5)$$

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left( \frac{T}{273} \right)^{3/2}, \quad (3.6)$$

де  $\rho_0 = 1,293$  - щільність повітря при  $0^\circ\text{C}$ ,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\mu_0 = 17,3 \cdot 10^{-6}$  - динамічний коефіцієнт в'язкості при  $0^\circ\text{C}$ ,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;

$T = 273 + t^\circ\text{C}$  - абсолютна температура,  $\text{K}$ ;

$C$  - постійна Сатерленда (для повітря  $C = 124$ ).

6. Визначити середній діаметр частинок в шарі  $d_s$ . За значенням  $\omega_{кр}^1$  розрахувати критерій Лященко.

Оскільки  $\rho_{ч} \gg \rho_{с}$ , то в формулі (1.29) прийняти  $\rho_{ч} - \rho_{с} \approx \rho_{ч}$ . Потім по графіку (рис. 1.4) знайти відповідне значення критерію Архімеда при  $\varepsilon = 0,4$  і визначити діаметр частинок  $d_s$ .

7. Розрахувати по відомому  $d_s$  значення  $\omega_{кр}^1$  і  $\omega_{кр}^2$ , виходячи з формули Тодеса.

8. Розрахувати вагу твердих частинок, що знаходяться в кожному шарі, за формулою (1.28).

Звіт про роботу повинен включати в себе: завдання; схему установки із специфікацією; звітну таблицю; графіки  $\Delta P_i = f(\omega)$ , і  $\varepsilon_1 = f(\omega)$ ; розрахунок середнього діаметру частинок; розрахунок ваги матеріалу в кожному шарі; розрахунок  $\omega_{кр}^2$ ; розрахунок  $\omega_{кр}^1$  і  $\omega_{кр}^2$  за формулою Тодеса.

### Правила і порядок виконання роботи

Дана робота, на відміну від стаціонарної установки, зображеної на рис. 3.1, містить тільки одну циліндричну скляну колонку з єдиною сіткою, на якій знаходиться шар пшона заввишки  $H = 40$  мм (див. рис. 3.2). Диференціальний манометр підключений з одного боку нижче за сітку в крапці, відповідній крапці *в* на рис. 3.1, а з іншої — вверху колонки, відповідній точці *а*.

Таблиця 3.1

№ п/п	Дослідні данні							
	Показники об'ємного лічильника, м <sup>3</sup>		Час вимірювань об'єму ( $V_K - V_H$ )т, с	Показники диференційного манометра, мм вод.ст.			Висота шару $H$ , м	
	вихідний $V_H$	кінцевий $V_K$		$\Delta P_a$ гідравлічний опір	$\Delta P_b$	$\Delta P_e$	$H_1$ першого шару	$H_2$ другого шару
1								
2								
3								
...								
Розрахункові дані								
№ п/п	Швидкість повітря $\omega$ , м/с	Гідравлічний опір		Порозність шару $\varepsilon$				
		$\Delta P_1$ першого шару	$\Delta P_2$ другого шару	$\varepsilon_1$ першого шару	$\varepsilon_2$ другого шару			
1								
2								
3								
...								

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Діаметр апарата  $D = \dots$  м

Матеріал ...

Щільність твердих частинок  $\rho_c = \dots$  кг/м<sup>3</sup>

Номер колони ...

Порізність нерухомого шару  $\varepsilon_0 = \dots$

Температура повітря  $t = \dots$  °С

Для підключення лабораторної установки до електричної мережі необхідно натиснути червону кнопку «Вкл», після чого вона стане світлою і недоступною для подальшого управління, проте одночасно активізується кнопка управління регулятором напруги, за допомогою якою можна змінювати його параметри, а значить, і енергію, що подається на двигун вентилятора. Для цього досить помістити курсор в активну червону область важеля управління регулятором напруги і, натискаючи ліву кнопку миші, одночасно переміщувати її вправо. Про кількість енергії, що підводиться до двигуна вентилятора, можна судити за числом обертів об'ємного лічильника, який фіксує витрату повітря, що виробляється.

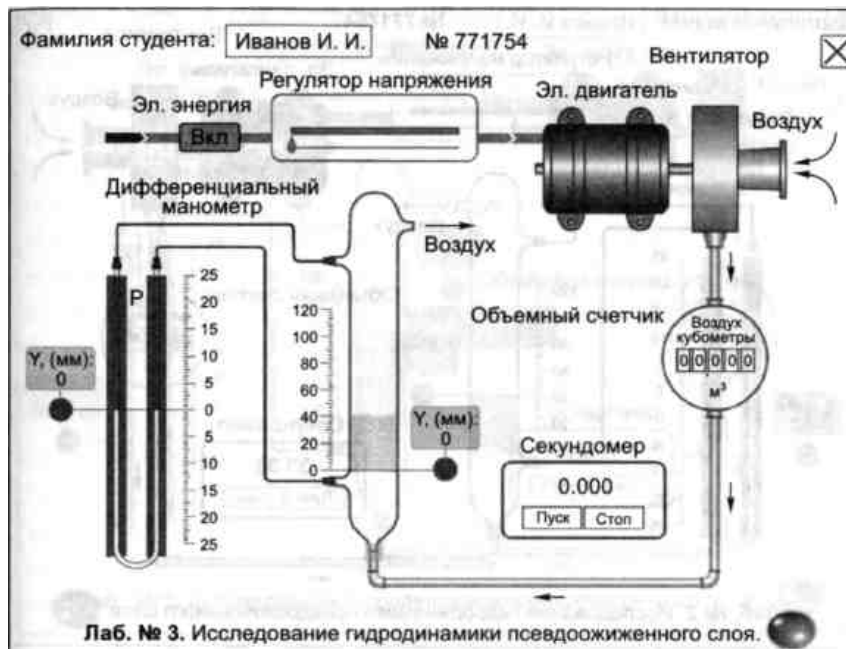


Рис. 3.2. Віртуальна установка для дослідження псевдозрідженого

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум шару

Для точної оцінки витрати зазвичай реєструють час, за який через об'ємний лічильник пройде  $0,03\text{м}^3$  повітря. Час вимірюють за допомогою секундоміра, включеного в зміст віртуальної лабораторної роботи. Користуватися будь-яким іншим секундоміром не можна. Для включення віртуального секундоміра необхідно натиснути кнопку «Пуск». Скинути його покази можна лівою кнопкою миші при наведенні курсора на активну область показів. Крім того, управляти секундоміром можна за допомогою клавіатури: клавіша «P» — пуск, «S» — стоп, «O» — обнулити.

Вимірювання висот стовпчиків води в диференціальному манометрі і висоти шару пшона також проводиться натисненням лівої кнопки миші при наведенні курсора на активну червону область відповідної вимірювальної лінії і одночасним переміщенням миші вгору-вниз. Для підвищення точності вимірювання стовпчиків води диференціальний манометр зображений у збільшеному масштабі.

При проведенні роботи необхідно уникати різких рухів важеля управління регулятором напруги, щоб виключити можливе порушення штатного режиму роботи об'ємного лічильника. Навпаки, для точного визначення моменту початку зрідження відповідно до показників манометра слід змінювати напругу повільно і плавно (рис. 3.3).

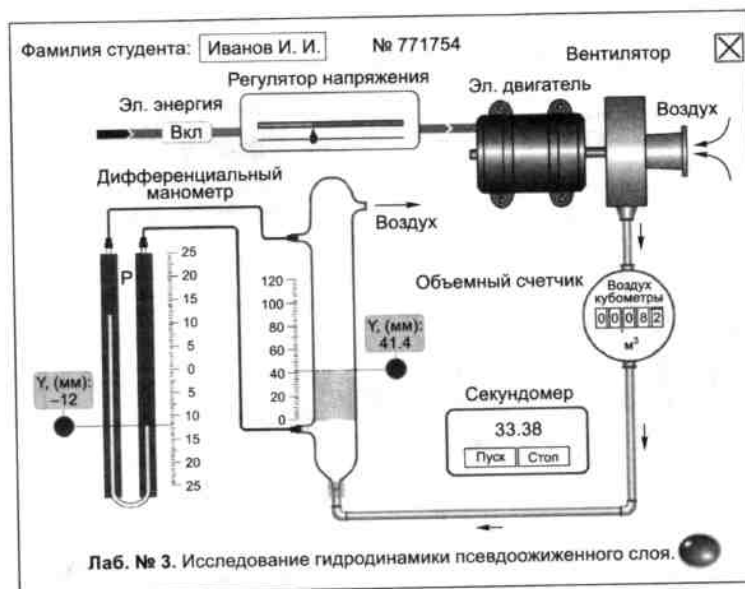


Рис. 3.3. Досягнення моменту початку зрідження

Для збільшення достовірності відтворення процесу зрідження кожна частинка шару рухається за індивідуальним законом (траєкторії), і тому при виконання даної віртуальної лабораторної роботи число оброблюваної комп'ютером інформації в одиницю часу вельми велике, із-за чого вимоги до швидкої дії комп'ютера також підвищені. Для природного відтворення процесу зрідження частота процесора комп'ютера не має бути нижче за 1 Гц. Це не означає, що при виконанні даної роботи на комп'ютерах з меншою тактовою частотою будуть отримані недостовірні результати. Це означає тільки те, що процес відтворення буде трохи сповільненим, але покази віртуального секундоміра при цьому залишаться цілком достовірними (рис. 3.4).

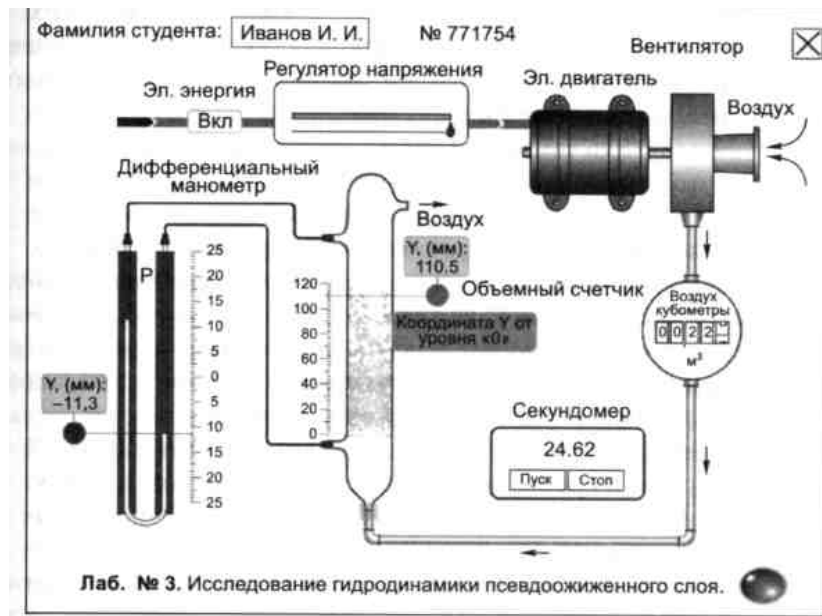


Рис. 3.4. Зрідження при максимальній витраті повітря

### Питання для перевірки та самоконтролю

1. Що таке псевдозріджений шар?
2. Що визначається за допомогою диференціального манометра?
3. Як перевести величину тиску з мм вод. ст. в Па?
4. Що таке перша і друга критичні швидкості?
5. Як визначити витрати повітря на процес псевдозрідження?
6. Визначення середнього діаметру частинок в шарі.

## **2.4. Теплообмінні процеси**

### ***Лабораторна робота № 4.***

## **ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ НАГРІВАННЯ І РЕКУПЕРАЦІЇ ТЕПЛОТИ У ТРУБЧАСТІЙ ТЕПЛООБМІННІЙ УСТАНОВЦІ**

### **Мета роботи**

1. Вивчити будову і принцип дії трубчастої теплообмінної установки.
2. Визначити коефіцієнт регенерації при різних витратах води.
3. Експериментально визначити коефіцієнт теплопередачі при різних витратах води для секції регенерації.
4. Провести порівняння отриманих дослідним шляхом значень коефіцієнтів теплопередачі, розрахованих за рівняннями (4.8) -(4.11).
5. Визначити втрати теплоти стінками апарату в навколишнє середовище.

### **Основні теоретичні положення**

Одним з найбільш поширених процесів на підприємствах харчової промисловості є теплова обробка продуктів.

Зокрема, для збільшення термінів зберігання рідких харчових продуктів проводяться процеси їх пастеризації або стерилізації. Для цього рідини нагрівають до порівняно високої температури і витримують при ній, потім охолоджують до температури їх зберігання або фасування.

Гарячий продукт, що поступає на охолодження після пастеризації при температурі 63-92°C, містить велику кількість теплоти, яка може утилізуватися. Для використання теплоти гарячого продукту його направляють в спеціальну секцію комбінованого апарату для попереднього підігріву холодного продукту, що поступає на пастеризацію, а гарячий пастеризований продукт при цьому значно охолоджується.

Процес зворотної передачі теплоти від вже нагрітого гарячого

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
середовища до середовища, що поступає на підігрів, з метою утилізації теплоти гарячого середовища в техніці прийнято називати рекуперацією теплоти, а теплообмінники, призначені для її проведення, називають рекуператорами або секціями рекуперації.

Рекуперація теплоти при обробці потоків рідких харчових продуктів дозволяє отримати велику економію теплоти, що витрачається на пастеризацію. Наприклад, в сучасних апаратах для пастеризації молока і пива частка цієї економії досягає 90 і більше відсотків кількості тепла, яке споживається для нагрівання продукту від початкової температури до температури пастеризації.

Завдяки цьому витрата пари при тепловій обробці молока може бути знижена до 15-16 кг на тонну продукту проти 150-160 кг на тонну у разі роботи без рекуперації, що достатньо переконливо характеризує значення цієї операції для виробництва.

Кількість теплоти, необхідної для нагрівання продукту до температури пастеризації, можна розрахувати за формулою

$$Q=mc(t_3 - t_1), \quad (4.1)$$

де  $t_3$  - температура продукту після пастеризації або стерилізації °С;

$t_1$  - температура продукту до нагрівання °С;

$c$  - теплоємність, Дж/(кг·К);

$m$  - продуктивність апарата, кг/с.

Холодний продукт, проходячи через рекуператор, нагріватиметься від температури  $t_1$  до температури регенерації  $t_2$ , яка дещо менша від температури  $t_3$ .

Кількість теплоти, що передається в регенераторі холодному продукту, розраховується за формулою

$$Q_p = mc(t_2 - t_1). \quad (4,2)$$

Ефективність роботи регенератора характеризується коефіцієнтом регенерації, який представляє собою відношення кількості теплоти, поверненої в рекуператорі, до кількості теплоти, необхідної для

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
нагрівання продукту від його початкової температури до температури пастеризації:

$$\varepsilon = \frac{Q_p}{Q} = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1} \quad (4.3)$$

Основною характеристикою будь-якого теплового процесу є кількість теплоти, що подається, яка для сталого процесу розраховується з використанням рівняння теплопередачі:

$$Q = kF\Delta t_{cp}, \quad (4.4)$$

де  $Q$  - кількість теплоти, що подається, Вт;

$k$  - коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>К);

$F$  - поверхня теплообміну, м<sup>2</sup>;

$\Delta t_{cp}$  - середня різниця температур між середовищами (рушійна сила процесу).

Середню рушійну силу в загальному випадку розраховують як середньологарифмічну за формулою

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_m}{2,31g \left( \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_m} \right)}, \quad (4.5)$$

де  $\Delta t_{\delta}$  і  $\Delta t_m$  - більша і менша різниці температур між середовищами на вході і виході з апарату.

Якщо відношення  $\Delta t_{\delta}/\Delta t_m \leq 2$ , то з достатньою точністю середню рушійну силу в цьому випадку можна розраховувати як середньоарифметичну за формулою

$$\Delta t_{cp} = (\Delta t_{\delta} + \Delta t_m) / 2 \quad (4.6)$$

Коефіцієнт теплопередачі визначається за формулою

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (4.7)$$

де  $\alpha_1$  - коефіцієнт тепловіддачі від гарячого середовища до стінки, Вт/(м<sup>2</sup>К);

$\beta$  - товщина стінки, м;

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки, Вт/(м·К);

$\alpha_2$  - коефіцієнт тепловіддачі від стінки до холодної рідини, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

При русі середовища всередині труб коефіцієнт тепловіддачі знаходять за критерійними рівняннями залежно від режиму руху:

а) при турбулентному режимі ( $Re > 10\,000$ )

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_{СТ}} \right)^{0,25} \quad (4.8)$$

б) при перехідному режимі ( $10\,000 > Re > 2320$ )

$$Nu = 0,008 Re^{0,9} Pr^{0,43}; \quad (4.9)$$

в) при ламінарному режимі ( $Re < 2320$ )

$$Nu = 0,17 Re^{0,33} Pr^{0,43} Gr^{0,1} \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_{СТ}} \right)^{0,25} \quad (4.10)$$

При русі середовища в міжтрубному просторі кожухотрубного теплообмінника за відсутності перегородки коефіцієнт тепловіддачі:

$$Nu = 1,16 d_э Re^{0,6} Pr^{0,23} \quad (4.11)$$

де  $d_э = \frac{D_э^2 - n d_n^2}{n d_n}$  - еквівалентний діаметр міжтрубного простору, м;

$D_э$  - внутрішній діаметр кожуха теплообмінника, м;

$d_n$  - зовнішній діаметр внутрішньої труби, м;

$n$  - число труб.

При експлуатації теплообмінних апаратів втрати теплоти  $Q_n$  від стінок теплообмінника в навколишнє середовище відбуваються як за рахунок теплового випромінювання, так і за рахунок конвекції, і розраховують їх за формулою

$$Q_n = \alpha_c F (t_{cm} - t_э), \quad (4.12)$$

де  $F$  - зовнішня поверхня апарату, м<sup>2</sup>;

$t_{cm}$  - температура зовнішньої стінки апарату °С;

$t_э$  - температура навколишнього повітря °С;

$\alpha_c$  - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Для апаратів з температурою зовнішньої стінки до 150 °С, що

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
знаходяться в приміщенні,  $\alpha_c = 9,74 + 0,07(t_{cm} - t_e)$ .

### Опис установки

Схема експериментальної установки представлена на рис. 4.1.

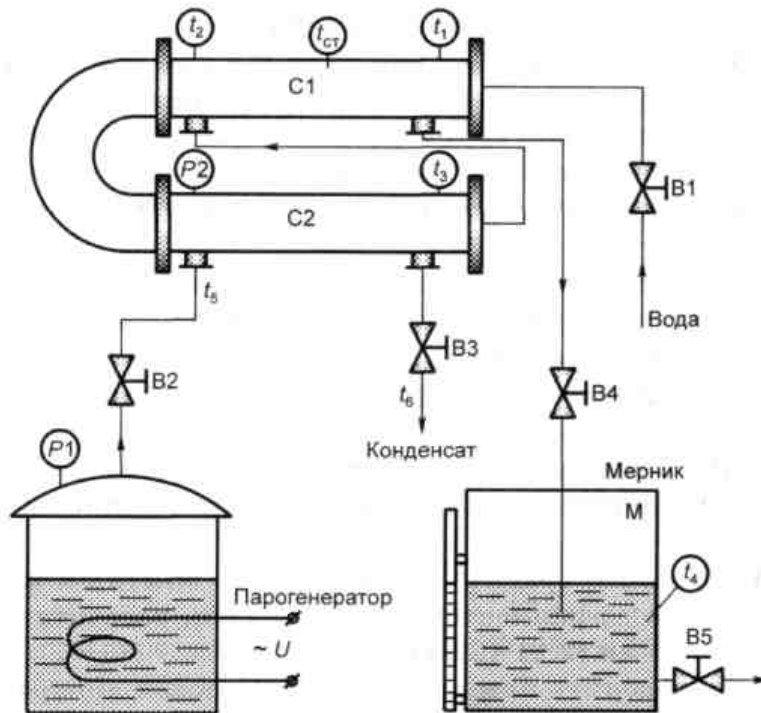


Рис. 4.1. Схема установки

Як теплообмінне середовище використовується вода. У даній роботі використовуються два однакові кожухотрубні теплообмінники (секція С<sub>1</sub>- рекуператор; секція С<sub>2</sub>- нагрівач), які сполучені між собою перехідним коліном послідовно по трубному простору. Кожухотрубний теплообмінник складається з пучка трубок, кінці яких закріплені в трубних решітках, і зовнішнього корпусу (кожуха). Призначення теплообмінника - передача теплоти від однієї речовини, що проходить по трубному (або міжтрубному) простору теплообмінника, до іншої речовини, що проходить по міжтрубному (або трубному) простору.

Кожухотрубний теплообмінник виготовлений з нержавіючих трубок діаметром 6,1мм, розміщених в сталевому корпусі. Число трубок- 8,

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
робоча довжина кожної трубки- 700мм. Технічна характеристика теплообмінника представлена в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Технічна характеристика теплообмінника

Показник	Позначення	Одиниця	Значення
Довжина секції	$L$	м	0,72
Зовнішній діаметр	$D$	м	$36 \cdot 10^{-3}$
Кількість трубок	$n$	шт	8
Внутрішній діаметр трубки	$d_{\text{в}}$	м	$4 \cdot 10^{-4}$
Зовнішній діаметр трубки	$d_{\text{н}}$	м	$6 \cdot 10^{-3}$
Робоча довжина трубки	$l$	м	$7 \cdot 10^{-3}$
Матеріал трубки	—	—	X18H9T

Для обігріву секції С2 використовується насичена водяна пара, що поступає в міжтрубний простір секції від електричного парогенератора.

Установка працює таким чином. При відкритті вентиля В1 вода з трубопроводу поступає в трубний простір секції С1, де нагрівається від температури  $t_1$  до температури  $t_2$  (температури регенерації) за рахунок охолодження гарячого продукту, що поступає в міжтрубний простір з секції С2 від температури  $t_3$  до  $t_4$ . Потім по перехідному коліну вода поступає в трубний простір секції С2, де паром нагрівається до температури  $t_3$ .

Таким чином, в секції С2 відбувається процес нагрівання, а в секції С1- процес рекуперації теплоти.

Насичена гріюча пара з парогенератора безперервно поступає по паропроводу в міжтрубний простір секції С2, віддаючи теплоту воді, конденсується на зовнішній поверхні пучка труб.

Процес конденсації протікає при постійному тиску, оскільки конденсація- це фазовий перехід, і, отже, при постійній температурі  $t_6$  практично однаковою в будь-якому місці міжтрубного простору секції С2.

Конденсат гріючої пари з міжтрубного простору секції С2 повертається в парогенератор.

Для виміру об'єму води, що пройшов через секції С1 і С2, є мірник

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

М, шкала якого проградуєвана в літрах.

Температури середовищ вимірюють термометрами.

### **Методика проведення роботи**

Для дослідження процесу рекуперації тепла необхідно відкрити вентиль В1 подачі води і заміряти витрату води, що поступає в мірник М.

Потім зняти показники термометрів і манометра  $P2$  і занести їх в табл.

4.2. Причому знімати показники приладів необхідно при сталому режимі, який настає тоді, коли покази термометра  $t_3$  не змінюються протягом 2-3 хв.

Таблиця 4.2

№ п/п	V, л	т, с	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_{cm}, ^\circ\text{C}$	$t_4, ^\circ\text{C}$
1						
2						
3						
4						

№ п/п	$t_6, ^\circ\text{C}$	$t_{cm}, ^\circ\text{C}$	$t_6, ^\circ\text{C}$	$P_2, \text{кг/см}^2$	$t_3, ^\circ\text{C}$
1					
2					
3					
4					

$t_1$  - температура води на вході в трубний простір секції С1;

$t_2$  - температура води на виході із секції С1;

$t_3$  - температура води на виході із секції С2;

$t_4$  - температура води на виході із міжтрубного простору секції С1;

$t_6$  - температура конденсації пари, яка виходить з секції С2;

$P_2$  - тиск грючої пари в паровій сорочці секції С2;

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

$t_{cm}$ - температура стінки секції С2;

$t_e$ - температура повітря в приміщенні;

$t_5$ - температура гріючої пари.

Провести 3-4 досліди при різних витратах води. Результати випробувань занести в табл. 4.2.

Користуючись таблицею залежності температури насиченої пари від тиску, визначити температуру  $t_5$  за тиском  $P_2$  і результати занести в табл. 4.2.

### **Обробка дослідних даних**

1. Підрахувати поверхню теплообміну секції:

$$F = \pi(d_n + d_e)ln/2,$$

де  $n$ - число трубок;

$l$  - їх довжина, м;

$d$  - діаметр, м.

2. За рівнянням витрати визначити швидкість води в трубному просторі:

$$\omega = V/f\tau,$$

де  $f = \pi d^2 B n / 4$  - площа поперечного перетину восьми труб, м<sup>2</sup>.

3. Визначити середню температуру нагрітої води в першій секції:

$$t_{cp1} = (t_1 + t_2) / 2.$$

4. Визначити середню різницю температур  $\Delta t_{cp1}$  і  $\Delta t_{cp2}$  між середовищами в кожній секції за формулою (4.5) або (4.6). Для зручності розрахунку рекомендується побудувати температурні графіки для кожної секції (приклад побудови на рис. 4.2).

Кількість води, що проходить через трубний і міжтрубний простір секції С1, який вимірюється в мірнику об'ємним методом, однакова. Таким чином, повернення теплоти при регенерації відбувається в умовах масової рівності потоків теплообмінних рідин — холодного продукту і

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
 гарячого. Оскільки питома теплоємність холодного і гарячого продукту мало відрізняються один від одного, то це означає, що практично робота регенератора відбувається при рівності водяних еквівалентів обох рідин:

$$W = Cm,$$

де  $m$  - масова витрата води, кг/с;

$C$  - теплоємність води, Дж/(кг·К).

В цьому випадку скільки теплоти віддасть гаряча рідина, стільки придбає холодна, тому при протічці температури середовищ вздовж поверхні теплообмінника змінюватимуться за лінійним законом (рис. 4.2а), а температурний графік представлятиме дві паралельні прямі.

5. Підрахувати коефіцієнт теплопередачі для секції регенерації в кожному досліді за формулою

$$k = \frac{mc(t_2 - t_1)}{F\Delta t_{cp}}$$

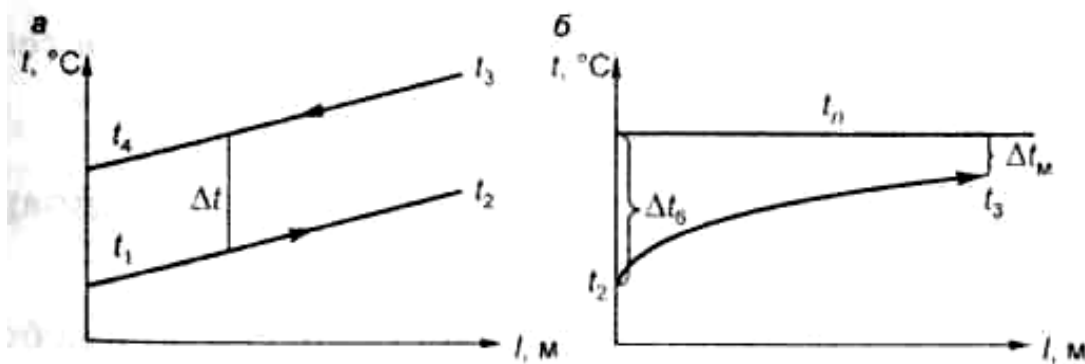


Рис.4.2. Температурні графіки секції С1 (а) і С2 (б)

де  $m$  - масова витрата води в трубному просторі, кг/с;

$c$  - теплоємність води, Дж/(кг·К);

$t_2 - t_1$  - ступінь нагрівання або охолодження води в трубному просторі секції, °С.

6. Розрахувати коефіцієнт регенерації за формулою (4.3).

7. За формулою (4.12) розрахувати втрату теплоти в навколишнє середовище. Результати обробки дослідних даних записати в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

№ п\п	$\omega$ , м\с	$t_{cp1}$ , °С	$t_2 - t_1$ , °С	$t_3 - t_1$ , °С	$\varepsilon$
1					
2					
3					
4					
№ п\п	$\Delta t_{cp1}$ , °С	$k_1$ , Вт/м <sup>2</sup> К	$k_{1расч}$ , Вт/м <sup>2</sup> К	$\Delta t_{cp2}$ , °С	$Q_p$ , Вт
1					
2					
3					
4					

8. Для аналізу впливу швидкості руху води на коефіцієнт теплопередачі побудувати на міліметровці графіки залежності  $k=f(\omega)$ . Отримані в досліді значення зрівняти з розрахованими за рівняннями (4.8) -(4.11).

### Правила і порядок виконання роботи

Установка складається з двох однакових кожухотрубних теплообмінників (секція С1 — рекуператор; секція С2 — нагрівач). Кожен кожухотрубний теплообмінник складається з пучка восьми НЖ трубок діаметром 6x1 мм, кінці яких закріплені в трубних решітках зовнішнього сталевго корпусу (рис. 4.3).

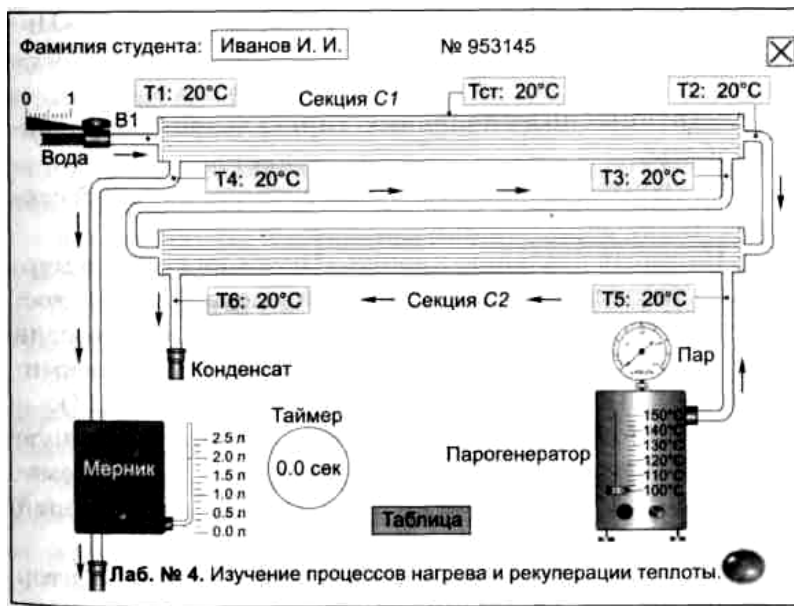


Рис. 4.4. Установка для дослідження процесу рекуперації

Завдяки віртуальним можливостям лабораторної роботи, секції умовно показані в поперечному перетині (рис. 4.4 на панелі «Таблица»). Кількість води, яка поступає, регулюється вентилем В1, а на корпусі парогенератора є овальна кнопка «Вкл» і регулятор температури насиченої пари. Для оцінки витрати води служить мірник з таймером.

Роботу слід виконувати відповідно до інструкції по виконанню віртуальної лабораторної роботи. При цьому температура води, що поступає, дорівнює 100 °С, а температура навколишнього повітря - 20 °С. У процесі виконання роботи необхідно встановити три режими руху води і відповідні їм значення тиску пари з метою підтримки постійної температури пастеризації  $t_3 = 600$  °С і визначити в кожному досліді витрату води і температури контрольних точок трубчастого теплообмінника. Значення температур можна копіювати і вставляти у відповідні клітинки таблиці вимірюваних параметрів за допомогою штатних команд «Копировать-Вставить». Таблицю можна викликати натисненням червоної кнопки «Таблица», а закрити овальною кнопкою «Закреть».

Всі маніпуляції на екрані проводяться за допомогою миші. Для управління кнопками і регуляторами приладів досить помістити курсор в

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
червону область керованого об'єкту, натиснути ліву кнопку і переміщувати мишу в потрібному напрямі. Для підвищення точності встановлюваних і вимірюваних величин можна переходити в режим збільшення зображення екрану. При цьому правою кнопкою миші слід викликати меню плеєра і вибрати пункт «Увеличить». Повернутися в нормальний режим можна за допомогою команди «Показать все».

### Порядок виконання лабораторної роботи

1. Відкрийте вентиль В1 і встановіть трикутний сектор на третю риску шкали.

2. Натисніть овальну кнопку «Пуск» на корпусі мірника, дочекайтеся, коли рівень води в мірній трубці досягне відмітки 2 л (відмічене червоною рискю), і, помістивши курсор в область пелюсток таймера, що обертаються, натисніть ліву кнопку миші і зупиніть таймер (рис. 4.5).

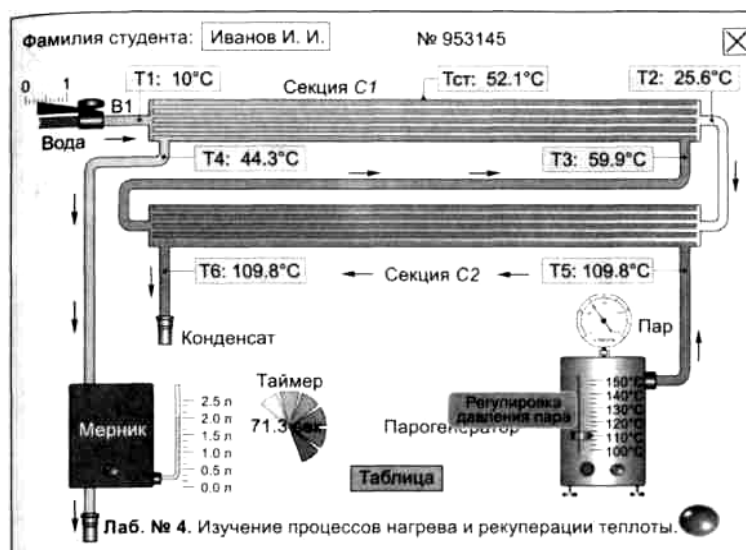


Рис.4.5. Вимірювання витрати в першому досліді

3. Скопіюйте значення таймера, натисніть червону кнопку «Таблица» і вставте отримане значення часу в таблицю для визначення витрати води, що проходить через секції C1 і C2.

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

4. Овальною кнопкою «Вкл» включіть парогенератор і дочекайтеся стабілізації показників всіх термометрів, що свідчатиме про прогрівання теплообмінника з протікаючою водою. Регулюванням температури насиченої пари досягніть стійкого значення третього манометра  $t_3=600\text{ }^\circ\text{C}$ .

5. Визначите тиск пари по стрілочному манометру і внесіть це значення до відповідного рядку таблиці вимірюваних параметрів.

6. Скопіюйте і вставте в таблицю значення температур всіх термометрів теплообмінника.

7. Перекладіть трикутний сектор вентиля В<sub>1</sub> на шосту риску шкали.

8. За допомогою мірника визначите час, за який через систему протече 2 л води, і внесіть отримане значення до відповідного елемента таблиці.

9. Регулюванням температури насиченої пари добийтеся стійкого значення температури  $600\text{ }^\circ\text{C}$  третього термометра  $t_3$ .

10. Визначите тиск пари по стрілочному манометру і внесіть це значення до відповідної комірки таблиці вимірюваних параметрів.

11. Скопіюйте і вставте в таблицю значення температур всіх термометрів теплообмінника.

12. Переведіть трикутний сектор вентиля В<sub>1</sub> на дев'яту риску шкали.

13. За допомогою мірника визначите час, за який через систему протече 2 л води, і вставте отримане значення у відповідний елемент таблиці.

14. Регулюванням температури насиченої пари добийтеся стійкого значення температури  $600\text{ }^\circ\text{C}$  третього термометра  $t_3$ (рис. 4.6).

15. Визначите тиск пари по стрілочному манометру і внесіть це значення до відповідного елемента таблиці вимірюваних параметрів.

16. Скопіюйте і вставте в таблицю значення температур всіх термометрів теплообмінника (рис. 4.7).

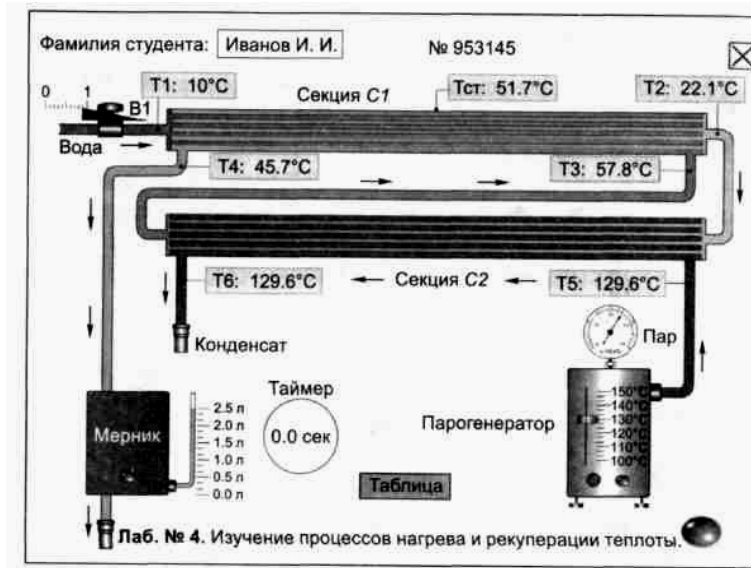


Рис.4.6. Несталий режим в третьому досліді



Рис.4.7. Підсумкова таблиця із зміряними даними і контрольним номером

17. Внесіть своє прізвище до відповідного рядка введення «Фамилия студента» і натисніть клавішу PrtScSysRq на клавіатурі комп'ютера, тим самим екранне зображення таблиці зі всіма даними буде скопійовано в системну кишеню (буфер обміну) комп'ютера.

Відкрийте в програмі Word новий документ, збережіть його під назвою «Звіт» і за допомогою стандартної команди «Вставити» перенесіть

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
екранне зображення лабораторної роботи з таблицею в документ Word.  
Тепер можна зберегти отриманий документ на якому-небудь носіїві і  
передати його викладачеві для перевірки.

### **Питання для перевірки та самоконтролю**

1. Який процес називається регенерацією теплоти?
2. Як характеризується ефективність роботи регенератора?
3. Рівняння теплового балансу теплообмінника.
4. Які чинники впливають на інтенсивність теплообміну?
5. Як визначається середня рушійна сила в теплообміннику?
6. Критерії подібності процесу теплообміну.
7. Як визначаються втрати теплоти стінок апарату в навколишнє середовище?

### Лабораторна робота № 5.

## ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ДВОКОРПУСНОЇ ВИПАРНОЇ УСТАНОВКИ

### Мета роботи

1. Вивчити процес випаровування в двокорпусній випарній установці періодичної дії.
2. Визначити коефіцієнт тепловіддачі в першому корпусі і коефіцієнт теплопередачі в другому корпусі за даними дослідів.
3. Визначити втрати тепла в навколишнє середовище.
4. Оцінити питому витрату теплоти на випаровування.

### Опис лабораторної установки

На рис. 5.1 приведена схема лабораторної установки. Перший корпус К1 працює на електричному обігріві. Всередині мідної труби, встановленої по центру скляної труби, вмонтована електрична спіраль, до виводів якої від автотрансформатора через ватметр підведено живлення. Між внутрішньою стінкою скляної труби і зовнішньою поверхнею мідної труби утворюється кільцевий зазор, куди поступає рідина з живильного бака Е3.

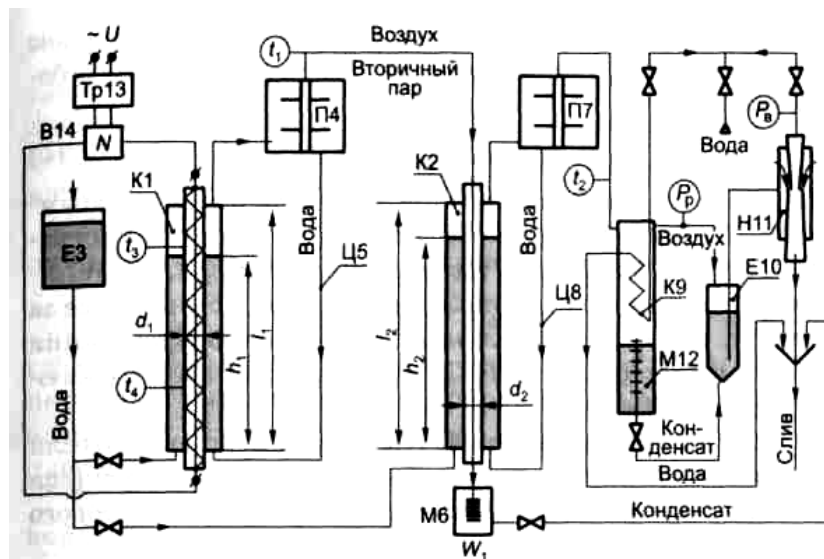


Рис.5.1. Схема експериментальної установки

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Паровідділювач П4 відцентрового типу складається з скляного корпусу, усередині якого вмонтований паропровід, сполучений з кип'ятильником. У цьому трубопроводі встановлений патрубок, пробка і відбивач. Патрубок встановлений дотично до корпусу, що забезпечує обертальний рух парорідинної суміші. При обертанні розчин відкидається до стінки корпусу і стікає по циркуляційній трубі Ц5 назад в кип'ятильник, а вторинна пара проходить через отвори відбивача і направляється через трубу в другий корпус К2 установки.

Вторинна пара, що поступає з першого корпусу, подається всередину кип'ятильної трубки, встановленої по центру скляної труби, де конденсується і збирається в мірнику М6. У другий корпус рідина також поступає з мірника Е3. Другий корпус має паровідділювач П7 і циркуляційну трубу Ц8, які працюють так само, як в першому корпусі.

Вторинна пара з другого паровідділювача П7 по трубі поступає в конденсатор К9. Пара спочатку омиває зовнішню трубу кільцевого конденсатора, потім внутрішню. Повітря, що звільнилося від конденсату, йде через патрубок в проміжну ємність Е10 і далі відкачується водоструминним насосом Н11. Конденсат стікає в скляний корпус, який одночасно є мірником М12. При відкритті крана конденсат з мірника М12 поступає в проміжну ємність Е10, звідки через водоструменевий насос Н11 видаляється з установки.

Потужність, споживана електронагрівачем першого корпусу, вимірюється ватметром В12 і регулюється за допомогою автотрансформатора (ЛАТР) Тр13.

Принцип роботи багатокорпусних випарних установок полягає в тому, що вторинна пара, отримана в першому апараті (корпусі), поступає на обігрів другого корпусу, в якому тиск в зоні кипіння має бути нижчим за тиск вторинної пари в першому корпусі. Таким чином, випаровування в другому корпусі проходить за рахунок використання теплоти вторинної

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

пари з першого корпусу.

Перший корпус лабораторної установки працює на електричному обігріві. В цьому випадку кількість тепла, що виділяється електричним нагрівачем  $Q$ , визначається за формулою

$$Q=IUt=Nt \quad (5.1)$$

де  $I$  - сила струму, А;

$U$  - напруга, В;

$N$  - потужність електронагрівача, Вт;

$t$  - тривалість досліду, с.

Кількість вторинної пари, отриманої в першому корпусі, можна визначити з рівняння теплового балансу:

$$Nt=m_1c_1(t_{\text{кип}}-t_{\text{нач}})+W_1r_{\text{в.п.}}+Q_{\text{п}} \quad (5.2)$$

де  $m_1$  - маса розчину, кг;

$c_1$  - питома теплоємність, Дж/(кг·°С);

$t_{\text{кип}}$  - температура кипіння розчину °С;

$t_{\text{нач}}$  - початкова температура розчину °С ;

$W_1$  - маса вторинної пари, отримана в першому корпусі за час  $t$ , кг;

$r_{\text{в.п.}}$  - питома теплота пароутворення вторинної пари, Дж/кг;

$Q_{\text{п}}$  - втрати тепла в навколишнє середовище, Дж.

Якщо рідина нагріта до температури кипіння, і якщо не враховувати втрати теплоти в навколишнє середовище (вся теплота пішла на випаровування), то рівняння теплового балансу матиме вигляд

$$Nt=W_1r_{\text{в.п.}} \quad (5.3)$$

При стаціонарному тепловому стані системи вся теплота, що виділилася в електронагрівачі, передається киплячій рідині. В цьому випадку рівняння тепловіддачі буде наступним:

$$N= \alpha F_1 (t_{\text{ст}} - t_{\text{кип.1}}), \quad (5.4)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі від стінки до киплячої рідини, Вт/м<sup>2</sup>·°С;

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

$t_{cm}$  - температура стінки °С;

$F_1$  - площа тепловіддачі, м<sup>2</sup>.

Температура стінки першого корпусу визначається за допомогою двох термодатчиків, закріплених на зовнішній поверхні електронагрівача. За наслідками вимірювань температури поверхні в двох точках визначається температура стінки як середнє цих двох вимірів:

$$t_{ст} = (t_3 + t_4)/2 \quad (5.5)$$

Другий корпус лабораторної установки обігривається вторинною парою, отриманою в першому корпусі. В цьому випадку тепло, що виділилося при конденсації цієї пари (без урахування нагріву розчину до температури кипіння і втрат тепла), піде на пароутворення. Рівняння теплового балансу має вигляд

$$W_1(i - C_k t_k) = W_2 r_{в.п} \quad (5.6)$$

де  $i$  - тепловміст пари, Дж/кг;

$C_k$  - питома теплоємність конденсату, Дж/(кг°С);

$t_k$  - температура конденсату °С;

$W_2$  - кількість вторинної пари, що утворилася в другому корпусі за час  $\tau$ , кг.

Теплота від конденсуючої пари  $W_2$  передається до киплячої системи в другому корпусі за рахунок теплопередачі:

$$Q_2 = k F_2 (t_1 - t_{кип.2}) \tau \quad (5.7)$$

де  $k$  - коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>°К);

$t_1$  - температура гріючої пари (температура вторинної пари, що вийшла з першого корпусу), °С;

$F_2$  - поверхня теплопередачі, м<sup>2</sup>.

При сталому процесі випаровування в другому корпусі

$$W_2 r_{в.п} = F k (t_1 - t_{кип.2}) \tau \quad (5.8)$$

### **Порядок роботи випарної установки**

При відкритті вентиля подачі води стрілка манометра покаже тиск

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

води перед соплом водострумного насоса Н11. Вода, виходячи з сопла, захоплюватиме за собою повітря. За рахунок цього в установці створюється тиск нижче атмосферного (вакуум), що можна спостерігати по вакуумметру  $P_e$ . При відкритті крана вода піде в конденсатор К9, що можна спостерігати по струменю води, що виходить з трубки у воронку для зливу. При відкритті кранів розчин поступить в перший корпус К1 і в другий К2. При включенні в мережу електронагрівача нагріватиметься розчин. Після певного часу розчин в першому корпусі закипить. Вторинна пара з крапельками розчину поступає в паровідділювач П4, де відбувається відділення від пари крапельок рідини, які по циркуляційній трубці Ц5 повертаються в корпус К1. Вторинна пара з першого корпусу піде в другий і буде використаний як грюча пара. Розчин, що знаходиться в другому корпусі К2, закипить, і вторинна пара разом з крапельками розчину викидатиметься через ріжок в корпус паровідділювача П7. Рідина відкидатиметься до стінки і стікатиме по циркуляційній трубці в другий корпус, а вторинна пара піде в конденсатор К9. Пара сконденсується і опуститься в нижню частину конденсатора (у мірник М12). Повітря відкачуватиметься насосом Н11. Як тільки рівень конденсату в мірнику підходитиме до конденсатора, необхідно відкрити кран, і конденсат насосом не буде видалений з установки. Після закінчення роботи відключається подача живлення на електронагрівач і холодної води.

### **Методика проведення роботи**

1. Заповнити водою живильний бачок Е3, потім відкрити кран і наповнити перший корпус на задану викладачем висоту. Заповнити другий корпус на вказану висоту.

2. Регулюючи вентилем тиск води перед соплом водострумного насоса, створити певне розрідження в другому корпусі.

3. Включити електричний нагрівач в мережу, встановивши Латром

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
 задану потужність. Спочатку закипить вода в першому кип'ятильнику. Кипіння в другому корпусі почнеться після того, як рідина прогріється до температури кипіння.

4. При сталому процесі треба заміряти час наповнення певної кількості конденсату вторинної пари в мірниках М6 і М12. Для цього треба закрити крани зливу з мірників і включити секундомір.

5. Далі слід стежити за температурою по термометрах  $t_1, t_2$ . Заміряти температуру стінки нагрівача за показами термопар  $t_3$  і  $t_4$ . Рівень наповнення кип'ятильних трубок, вакуум в другому корпусі, потужність, споживану електронагрівачем, треба підтримувати постійними протягом досліду. Всі спостереження записуються в табл. 5.1.

### Обробка дослідних даних

1. За експериментальними даними для першого корпусу визначають гідростатичну депресію. Оскільки у першому і другому корпусах кипіла чиста вода, то температурна депресія  $\Delta t_1 = 0$ . Гідравлічну депресію приймають  $\Delta h = 0$ , оскільки її значення в даному випадку мале і ним можна знехтувати.

Таблиця 5.1

№ досліду	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_3, ^\circ\text{C}$	$t_4, ^\circ\text{C}$	$N, \text{Вт}$
1					
2					
3					
№ досліду	$W_1, \text{кг}$	$W_2, \text{кг}$	$t, \text{с}$	$h_1, \text{м}$	$h_2, \text{м}$
1					
2					
3					

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

2. По температурі  $t_{13}$  таблиці «Залежність властивостей насиченої водяної пари від температури» (див. Додаток 2) визначають тиск вторинної пари в першому корпусі  $p_{в.п.1}$ .

3. Додатковий тиск із-за наявності стовпа рідини в першому корпусі приймають як середнє по висоті  $H=h_1$ :

$$\Delta p_1 = \rho g h_1 / 2.$$

4. Додаючи до тиску пара  $p_{в.п.1}$  величину додаткового тиску  $\Delta p_{в.п.1}$ , отримують загальний тиск:

$$p_1 = p_{в.п.1} + \Delta p_1$$

5. Температуру кипіння рідини в першому корпусі  $t_{кип.1}$  розраховують за формулою

$$t_{кип.1} = t_{в.п.1} + \Delta_2$$

6. Аналогічно проводиться розрахунок температури кипіння рідини в другому корпусі  $t_{кип.2}$ , при цьому в розрахунках використовуються значення  $t_2, h_2$ .

7. Далі підраховують поверхню теплообміну в кожному корпусі:

$$F = \pi d l,$$

де  $d$ - зовнішній діаметр кип'ятильної труби, м;

$l$ - довжина кип'ятильної труби, м.

Для першого корпусу  $l_1 = 0,84$  м,  $d_1 = 0,016$  м.

Для другого корпусу  $l_2 = 0,62$  м,  $d_2 = 0,018$  м.

8. Температура стінки електронагрівача першого корпусу визначається за допомогою двох термопар, закріплених на зовнішній поверхні електронагрівача. За даними вимірювань температури поверхні в двох точках визначається температура стінки як середнє цих двох вимірів:

$$t_{cm} = (t_3 + t_4) / 2$$

9. Коефіцієнт тепловіддачі від стінки до киплячої рідини в першому корпусі ( $Вт/м^2 \cdot К$ ) визначається за формулою

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

$$\alpha = \frac{N}{F_1(t_{CT} - t_{кип.1})}$$

10. Коефіцієнт передачі для другого корпусу розраховують за формулою

$$k = \frac{W_2 r_{в.п.}}{F_2(t_1 - t_{кип.2})\tau}$$

*Примітка: Значення  $W_2$  слід перевести в систему СІ, а розмірність  $r_{в.п.}$  повинна бути виражена в Дж/кг.*

11. Теплові втрати для першого корпусу без врахування витрати теплоти на нагрівання рідини за одиницю часу розраховують за формулою

$$q_n \approx N - W_1 r_{в.п.} \frac{1}{\tau}$$

*Примітка: Значення  $W_1$  слід перевести в систему СІ, а розмірність  $r_{в.п.}$  повинна бути виражена в Дж/кг.*

12. Результати обробки дослідних даних записують в табл. 5.2.

Таблиця 5.2

№ досліду	$t_{кип1}, ^\circ\text{C}$	$t_{кип2}, ^\circ\text{C}$	$F_1, \text{м}^2$	$F_2, \text{м}^2$
1				
2				
3				
№ досліду	$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$Q_n, \text{Дж}$	$k, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$q, \text{Дж}\cdot\text{с}$
1				
2				
3				

### **Правила виконання роботи**

Вода в першому корпусі випаровується, нагріваючись за допомогою електричної спіралі. У другому корпусі нагрів води проводиться парою з першого корпусу. Для зниження температури кипіння води в другому корпусі створюється певне розрідження за допомогою спеціального

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
водяного насоса (рис. 5.2).

Вода в перший корпус поступає з бака Е3 за принципом сполучених посудин, і тому висота  $h_1$  практично не змінює свого значення. У другий корпус вода поступає з бака Е3 через клапан Кл1, і протягом всього експерименту через нього проводиться автоматичне підживлення другого корпусу з метою підтримки незмінним рівня  $h_2$ .

Клапани Кл2 і Кл3 служать для видалення конденсату з мірників М6 і М12.

Віртуальне обладнання максимальне наближено до реального і підчиняється таким же командам. Проте з метою прискорення проведення віртуальної лабораторної роботи час в ній тече води в чотири рази швидше. При цьому таймер показує правильне значення часу, і його покази слід вважати дійсними.

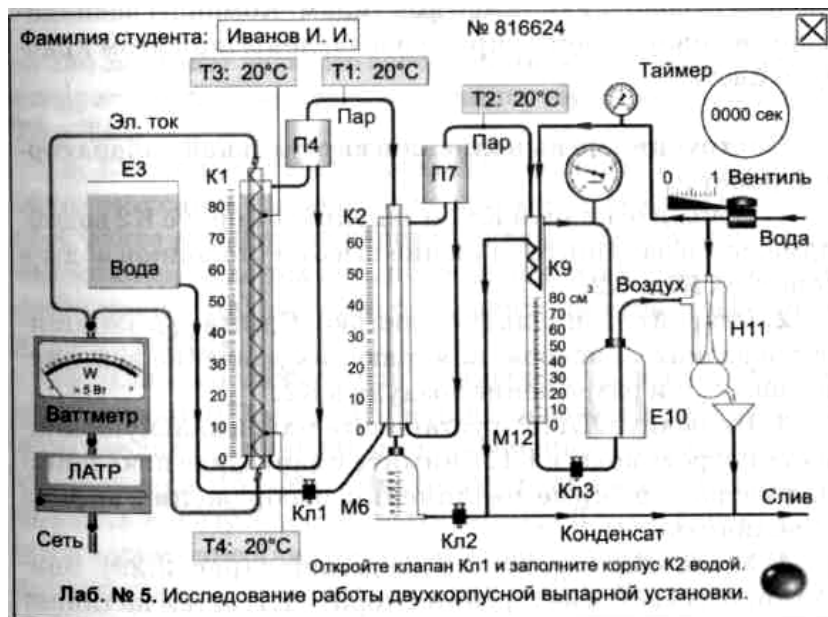


Рис. 5.2. Віртуальна установка для дослідження випаровування

Для підвищення точності встановлюваних і вимірюваних величин можна переводити роботу в режим збільшення зображення екрану. При цьому правою кнопкою миші слід викликати меню плеєра і вибрати пункт «Увеличить». Повернутися в нормальний режим можна за допомогою команди «Показать все».

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Виконувати роботу необхідно, притримувавшись інструкції, інакше можна буде отримати некоректні дані. Зверніть увагу, що зливати конденсат з обох мірників потрібно повністю, повторюючи (якщо потрібно) дану операцію до тих пір, поки лабораторна робота не перемкнеться на наступний режим. Для того, щоб правильно виконувати роботу, досить читати і слідкувати за командами, що оновлюються. Команди розташовані в нижній частині екрану і виділені шрифтом червоного кольору.

### **Порядок виконання лабораторної роботи**

1. Відкрийте клапан Кл1 і заповніть корпус К2 водою. Виміряйте і запишіть значення висоти стовпчиків води в корпусах К1 і К2.

2. Відкрийте вентиль (повністю). Зніміть і запишіть показники приладів, що вимірюють тиск води перед насосом і розрідження повітря в К2.

3. Включіть ЛАТР і встановіть максимальну потужність нагріву води в К1. Зніміть і запишіть свідчення ватметра в режимі збільшення зображення екрану «Увеличить».

4. Установка поступово нагрівається (рис. 5.3). Спочатку прогрівається внутрішній корпус К1, потім починає закипати вода в К1, внутрішній корпус К2 починає розігріватися за допомогою пари з К1, і в ньому також поступово закипає вода. Після закінчення всіх цих процесів слід зняти і записати покази термометрів Т1, Т2, Т3 і Т4.

5. Як тільки установка вийде на перший режим, необхідно злити конденсат з мірників М6 і М12. Процес зливу конденсату через клапани Кл2 і Кл3 слід проводити до тих пір, поки не з'явиться команда: «После достижения 100 мл в М6 остановите таймер и измерьте уровень в М12».

6. Для того, щоб точніше виміряти рівень в М12 після досягнення 100 мл в М6, потрібно перевести роботу в режим збільшення екрану і одночасно спостерігати рівні мірників М6 і М12. Значення рівня в М12

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
 потрібно запам'ятати відразу ж зупинити таймер. Для зупинки таймера досить клікнути лівою кнопкою миші в області пелюсток, що обертаються (рис. 5.4). Запишіть отримані значення рівня і часу.

7.Знову злийте конденсат з мірників і за допомогою ЛАТРа встановіть нову потужність електричного нагрівача. Зніміть і запишіть показники ватметра в режимі збільшення зображення екрану «Увеличить».

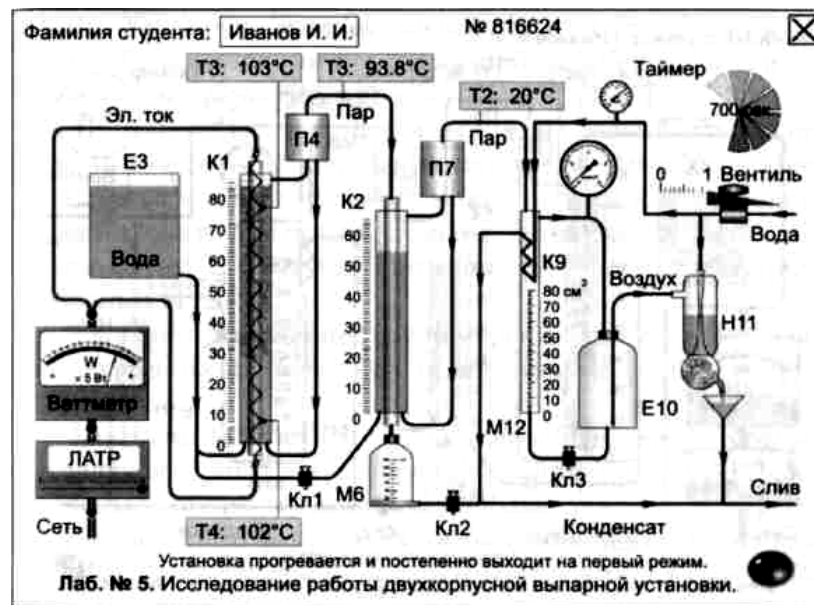


Рис. 5.3. Режим прогрівання

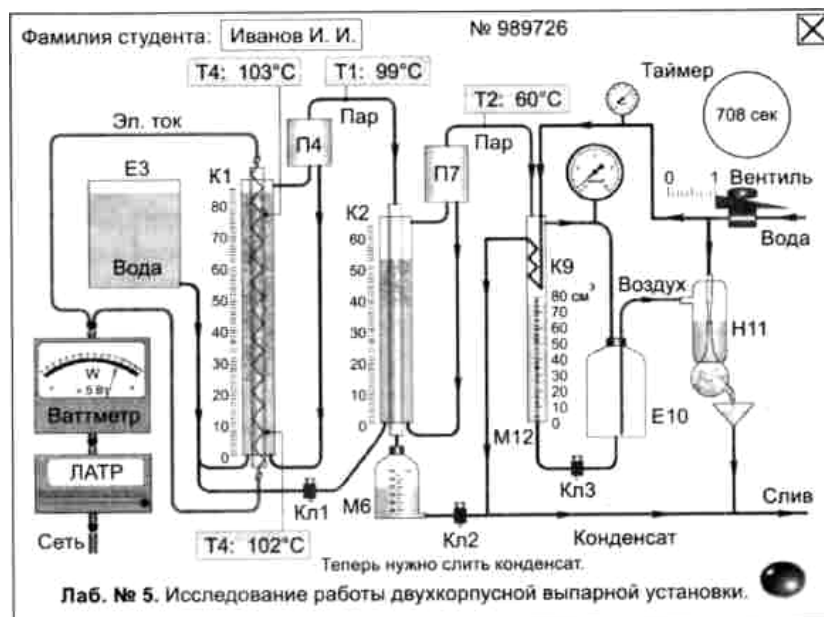


Рис. 5.4. Зупинка таймера і вимірювання рівня в М12

8. Установа поступово перейде в другий режим роботи. Після закінчення переходу необхідно знову зняти і записати покази термометрів Т1, Т2, Т3 і Т4.

9. Як тільки установка вийде на другий режим, необхідно злити конденсат з мірників М6 і М12. Процес зливу конденсату через клапани Кл2 і Кл3 слід ініціювати до тих пір, поки не з'явиться команда: «Після досягнення 100 мл в М6 зупинить таймер і виміряйте рівень в М12».

10. Повторіть процедуру вимірювання рівня в М12 і зупиніть таймер. Запишіть отримані значення рівня і часу.

11. Злийте конденсат з мірників і за допомогою ЛАТРа встановіть нову потужність електричного нагрівача. Зніміть і запишіть покази ватметра в режимі збільшення зображення екрану «Увеличить».

12. Установка поступово перейде в третій режим роботи. Після закінчення переходу необхідно знову зняти і записати покази термометрів Т1, Т2, Т3 і Т4.

13. Як тільки установка вийде на третій режим, необхідно злити конденсат з мірників М6 і М12. Процес зливу конденсату через клапани Кл2 і Кл3 слід ініціювати до тих пір, поки не з'явиться команда: «Після досягнення 100 мл в М6 зупинить таймер і виміряйте рівень в М12».

14. Повторіть процедуру вимірювання рівня в М12 і зупиніть таймер. Запишіть отримані значення рівня і часу.

15. На цьому робота з установкою завершується. До цього моменту всі дані і виміряні значення повинні бути внесені в таблицю вимірюваних параметрів звіту по роботі. Внесіть своє прізвище до відповідного рядка введення «Фамілія студента» і натисніть клавішу PrtScSysRq на клавіатурі комп'ютера, тим самим екранне зображення виконаної роботи буде скопійовано в системну кишеню (буфер обміну) комп'ютера.

Відкрийте в програмі Word новий документ і за допомогою

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
стандартної команди «Вставити» перенесіть екранне зображення виконаної лабораторної роботи в документWord. Тепер можна зберегти отриманий документ на будь-якому носіїві і прикласти його до звіту.

### **Питання для перевірки та самоконтролю**

1. Що називається процесом випарювання?
2. Яка рушійна сила процесу випарювання?
3. Що є грючою парою для першого корпусу випарної установки даної віртуальної лабораторної роботи?
4. Яка пара є грючою для обігрівання другого корпусу випарної установки?
5. Для чого необхідно визначати потужність?
6. Як отримати величиную коефіцієнта тепловіддачі від стінки до киплячої рідини?
7. Яка розмірність коефіцієнта тепловіддачі та коефіцієнта теплопередачі?

**асообмінні процеси**

**Лабораторна робота № 6.**

**ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ РОЗПИЛЮВАЛЬНОЇ СУШИЛЬНОЇ  
УСТАНОВКИ**

**Мета роботи**

1. Практично ознайомитися з роботою розпилювальної сушильної установки і визначити основні величини, що характеризують її ефективність.

2. Побудувати зображення процесу сушіння на діаграмі Рамзіна.

**Основні теоретичні положення**

Ефективність роботи сушильної установки можна оцінити параметрами, описаними нижче.

1. Питома витрата сушильного агента (кг сухого повітря/кг випареної вологи):

$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{x_2 - x_0}, \quad (6.1)$$

де  $x_0$  і  $x_2$  - вологовміст сушильного агента на вході і виході з сушильної установки відповідно (кг вологи/кг сухого повітря);

$L$  - витрата сухого повітря, кг/с;

$W$  - масова витрата випареної вологи, кг/с.

2. Питома витрата теплоти (кДж/кг випареної вологи):

$$q = \frac{Q}{W} = \frac{i_1 - i_0}{x_2 - x_0} \quad (6.2)$$

де  $i_0$  і  $i_1$  - ентальпії сушильного агента на вході в калорифер і в сушильну камеру відповідно.

3. Вологознімання з 1 м<sup>3</sup>робочого об'єму сушильної камери (кг

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
випарованою вологи/1 м<sup>3</sup> сушильної камери за год.):

$$A = W/V, \quad (6.3)$$

де  $V$  -об'єм циліндрової частини сушильної камери, м<sup>3</sup>.

4. Тепловий ККД установки:

$$\eta = r/q, \quad (6.4)$$

де  $r$ - теплота пароутворення при температурі мокрого термометра (кДж/кг випарованої вологи).

### **Опис лабораторної установки**

На рис. 6.1 представлена лабораторна установка. Рідкий продукт з бака подається на дисковий розпилювач насосом. Розпилювання рідкого продукту здійснюється в сушильній камері з конічним днищем. Внутрішній діаметр сушильної камери рівний 1,2 м, а висота циліндричної частини камери -1,0 м. Сушіння проводиться повітрям, нагрітим в калорифері. Повітря подається в калорифер вентилятором, що працює на нагнітання. Сухі тверді частинки по повітроводу разом з відпрацьованим сушильним агентом поступають в циклон. Сухий продукт збирається в приймачі готового продукту.

Температуру, що поступає в камеру сушильного агента, вимірюють термометром опору 10, а сушильного агента, що йде з камери, — термометром опору 11. Витрата сушильного агента вимірюється діафрагмою, встановленою на трубопроводі за циклоном. Очищення сушильного агента, що подається в камеру, здійснюється тканинним фільтром.

Вологовміст атмосферного повітря вимірюється психрометром, встановленим в приміщенні.

Продуктивність сушильної установки по рідкому продукту визначають об'ємним методом, для чого вимірюють час закінчення заданого об'єму рідкого продукту з бака. Висушений матеріал вивантажують з приймача і зважують.

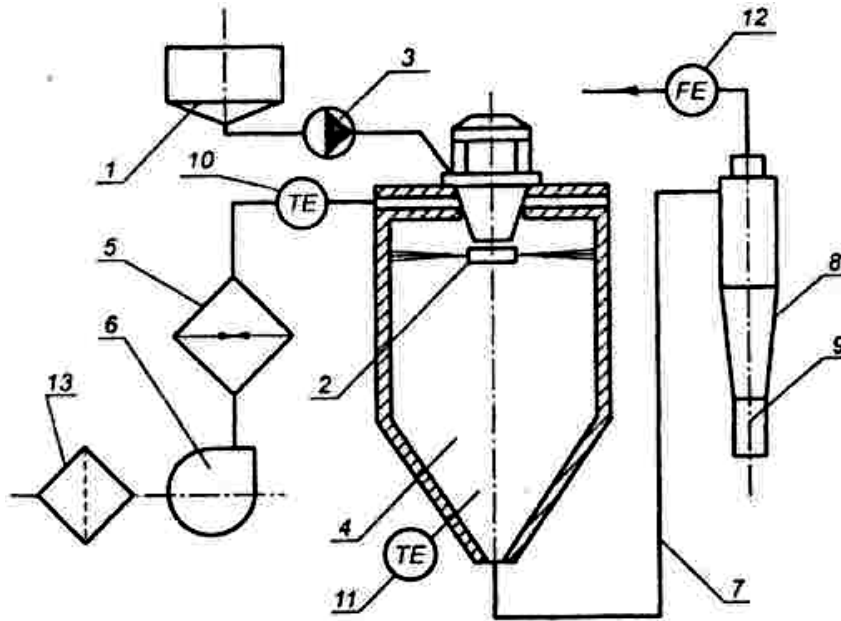


Рис. 6.1. Схема лабораторної розпилювальної установки:

- 1 - бак з вихідним матеріалом;
- 2 - дисковий відцентровий розпилювач;
- 3 - насос;
- 4 - сушильна камера;
- 5 - калорифер;
- 6 - вентилятор;
- 7 - повітропровід;
- 8 - циклон-розвантажувач;
- 9 - приймач готового продукту;
- 10, 11 - термометри опору;
- 12 - діафрагма;
- 13 - фільтр.

### Методика виконання роботи

1. Ознайомитися з конструкцією установки, принципом її дії і лише

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
після співбесіди з викладачем приступити до виконання роботи.

2. Всю роботу виконувати тільки під керівництвом викладача або лаборанта кафедри.

3. Підготувати розчин для сушки шляхом змішування сухого матеріалу з водою, заздалегідь визначивши маси сухого матеріалу і води.

4. У бак залити воду.

5. Включити вентилятор і, поступово включаючи нагрівачі калорифера, довести температуру сушильного агента на вході в камеру до заданої (покази термометра 10).

6. Після встановлення заданої температури на вході в камеру, регулюючи витрату води насосом, встановити необхідну температуру сушильного агента на виході по термометру 11.

7. Після видалення з бака води залити в нього підготовлений розчин і, якщо необхідно, провести коректування режиму відповідно до показів термометра 11. Відмітити час початку сушіння матеріалу. Процес подачі в сушарку розчину проводити після видалення води без перерви.

8. Реєстрацію показів контрольно-вимірювальних приладів проводити через кожні 5-10 хв. і заносити в табл. 6.1 експериментальних даних.

9. Зважити сухий порошок, відокремлений в циклоні і зібраний в приймачі, узяти пробу для визначення вологості продукту.

10. Після закінчення дослідів необхідно промити лінію подачі розчину, для цієї мети в бак залити теплу воду. Промивання проводити протягом 10-15 хв, після чого вимкнути насос.

*Таблиця 6.1*

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

№ вимі-ру	Час $t$ , хв	Температура повітря на вході в сушильну камеру $t_1$ , °C	Температура повітря на виході з сушильної камери $t_2$ , °C	Показники дифманометра $\Delta h$ , мм вод. ст.
1				
2				

11. Відключити калорифер, залишивши включеним вентилятор. Вентилятор відключити після охолодження сушарки до 40-50°C, але не раніше чим через 15 хв після виключення розпилювача.

12. Зробити прибирання робочого місця і очищення установки (по вказівці викладача або лаборанта).

### Обробка дослідних даних і складання звіту

*Умови дослідю.*

1. Висушуваний матеріал.
2. Частота обертання розпилюючого диска  $n$ , об/с.
3. Маса початкового матеріалу (порошка)  $M$ , кг
4. Маса води для приготування суспензії  $M_w$ , кг
5. Тривалість дослідю  $t$ , с.
6. Діаметр отвору діафрагми  $d_0$ , м.
7. Вологість початкового матеріалу (порошка)  $U_k$ , % .
8. Вологість суспензії  $U_n$ , % .
9. Вологість готового продукту  $W_k$ , %
10. Показники психрометра:
  - а) сухий термометр  $t^\circ\text{C}$ ;
  - б) мокрий термометр  $t_0^m$ , °C.
11. Розміри циліндричної частини сушарки:
  - а) діаметр  $D$ , м;
  - б) висота  $H$ , м.

*Порядок розрахунків*

1. Визначити вологість матеріалу.

Для визначення вологості матеріалу необхідно узяти наважку початкового матеріалу масою  $m_H$  і помістити її в сушильну шафу при температурі 130 °С на 45 хв. Вологість матеріалу розрахувати за формулою

$$U = \frac{(m_H - m_K)}{m_H} 100, \quad (6.5)$$

де  $m_H, m_K$ — маси наважок до і після сушіння відповідно.

Потім розрахувати вологість матеріалу до сушки:

$$U = \frac{M_B + M'}{M + M_B}, \quad (6.6)$$

де  $M' = M \frac{U'_H}{100}$ ;

$M$  – маса вихідного порошку, кг;

$U'_H$  – вологість вихідного порошку, %;

$U_H$  – вологість суспензії, яка поступає на сушіння, %;

$M_B$  – маса води, в якій розчиняється вихідний порошок, кг.

2. Розрахувати середнє значення  $t_1, t_2$  і  $\Delta h$  за час досліду і надалі в розрахунках їх використовувати (значення потрібно зберегти).

3. Розрахувати масову витрату сушильного агента (повітря)

$$L' = \frac{\pi}{4} d_0^2 \rho \alpha \sqrt{2\Delta h g}, \quad (6.7)$$

$$\rho = 1,295 \frac{273}{(273 + t^\circ C)}, \quad (6.8)$$

де  $d_0$  – діаметр отвору діафрагми, м;

$\rho$  – густина повітря при  $t_2$ , кг/м<sup>3</sup>;

$\alpha$  – коефіцієнт витрати діафрагми,  $\alpha = 0,8$ ;

$\Delta h$  – покази дифманометра у діафрагми, мм вод. ст.;

$g$  – прискорення вільного падіння,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>.

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

4. Розрахувати продуктивність сушарки  $G_H$  за початковим вологим матеріалом (кг/с):

$$G_H = \frac{M + M_B}{\tau} \quad (6.9)$$

5. Розрахувати продуктивність сушарки за випарованою вологою (кг/с):

$$W = G_H \frac{U_H - U_K}{100 - U_K} \quad (6.10)$$

де  $U_H$  - початкова вологість матеріалу % ;

$U_K$  - кінцева вологість матеріалу % .

Вологість готового продукту  $U_K$  розрахувати аналогічно вологості матеріалу до сушіння.

6. Розрахувати продуктивність сушарки за сухим матеріалом (кг/с):

$$G_K = G_H - W \quad (6.11)$$

7. Розрахувати вологовміст повітря на вході в калорифер  $x_0$  (кг вологи/кг абсолютно сухого повітря). По психрометру визначити відносну вологість  $\varphi_0$  повітря, що поступає в калорифер. Для цієї мети виміряти температуру повітря  $t_0$  сухим і мокрим термометром. Обчислити  $(t_0 - t^{M_0})$  і визначити  $\varphi_0$  (див. Додаток 1). Вологовміст  $x_0$  визначити з діаграми Рамзіна за відомими значеннями  $\varphi_0$  і  $t_0$  (див. рис. 1.5).

8. Розрахувати вологовміст повітря на виході з апарату (кг вологи/кг абсолютно сухого повітря):

$$x_2 = x_0 + W/L \quad (6.12)$$

де  $L = L'/(1 + x_0)$  - витрата абсолютно сухого повітря, кг/с.

9. Розрахувати питому витрату абсолютно сухого повітря (кг сухого повітря/1 кг вологи):

$$l = L/W \quad (6.13)$$

10. За відомими значеннями  $t_0$ ,  $x_0$ ,  $t_2$ ,  $x_2$  і  $t_1$  побудувати на діаграмі Рамзіна зображення дійсного і теоретичного процесів сушіння (див. рис. 1.5). Лінія  $M_0M_1$  зображає процес нагрівання повітря в калорифері,  $M_1M_2$  - дійсний процес сушки,  $M_1M_2'$  - процес в теоретичній сушарці. Лінія

### Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

похилої  $M_1M_2'$  характеризує теоретичний процес в сушильній камері, який йде при постійній ентальпії  $i_2' = \text{const}$ . Її проводять з точки  $M_1$  по ізоентальпії, яка проходить через цю точку до перетину з ізотермою  $t_2$ .

11. За даними побудови визначити питому витрату теплоти  $q_T$  і коефіцієнт корисної дії  $\eta_T$  теоретичної сушарки, тобто такої сушарки, в якій вся теплота, що передається повітрю, йде тільки на випаровування вологи:

$$q_T = \frac{i_2' - i_0}{x_2^T - x_0} = \frac{i_i - i_0}{x_2' - x_0}, \quad (6.14)$$

$$\eta = r/q \quad (6.15)$$

де  $r$ -питома теплота пароутворення (визначається за температурою мокрого термометра  $t_2^M$  для повітря, що виходить з розпилювальної сушарки, точка  $M_2'$ ), кДж/кг;

$i_2'$  - значення ізоентальпії, що проходить через точку  $M_2'$ , кДж/кг.

Аналогічно визначити питому витрату теплоти  $q$  і коефіцієнт корисної дії  $\eta_T$  в дійсній сушарці:

$$q = \frac{i_i - i_0}{x_2' - x_0}, \quad (6.16)$$

$$\eta_T = r'/q, \quad (6.17)$$

де  $i_i$ - значення ізоентальпії, що проходить через точку  $M_1$ , кДж/кг;

$r'$  -питома теплота пароутворення (визначається по температурі мокрого термометра для повітря, що виходить з реальної сушарки, точка  $M_2$ , кДж/кг (див. Додаток 1).

Для визначення температури мокрого термометра необхідно, наприклад, з точки  $M_2$  провести ізоентальпії до перетину з лінією відносної вологості  $\varphi = 1$  (точка  $M_3$ ), а потім визначити ізотерму, що проходить через цю точку.

12. Розрахувати витрату теплоти на процес сушки (кДж/с):

$$Q = qW. \quad (6.18)$$

13. Розрахувати втрати теплоти в сушарці (кДж/1 кг випарованої

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
вологи):

$$\Delta = q - q_T \quad (6.19)$$

і загальні втрати (кДж/с):

$$Q_{\text{пот}} = \Delta \cdot W \quad (6.20)$$

14. Визначити вологознімання з 1 м<sup>3</sup> робочого об'єму сушильної камери за формулою (6.3).

Звіт повинен містити:

- завдання;
- схему експериментальної установки (спрощену) із специфікацією;
- таблицю експериментальних даних;
- всі розрахунки по п. 1-14;
- зображення дійсного і теоретичного процесів сушіння на діаграмі Рамзіна (на листах паперу формату А4).

### **Правила і порядок виконання роботи**

У роботі потрібно правильно налаштувати установку (рис. 6.2) і отримати оптимальну кількість порошку з певною вологістю. В процесі виконання роботи необхідно визначити загальний час сушіння заданої кількості продукту, контролювати температуру сушильного агента на вході і виході з камери, а також виміряти тиск повітря на діафрагмі.

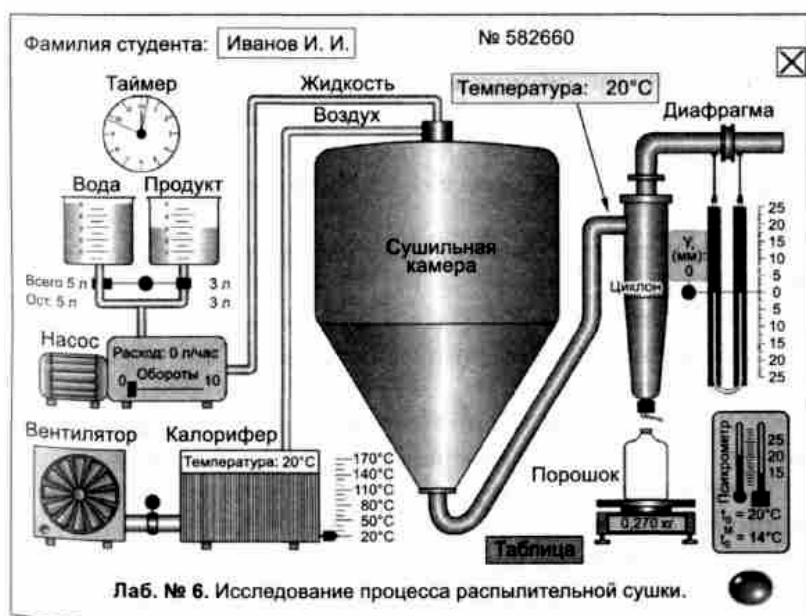


Рис. 6.2. Віртуальна установка для дослідження роботи розпилювальної сушарки

Регулювання цих параметрів виконується за допомогою насоса, що подає в сушильну камеру воду, або згущеного молока, через дисковий розпилювач.

Для підвищення точності встановлюваних і вимірюваних величин слід переходити в режим збільшення зображення екрану. При цьому правою кнопкою миші необхідно викликати меню плеєра і вибрати пункт «Увеличить». Повернутися в нормальний режим можна за допомогою команди «Показать все».

Наведенням курсора на сушильну камеру можна візуалізувати процес розбризкування висушуваного матеріалу і води.

При включенні роботи автоматично задається визначена кількість згущеного молока, в межах від 2,0 до 3,5 л. Тому якщо привести лабораторну роботу в початковий стан за допомогою кнопки «Сброс», буде встановлений новий номер роботи і інша кількість молока для сушіння.

Таймер відградуваний в хвилинали, але для прискорення

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
виконання віртуальної роботи час в ній протікає в 4 рази швидше, ніж на реальному обладнанні. Отже, потрібно вважати, що за один оберт секундної стрілки таймера проходить 1 віртуальна хвилина (0,25 від реальної).

Виконувати роботу необхідно, строго дотримуючись інструкції, інакше можна отримати некоректні дані. Всі виміряні величини необхідно внести до таблиці вимірюваних параметрів. Їх можна копіювати і вставляти за допомогою штатних команд комп'ютера.

### **Порядок виконання лабораторної роботи**

1. Включіть овальну кнопку «Вкл» на вентиляторі.
2. Натисніть червоний кружок засувки і підніміть її вгору до упору.
3. Ручкою регулювання температури калорифера встановити температуру розігрівання 162°C. Дану процедуру рекомендується проводити в режимі збільшення зображення екрану, оскільки скоректувати цю температуру надалі буде неможливо і роботу доведеться приводити в початковий стан.
4. Далі установка повинна розігріватися протягом 20 хв. Протягом цього часу можна, наприклад, виміряти і внести до таблиці дані психрометра, визначити вологість повітря і масу порожньої посудини для сухого порошку.
5. Після закінчення розігрівання устаткування слід подати в установку воду, визначивши її витрату в межах від 3 до 5 л. Потім необхідно скоректувати подачу води і добитися стійкого досягнення температури 90 °С на виході установки. Це номінальний режим, враховуючи, що установка переходить в стійкий режим протягом 5 хв (рис. 6.3).



Рис.6.3. Включения і прогрівання установки

6. Підніміть посудину для сухого порошку вгору і з'єднайте її із замковим пристроєм розвантажувального циклону.

7. Відключіть подачу води і перемкніть її на подачу продукту. Знов скорегуйте подачу і добийтеся стійкого значення температури на виході установки 90 °С. У момент перемикаання на подачу молока покази таймера обнуляються і починається відлік часу сушіння продукту.

8. Після досягнення стійкого режиму виміряйте час сушіння  $t$ , температури  $t_1, t_2$ , перепад тиску на діафрагмі  $P$  і внесіть їх до таблиці вимірюваних параметрів (рис. 6.4).



Рис.6.4. Початок сушіння продукту

9. Повторіть вказані вимірювання по середині переробки продукту і перед її закінченням.

10. Наведіть курсор на замковий пристрій розвантажувального циклону і, як тільки процес сушіння завершиться і замковий пристрій стане активним, натисніть ліву кнопку миші, при цьому посудина з сухим порошком від'єднається від циклону і переміститься на ваги і одночасно знов підключиться вода для промивки і подальшого охолодження сушильної установки (рис. 6.5).

Крім того, у момент натиснення даної кнопки зупиниться відлік таймера, його значення дорівнюватиме загальному часу сушки продукту. Внесіть це значення до таблиці.

11. Визначте масу готового продукту як різницю отриманого на вагах значення маси посудини з порошком і маси порожньої посудини і внесіть це значення до таблиці.

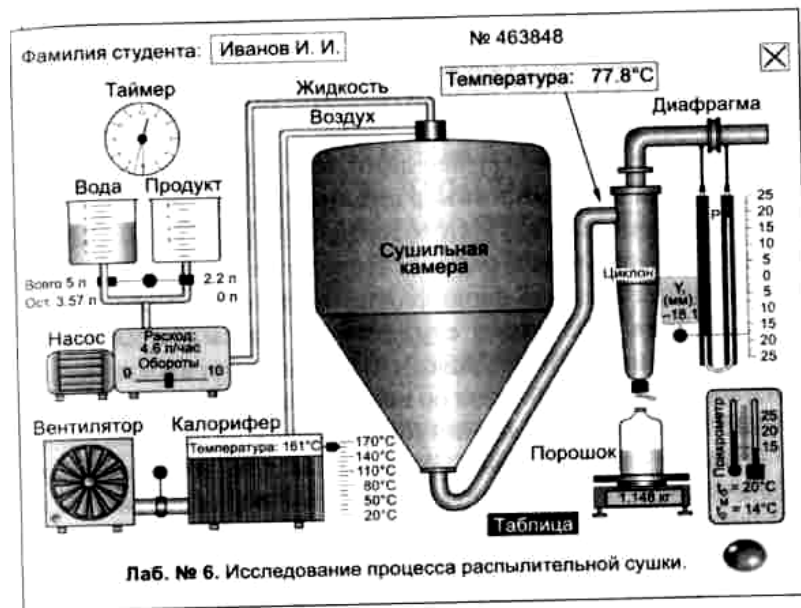


Рис.6.5. Завершення сушіння продукту, перехід до промивки і охолодження



Рис. 6.6. Визначення вологості готового продукту

12. На панелі дослідних даних і таблиці вимірюваних параметрів проведіть експрес-аналіз вологості готового продукту, для чого натисніть відповідну кнопку «Определить» (див. рис. 6.6).

13. До цього моменту всі дані і виміряні значення мають бути внесені до таблиці, і вона може бути збережена для

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
подацьшовключення в звіт про виконання лабораторної роботи. Перед збереженням підсумкової таблиці внесіть своє прізвище до відповідного рядка введення «Фамилия студента» і натисніть клавішу PrtScSysRq на клавіатурі комп'ютера, тим самим екранне зображення таблиці зі всіма даними буде скопійовано в системну кишеню (буфер обміну) комп'ютера.

Відкрийте в програмі Word новий документ і за допомогою стандартної команди «Вставити» перенесіть екранне зображення лабораторної роботи з таблицею в документ Word. Тепер можна зберегти отриманий документ на будь-якому носіїві і передати його викладачу для перевірки.

### **Питання для перевірки та самоконтролю**

1. Який вид сушіння використовується в лабораторній роботі?
2. Що таке сушіння?
3. Способи сушіння матеріалу.
4. Чим відрізняються відносна вологість і вологовміст?
5. Які періоди сушіння вам відомі?
6. Для чого необхідно знати покази психрометра?
7. Як визначається кількість вологи, що видаляється в процесі сушіння?
8. Яким чином визначається вологість готового продукту за допомогою експрес-аналізу?
9. Що зображається на I-x діаграмі?

**2.6.**

**Г**

**ідравлічні процеси**

***Лабораторна робота № 7.***

**ВИЗНАЧЕННЯ ГІДРОСТАТИЧНОГО ТИСКУ**

**Мета роботи**

1. Визначити ціну поділки стрілочного манометра в атмосферах, кгс/м<sup>2</sup>, м вод. ст., мм рт. ст, Па, враховуючи, що манометр має сто елементарних поділок.

2. Визначити густину другої рідини, вважаючи, що в лівому диференціальному п'єзометрі - вода.

**Основні теоретичні положення**

Всі рідини на Землі знаходяться під тиском поверхневих і масових сил.

До поверхневих належать сили, що діють на поверхню, які відділяють об'єм рідини, що розглядається, від газової або твердої фази. Наприклад, сила тиску атмосферного повітря або поршня на поверхню рідини.

До масових відносяться сили, напрямок і величина яких обумовлена масою самої рідини. Наприклад, сила тяжіння, сили інерції, відцентрова, доцентрова і т. п.

Найбільш простим і тим, що часто зустрічається в природі і техніці випадком рівноваги (спокою) рідини є рівновага під дією однієї поверхневої сили (сили тиску на вільну поверхню рідини)  $F_i$  однієї масової сили (сили тяжіння)  $G$ .

У результаті дії цих сил всередині рідини виникає тиск, який в будь-якій точці визначається за формулою:

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

$$p_{абс} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{F + G}{S} \quad (7.1)$$

де  $p_{абс}$ - абсолютний одиничний гідростатичний тиск в точці рідини, Н/м<sup>2</sup>;

$F$  - сила тиску на вільну поверхню рідини над розглянутою точкою, Н;

$G$  - сила гідростатичного тиску, чисельно рівна вазі рідини над розглянутою точкою, Н;

$S$ - площа поверхні, на яку діють сили, м<sup>2</sup>.

Тиск  $P$  в якій-небудь точці рідини, що виникає під дією тільки сили тяжіння, називають одиничним гідростатичним тиском:

$$p = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{G}{S} \quad (7.2)$$

Одиничний гідростатичний тиск має дві основні властивості - тиск у точці по всіх напрямках діє з однаковою силою, і ця сила спрямована завжди по внутрішній нормалі (перпендикуляру) до площі. Іншими словами, одиничний гідростатичний тиск - це стискаюча напруга, що виникає в рідині під дією сил тяжіння.

Одиничний гідростатичний тиск залежить від глибини занурення точки і ваги рідини над даною точкою:

$$p = \rho gh = \gamma h \quad (7.3)$$

де  $\gamma = \rho h$  - питома вага рідини (відношення ваги рідини до її об'єму), Н/м<sup>3</sup>;

$\rho = m / V$ - щільність рідини (відношення маси рідини до її об'єму), кг/м<sup>3</sup>;

$h$  - відстань від точки в об'ємі рідини до вільної поверхні, м.

Під вільною поверхнею розуміється поверхня розділу фаз (наприклад, рідина - газ або рідина - тверде тіло).

Якщо на вільну поверхню рідини діє атмосферний тиск  $p_0$ , то загальний або абсолютний тиск в точці рідини:

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

$$p_{абс} = p_0 + \rho gh = p_0 + p_{изб} \quad (7.4)$$

У цьому випадку одиничний гідростатичний тиск називають надлишковим тиском і позначають  $p_{изб}$ .

Якщо на вільну поверхню рідини діє тиск  $p_M$  - більший, ніж атмосферний ( $p_M > p_a$ ), тоді абсолютний тиск в точці рідини:

$$p_{абс} = p_0 + p_M + \rho gh = p_0 + p'_{изб} \quad (7.5)$$

У цьому випадку під надлишковим тиском розуміють суму тисків манометричного і гідростатичного, який дорівнює  $\rho gh$ .

Вирази (7.3) і (7.4) називаються основними рівняннями гідростатики і дозволяють розрахувати абсолютний або надлишковий тиск в будь-якій точці об'єму рідини, що знаходиться під дією однієї масової сили (сили тяжіння) і однієї поверхневої сили (сили тиску на вільну поверхню).

Гідростатичний тиск в системі СІ вимірюється в паскалях:  $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$ .

### *Визначення тиску і густини рідини*

Надлишковий тиск вимірюється манометром. Найбільш розповсюджені стрілочні манометри мембранного і сильфонного типів.

Іншим, не менш поширеним приладом для вимірювання надлишкового тиску, є рідинний манометр (п'єзометр), що представляє собою скляну вертикальну трубку, одним кінцем приєднану до ємності з рідиною. Інший кінець з'єднаний з атмосферою. П'єзометр дає показання надлишкового тиску, вираженого в метрах стовпа рідини, що заповнює п'єзометр. З рівняння (7.3) висота рідини в п'єзометрі:

$$h = \frac{p_{изб}}{\rho g} \quad (7.6)$$

Так, для вимірювання тиску, що дорівнює одній атмосфері ( $9,81 \cdot 10^4$  Па), буде потрібно п'єзометр з трубкою заповненою водою висотою:

$$h = \frac{p_{изб}}{\rho g} = \frac{9,81 \cdot 10^4}{1000 \cdot 9,81} = 10 \text{ м}$$

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

(Густина води  $\rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$  при температурі  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Таким чином, при вимірюванні тиску п'єзометром, заповненим водою, ми отримуємо покази тиску, виражене в метрах водяного стовпа:  
 $p = 10 \text{ м вод. ст.} = 1 \text{ атм.}$

При вимірюванні аналогічного тиску ртутним п'єзометром (щільність ртуті  $\rho_p = 13600 \text{ кг/м}^3$ ):

$$h = \frac{9,81 \cdot 10^4}{13600 \cdot 9,81} = 0,735 \text{ м} = 735 \text{ мм.}$$

У цьому випадку цей тиск буде виражено в міліметрах ртутного стовпа:  $p = 735 \text{ мм рт. ст.} = 1 \text{ атм.}$

Таким чином, тиск в 1 атмосферу можна виразити в найбільш поширених для гідравлічних приладів одиницях наступним чином:

$1 \text{ атм (кгс/см}^2) = 1 \cdot 10^4 \text{ кгс/м}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2 \text{ (Па)} = 10 \text{ м вод. ст.} = 735 \text{ мм рт. ст.}$

Для визначення різниці тисків у двох довільно взятих точках застосовують рідинний диференційний манометр, який представляє собою U-подібну вертикальну трубку, заповнену рідиною (найчастіше водою або ртуттю). Рідинний дифманометр дає покази різниці (перепаду) тиску, вираженої в метрах стовпа наливої в нього рідини.

У просторі, заповненому рідиною в стані спокою, завжди можна знайти поверхню, протягом якої гідростатичний тиск не змінюється. Такі поверхні називають поверхнями рівного тиску або поверхнями рівня. Поверхні рівня не перетинаються між собою і розташовані нормально до напрямку масових сил. Так, у рідині, що знаходиться у спокої під дією сили тяжіння, поверхня рівня - горизонтальна площина.

### **Опис лабораторної установки**

Принципова схема лабораторної установки представлена на рис. 7.1.

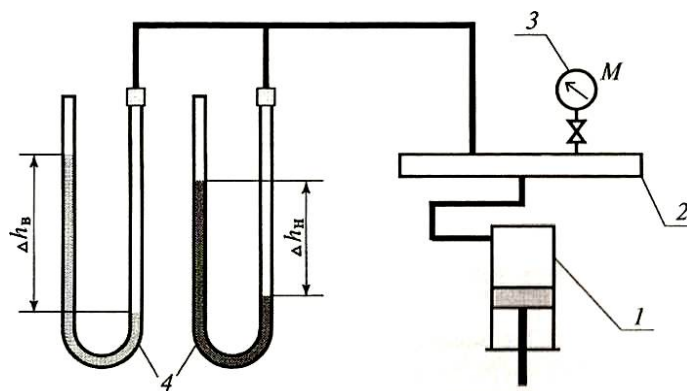


Рис. 7.1. Принципова схема установки

За допомогою насоса 1 в обмеженому об'ємі 2 створюється відповідний тиск, який фіксується манометром 3, а також двома диференціальними п'єзометрами 4, заповненими: лівий - водою, правий - рідиною невідомої густини.

За манометром 3 встановлюють тиск, далі знімають покази диференціальних п'єзометрів і, підставляючи ці значення в рівняння (7.3), розраховують ціну поділки манометра 3 і густину рідини в правому п'єзометрі.

Виміряний тиск необхідно виразити в п'яти різних одиницях і внести в табл. 7.1.

Таблиця 7.1

Одиниці вимірювання	Тиск $P$
атм(кгс/см <sup>2</sup> )	
кгс/см <sup>2</sup>	
м вод. ст.	
мм рт. ст.	
Н/м <sup>2</sup> , (Па)	

### Правила і порядок виконання лабораторної роботи

У даній роботі потрібно визначити густину рідини в правому п'єзометрі і ціну поділки механічного манометра, враховуючи, що в лівому п'єзометрі вода.

Для початку роботи повітряного насоса досить натиснути кнопку «ПУСК» або клавішу <P>, зупинити його можна в будь-який момент кнопкою «СТОП» або клавішею <S>. Клавіші діють тільки в режимі англійської розкладки клавіатури «En».

Заміри висот стовпчиків рідин в диференціальних п'єзометрах проводяться за допомогою горизонтальної лінії площині АВ і виміральної лінійки, рис. 7.2. І площина, і лінійка переміщуються по екрану за допомогою лівої кнопки миші, крім того, лінійка може переміщатися клавішами зі стрілками, також розташованими на клавіатурі.

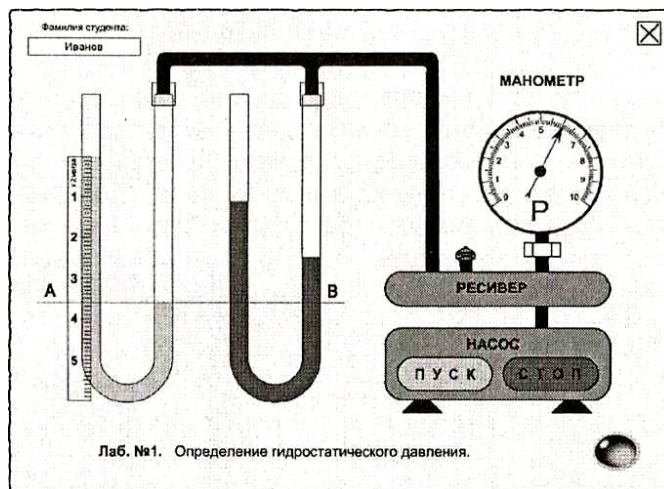


Рис. 7.2. Стан вимірювання дослідних даних

Зверніть увагу на розмірність шкали виміральної лінійки - x2 метри, це означає, що загальна довжина її становить  $6 \times 2 = 12$  метрів.

У процесі роботи, для підвищення точності відліку показів лінійки і стрілки манометра ви вільно можете збільшувати масштаб екрану і переміщати його вміст за допомогою лівої кнопки миші, для цього на

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
будь-якому місці екрану правою кнопкою миші викличте відповідне меню і виберіть пункт "Zoom in» - рис . 7.3.

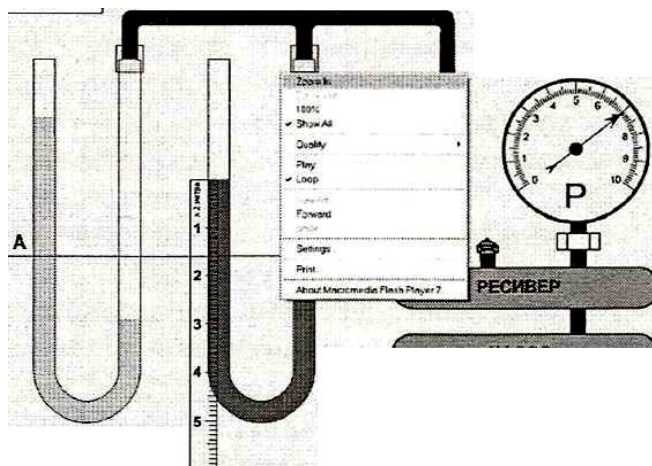


Рис. 7.3. Виклик меню за допомогою правої кнопки миші

Як тільки збільшення відбулося, покажчик миші перетворюється на зображення руки і стає можливим переміщати весь вміст екрану за допомогою натиснутої лівої кнопки миші.

Для того, щоб повернутися до звичайного режиму, потрібно знову викликати правою кнопкою таке ж меню і вибрати пункт «Show All» - рис. 7.4.

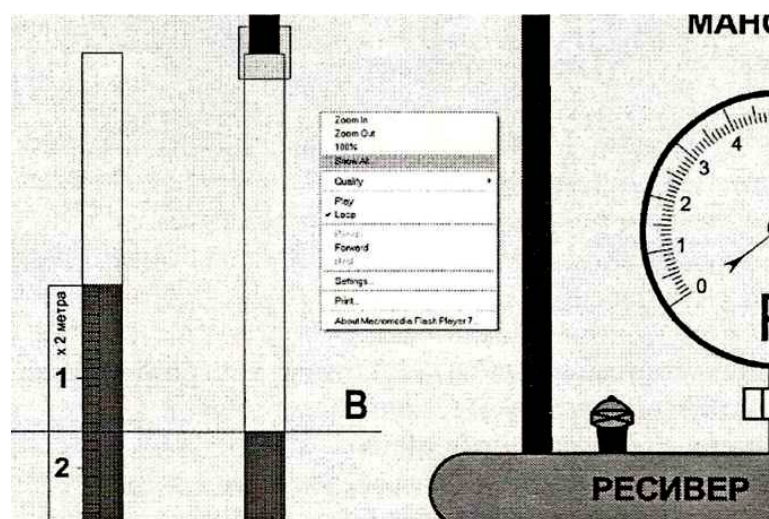


Рис. 7.4. Вид збільшеної ділянки виміру після включення команди «Zoom In» і повторний виклик контекстного меню.

**Питання для перевірки та самоконтролю**

1. Що собою представляє U-подібна трубка?
2. Яким чином можна перевести тиск з однієї розмірності в іншу?
3. Як визначити густину невідомої рідини?
4. Що вимірюється за допомогою п'єзометра?
5. Яку величину вимірюють манометром?
6. Що таке гідростатичний тиск?
7. Які сили відносяться до масових?
8. Які ви знаєте поверхневі сили?

**Лабораторна робота №8**

**СИЛА ТИСКУ РІДИНИ НА ПЛОСКУ ПОВЕРХНЮ**

**Мета роботи**

1. Визначення сили сумарного тиску води на плоску стінку.
2. Розрахунок розташування центру тиску.
3. Побудова епюри тиску і обчислення її об'єму.

**Основні теоретичні положення.**

Сила тиску на плоску поверхню є рівнодійною усіх одиничних сил на цю поверхню. Позначається через  $F$  і вимірюється в Ньютонах або інших одиницях сили. Сила тиску визначається добутком гідростатичного тиску в центрі тяжіння поверхні на її площу:

$$F = p_c S. \quad (8.1)$$

де  $S$  - площа поверхні;

$p_c$  - тиск в центрі тяжіння площі поверхні.

Для надлишкового тиску  $p_c = \rho g h_c$ .

Таким чином,  $F = \rho g h_c S$  (8.2)

де  $h_c$  - глибина занурення центру тяжіння площі, тобто вертикальна відстань від вільної поверхні рідини до центру тяжіння стінки, рис. 8.1.

Сила тиску на плоску поверхню не залежить від кута нахилу поверхні стінки до горизонту в умовах незмінної глибини занурення її центру тяжіння.

При визначенні сили тиску рідини на стінку посудини слід мати на увазі, що вона не залежить від кількості рідини в посудині.

Силу тиску можна визначити не лише за рівнянням (8.1), але й графічним шляхом. Виявляється, що сила тиску дорівнює об'єму епюри тиску. Тому для визначення сили тиску рідини на стінку можна побудувати епюру тиску і визначити її об'єм.

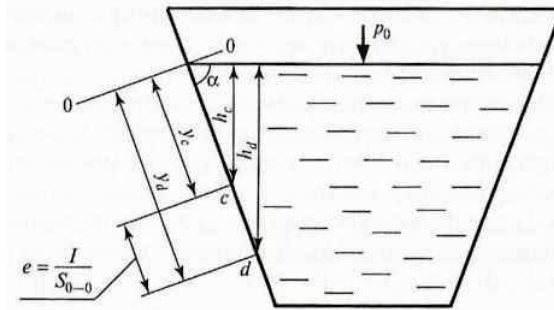


Рис. 8.1. Знаходження центру тиску рідини на стінку посудини

Точка прикладення сили тиску на плоску поверхню називається центром тиску.

Положення центру тиску для стінок, що володіють вертикальний віссю симетрії, при обліку тільки надмірного тиску знаходиться за допомогою теореми про рівність моменту рівнодійній сумі моментів складових. В цьому випадку центр тиску розташовується на осі симетрії, і положення його визначається координатою центру тиску вус, відлічуваної в площині стінки до лінії зрізу див. рис. 8.1:

$$y_d = y_c + \frac{I_c}{S_{0-0}}, \quad (8.3)$$

де  $y_c$  - координата центру тяжіння майданчика;

$I_c$  - момент інерції майданчика відносно осі, паралельної лінії зрізу  $0-0$  і стінки, що проходить через центр тяжіння;

$S_{0-0}$  - статичний момент майданчика відносно лінії зрізу.

Лінія зрізу - це лінія перетину площини кришки з площиною вільної поверхні рідини або продовження цих площин.

Величина  $e = \frac{I_c}{S_{0-0}} = \frac{I_c}{y_c S}$  називається ексцентриситетом гідростатичного тиску. Вона завжди більше нуля і дорівнює нулю тільки при горизонтальному положенні стінки. Отже, центр тиску завжди розташований нижче центру тяжіння майданчика і співпадає з центром тяжіння тільки при горизонтальному положенні стінки. Максимальному значенню ексцентриситету відповідає вертикальне розташування площі



Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
глибину  $H$  води в резервуарі у момент повного відкриття кришки і визначити масу вантажу  $G_{гр}$ .

### Обробка дослідних даних

Силу тиску води на кришку обчислюють, встановивши тиск в центрі тяжіння кришки, що визначається глибиною занурення його.

Глибину занурення центру тяжіння кришки у момент відкриття встановлюють двома методами:

1) безпосередньо вимірюванням:

$$h_c = H - \left( mn + \frac{\alpha}{2} \right) \quad (8.4)$$

2) з рівняння сил, що діють на кришку у момент відкриття. Рівняння моментів складають відносно осі, що проходить горизонтально через точку  $o$ . Нехтуючи силою тертя у блоках і в шарнірі кришки, отримаємо:

$$F \left( e + \frac{\alpha}{2 \sin \alpha} + \frac{od}{\sin \alpha} \right) = G_1^g \left( \frac{\alpha}{\sin \alpha} + \frac{od}{\sin \alpha} \right) \cos \alpha - G_{кр}^g \left( \frac{\alpha}{\sin \alpha} + \frac{od}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha ,$$

де  $e = \frac{I_c}{S_{0-0}}$  - ексцентриситет гідростатичного тиску, м;

$I_c = \frac{bh^3}{12} = \frac{a^4}{12 \sin^3 \alpha}$  - момент інерції кришки відносно осі, що проходить

через центр тяжіння її і паралельно лінії зрізу;

$S_{0-0} = \frac{h_c a^2}{\sin^2 \alpha}$  - статичний момент кришки відносно лінії зрізу.

Вирішуючи рівняння моментів відносно  $h_c$ , можна отримати:

$$h_c = \frac{G_1^g (a + od) \cos \alpha \sin \alpha - G_{кр}^g \left( \frac{a}{2} + od \right) \cos \alpha - \rho g \frac{a^4}{12}}{\rho g \left( \frac{a^3}{2} + a^2 od \right)} ,$$

(правильність цього рішення рекомендується перевірити самостійно).

Використовуючи отримане в досліді значення  $h_c$ , необхідно встановити помилку виміру у відсотках, прийнявши за істинне значення  $h_c$ , отримане з рівняння моментів.

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Силу тиску рідини на похилу поверхню (кришку затору) визначають за рівнянням:

$$F = \rho g h_c S = \rho g h_c \frac{a^2}{\sin \alpha} \quad (8.5)$$

Силу тиску необхідно розрахувати також графічним методом, побудувавши епюру гідростатичного тиску і визначивши її об'єм.

Для побудови епюри тиску знаходять гідростатичний тиск на верхній кромці кришки в точці  $b_1$  на нижній кромці в точці  $a$ , рис. 8.2:

$$p_1 = \rho g(H - mn - a);$$

$$p_2 = \rho g(H - mn).$$

У просторі епюри тиску буде призма, що має в основі трапецію. Об'єм її:

$$V = \frac{p_1 + p_2}{2} \frac{a}{\sin \alpha} a = \frac{p_1 + p_2}{2} \frac{a^2 \sin \alpha}{2} \quad (8.6)$$

Положення центру тиску встановлюють розрахунковим шляхом за рівнянням (8.3),

де:  $y_c = \frac{h_c}{\sin \alpha}$  - відстань в площині стінки від центру тяжіння до лінії зрізу, м;

$$\frac{I_c}{S_{0-0}} = \frac{a^2}{12 \sin \alpha h_c} \text{ - ексцентриситет гідростатичного тиску, м.}$$

Глибина занурення центру тиску:

$$h_d = h_c + \frac{a^2}{12h_c} \quad (8.7)$$

Схема експериментальної віртуальної установки для визначення сили тиску рідини на плоску поверхню зображена на рис. 8.3.

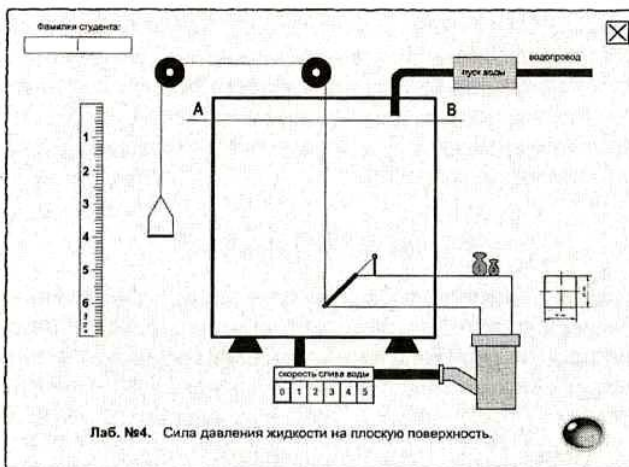


Рис. 8.3. Початковий стан віртуальної лабораторної установки

Початком роботи є пуск рідини з водопроводу, для чого досить помістити покажчик миші (курсор) в область кнопки «пуск води» і натиснути ліву кнопку миші, після чого великий прозорий бак поступово заповниться водою. Похила кришка своєю вагою, а потім і тиском води

над нею прикриває отвір, зрізаний під кутом  $45^\circ$  на торці квадратної 95x95 мм, також прозорої труби і не дає рідини можливості витекти через цю трубу. При заповненні бака на майданчик, що висить на тросі, перекинутому через блоки і сполученому з похилою кришкою, переносяться і встановлюються один або два вантажі за допомогою лівої кнопки миші. Потім вибором міри відкриття вентиля (0...5) задається потрібна швидкість зливу води. Такий стан лабораторної установки зображений на рис. 8.4.

Далі рідина з бака зливається і в деякий момент часу сила тиску на плоску стінку стає рівною вантажу на майданчику. У цей момент заслінка похилої кришки відкривається (рис. 8.5).

Задача студента зафіксувати рівень води, при якому відкривається заслінка, це можна зробити за допомогою переміщуваною лівою кнопкою



Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
овальну кнопку «Сброс», кожного разу починаючи роботу спочатку, тобто з заповнення великого прозорого баку водою.

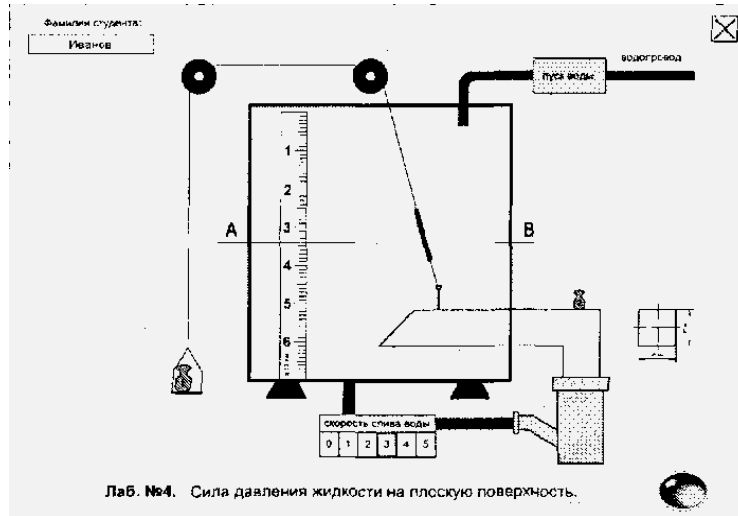


Рис. 8.6. Кінцевий стан лабораторної установки

### Питання для перевірки та самоконтролю

1. Як визначається силу тиску на плоску поверхню?
2. Що собою представляє графічний метод визначення сили тиску?
3. Що таке центр тиску?
4. Як визначити силу тиску рідини на похилу поверхню?
5. В яких одиницях вимірюється сила тиску?

**Лабораторна робота № 9**

**ПОБУДОВА НАПІРНОЇ І П'ЄЗОМЕТРИЧНОЇ ЛІНІЙ ДЛЯ  
ТРУБОПРОВОДУ ОПОРУ**

**Мета роботи**

1. Визначення дослідним шляхом витрати напору на подолання опору по довжині трубопроводу і на ділянках з місцевим опорами.
2. Розрахунок коефіцієнтів місцевих втрат і коефіцієнтів Дарсі.
3. Побудова напірної і п'єзометричної ліній.

**Основні теоретичні положення**

Повна питома енергія рідини в перерізі (напір) для сталого потоку визначається сумою питомих кінетичної і потенційної енергій:

$$H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}, \quad (9.1)$$

де  $z$  - питома енергія положення (може бути представлена відстанню від площини порівняння до осі потоку) (геометричний напір), м;

$p/(\rho g)$  - питома енергія тиску (висота підняття рідини в п'єзометрі (п'єзометричний напір), м;

$v^2/(2g)$  - питома кінетична енергія (швидкісний напір), м.

Відомо, що при русі в'язкої рідини її напір зменшується вниз за течією, так як частина потенційної енергії витрачається на подолання опорів. Якщо питома потенційна енергія, витрачена рідиною на подолання опорів між першим і другим перетинами, дорівнює  $h_{mp}$ , то рівняння Бернуллі, що зв'язує питомі повні енергії в цих двох перетинах, буде мати вигляд:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + a_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + a_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_{mp} \quad (9.2)$$

де 1 і 2 - індекси параметрів відповідно початку і кінця потоку;

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

$h_{mp}$  – напір, який витрачено на подолання місцевих опорів і опорів по довжині ( $h_{mp} = \sum h_M + \sum h_{dl}$ ).

Місцеві втрати енергії і втрати енергії по довжині залежать від величини кінетичної енергії. Так:

$$h_{dl} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (9.3)$$

$$h_M = \xi_M \frac{v^2}{2g}, \quad (9.4)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт опору тертя по довжині, або коефіцієнт Дарсі;

$l$  – довжина потоку, м;

$d$  – діаметр трубопроводу, м;

$\xi_M$  – коефіцієнт місцевих втрат.

Питома кінетична і потенційна енергії потоку пов'язані між собою. Зокрема, якщо кінетична енергія рідини зменшується, що проявляється у зменшенні швидкості руху, то потенційна енергія збільшується; це призводить до відповідного збільшення тиску.

Зміну питомої енергії рідини можна зобразити графічно, відкладаючи в масштабі для спостережуваних перетинів величини питомої енергії положення, енергії тиску і кінетичної енергії.

Лінія, що з'єднує точки, відповідні значенням суми всіх видів енергії, називається лінією повної питомої енергії, або напірною лінією. Лінія, що з'єднує точки, відповідні значенням потенційної енергії, називається лінією питомої потенційної енергії, або п'езометричною лінією.

Визначення п'езометричною висоти  $h = p/(pg)$  проводиться за допомогою п'езометра; вона дорівнює висоті підняття стовпа рідини в п'езометрі. Для трубопроводу, що розглядається, площина порівняння збігається з віссю горизонтальної частини трубопроводу, тому величина  $z$  у всіх перетинах дорівнює 0.

Визначення середньої швидкості рідини здійснюється за формулою:

$$v = \frac{Q}{S}. \quad (9.5)$$

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Витрата визначається за допомогою ротаметра.

Розглядаючи рис. 9.1, можна помітити, як змінюється повна питома енергія потоку, а також швидкість і тиск в залежності від зміни перерізу трубопроводу. Зокрема, при раптовому розширенні тиск в потоці збільшується, що пояснюється зменшенням швидкості руху.

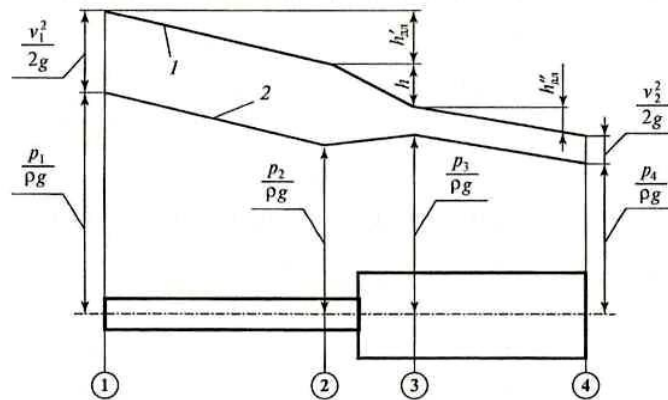


Рис. 9.1. Приклад побудови напірної (1) і п'єзометричної (2) ліній

Питома енергія, витрачена на подолання опору в будь-якому місцевому опорі, може бути визначена як різниця повної питомої енергії до і після опору:

$$h_M = \left( \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} \right) - \left( \frac{v_3^2}{2g} + \frac{p_3}{\rho g} \right). \quad (9.6)$$

Питома енергія, витрачена на подолання опору тертя по довжині, може бути визначена по різниці показань п'єзометра, так як кінетична енергія протягом трубопроводу вважається постійною.

Так, для перерізів 1 і 2:

$$h_{дл} = \left( \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left( \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} \right). \quad (9.7)$$

Таким чином, для визначення  $\lambda$  і  $\xi_M$  за рівняннями (9.3) і (9.4) необхідно знати величини  $h_{дл}$  і  $h_M$  для відповідних ділянок. Ці величини знаходимо з рівнянь (9.6) і (9.7), використовуючи результати вимірювань. Слід зазначити, що при визначенні  $h_M$  за рівнянням (9.4) кінетична енергія розраховується за швидкістю, якою має потік за місцевим

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
 опором, тобто при визначенні  $h_M$  на ділянці 2-3 у формулу (9.4)  
 підставляється швидкість на ділянці 3 - 4.

### Опис лабораторної роботи

Схематичне зображення трубопроводу опору показано на рис. 9.2.

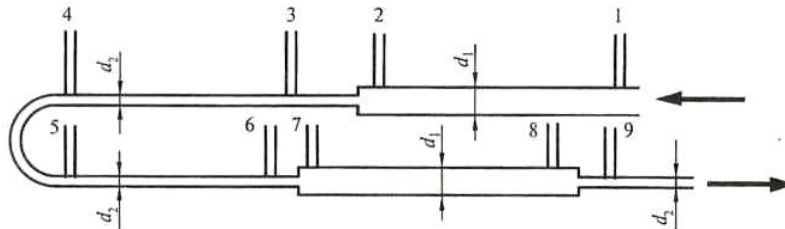


Рис. 9.2. Схема трубопроводу опору

Вода з напірного бака надходить у трубопровід опору, протікаючи  
 через який, зливається в каналізацію.

Трубопровід опору виконаний з труб діаметрами  $d_1 = 26 \cdot 10^{-3}$  м і  $d_2 = 16 \cdot 10^{-3}$  м і складається з декількох ділянок.

Вимірювання тисків проводиться п'єзометром у зазначених на схемі  
 позиціях. Витрату рідини через трубопровід вимірюють за допомогою  
 ротаметра і регулюють вентилем. Дослідні дані заносять в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Параметр	Номер п'єзометра								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$h = p / (\rho g), \text{ м}$									
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$									
$v, \text{ м/с}$									
$v^2 / (2g), \text{ м}$									

Результати розрахунків швидкостей, втрат всіх видів і  
 коефіцієнтів записуються в табл. 9.2.

Величина	Ділянка							
	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
$L, \text{ м}$	1,07	-	0,64	-	0,44	-	1,17	-
$d \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	26	26→16	16	16	16	16→26	26	26→16
$h_{\text{дл}}, \text{ м}$								
$h_{\text{м}}, \text{ м}$								
$\lambda$								
$\xi_{\text{м}}$								

Побудова напірної і п'єзометричної лінії проводиться на окремому аркуші паперу (обов'язково із застосуванням масштабу). По осі абсцис в масштабі зображується витягнута в одну лінію схема трубопроводу опору. На трубопроводі повинні бути показані місця, в яких визначається напір. Ці місця відповідають положенням п'єзометра на трубопроводі і позначаються прямими вертикальними штрихпунктирними лініями, проведеними від осі трубопроводу до п'єзометричної лінії.

По осі ординат, також у масштабі, відкладається значення повної питомої енергії (напору). Масштаб для п'єзометричної висоти і швидкісного напору повинен бути однаковим.

Побудова п'єзометричної лінії проводиться нанесенням на координатну площину точок, які відповідають питомій енергії тиску в розглянутих фрагментах трубопроводу, і з'єднанням сусідніх точок прямими лініями. Розташування точки визначається, з одного боку, фрагментом трубопроводу, для якого потрібно зобразити напірну лінію, з іншого боку - енергією тиску потоку. Якщо площина порівняння збігається з віссю трубопроводу, то для знаходження точки потрібно від осі трубопроводу відкласти вертикально вгору показання п'єзометра  $h = p/(\rho g)$ . Для побудови лінії питомої повної енергії (напірної лінії) необхідно відкласти вертикально вгору від п'єзометричної лінії в тому ж масштабі значення швидкісного напору, який відповідає даному фрагменту.

Отримані точки необхідно з'єднати прямими лініями.

### Правила і порядок виконання лабораторної роботи

Лабораторна установка для вимірювання параметрів і наступної побудови напірної і п'єзометричної ліній трубопроводу зображена на рис. 9.3.

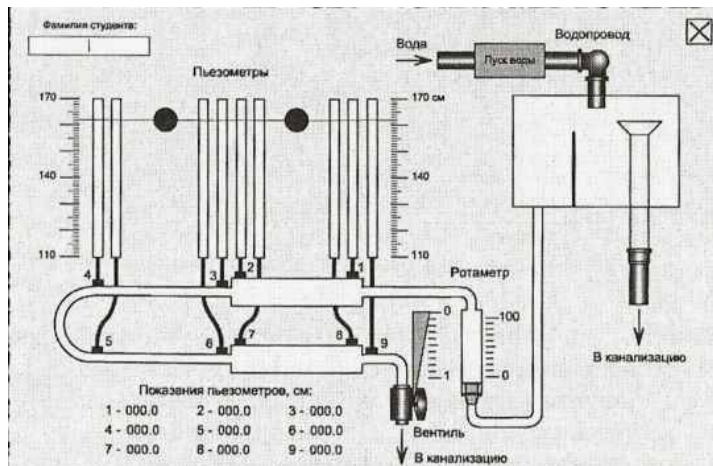


Рис. 9.3. Вихідний стан установки для проведення лабораторної роботи

Кнопкою «Пуск води» запустіть процес заповнення напірного бака і труб водою. Після наповнення бака до верхнього рівня переливної воронки, приступайте до відкривання вентиля. Управляти вентиля можна як безпосередньо лівою кнопкою миші, так і клавішами клавіатури зі стрілками "вгору" і "вниз". Керуючи вентилям, необхідно домогтися заданого викладачем показання ротаметра, відлік проводиться по верхній кромці його поплавка. Наведенням курсора на поплавок викличте тарувальний графік і визначте по ньому витрату води  $Q$ , див. рис. 9.4. На графіку по осі  $X$  відкладіть покази ротаметра, а по осі  $Y$  знайдіть відповідну витрату води  $Q$ .

Пересуваючи за допомогою миші вимірювальну горизонтальну лінію і поєднуючи її з верхньою кромкою рівня води в кожному п'єзометрі, визначте за відповідною шкалою показання всіх 9-ти п'єзометрів (рис.

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
9.5).

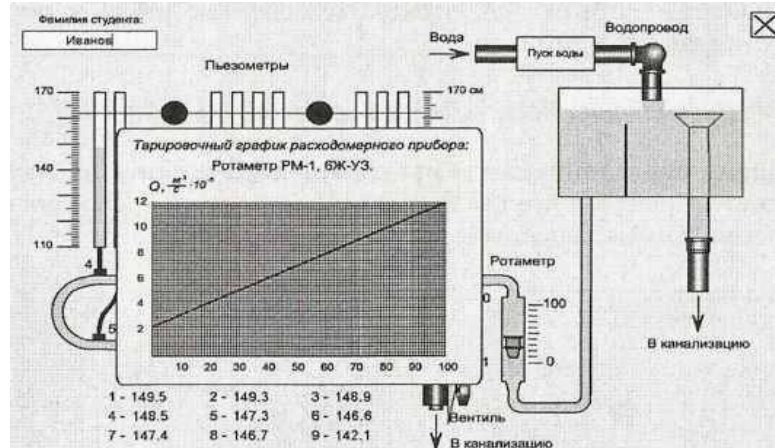


Рис. 9.4. Виклик тарувального графіка ротаметра

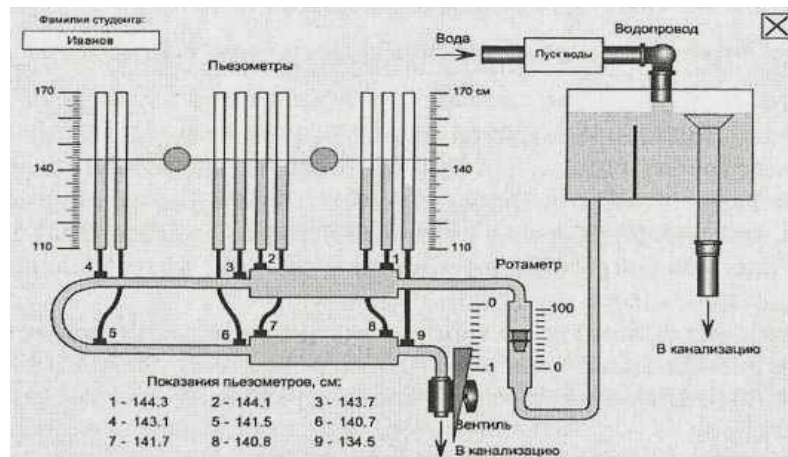


Рис. 9.5. Вимірювання рівнів п'езометрів

Для збільшення точності відліку правою кнопкою миші викличе меню, що випадає і збільшіть загальний масштаб «Zoom In». Домагаючись необхідної точності відліку, цю операцію можна повторити декілька разів, див. рис. 9.6. Повернутися до звичайного режиму можна буде через таке ж меню за командою «Show All».

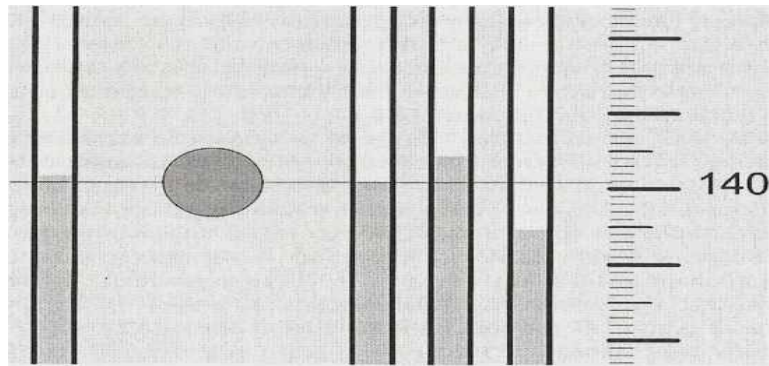


Рис. 9.6. Точне вимірювання рівня 8-го п'єзометра

Покази п'єзометрів відображаються також у цифровому вигляді. Порівняйте їх з отриманими вимірами. Зведіть дослідні дані в таблицю і приступайте до розрахунків.

#### **Питання для перевірки та самоконтролю**

1. Рівняння Бернуллі для ідеальної рідини.
2. Рівняння Бернуллі для реальної рідини.
3. Що собою представляють втрати рідини по довжині трубопроводу?
4. Що називається місцевими втратами рідини?
5. Що таке напірна лінія?
6. Що таке п'єзометрична лінія?
7. Який геометричний зміст п'єзометричного і швидкісного напорів?
8. Що таке геометричний напір?

**Лабораторна робота №10**

**ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМУ РУХУ РІДИНИ**

**Мета роботи**

1. Спостереження за різними режимами руху рідини в трубі.
2. Визначення числа Рейнольдса для різних режимів руху рідини.

**Основні теоретичні положення**

При течії рідини можливі два режими руху: ламінарний і турбулентний. Наявність того чи іншого режиму визначається співвідношенням сил, що діють в рухомій рідині, а саме, сил інерції і сил внутрішнього тертя (в'язкості). Якщо в потоці переважають сили внутрішнього тертя, то встановлюється ламінарний режим.

Відношення сил інерції до сил внутрішнього тертя характеризується так званим критерієм режиму руху (число Рейнольдса), який для напірного руху визначається співвідношенням:

$$Re = \frac{vd}{\nu}, \quad (10.1)$$

$d$  - внутрішній діаметр труби, м;

$v$  - середня швидкість руху рідини в потоці, м/с;

$\nu$  - кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини, м<sup>2</sup>/с.

Кожному режиму руху відповідає певна область значень числа Рейнольдса, яке не залежить від властивостей рідини.

Зміна режиму (перехід ламінарного режиму в турбулентний або, навпаки, турбулентного у ламінарний) пов'язана з критичною величиною цього числа, що позначається  $Re_{кр}$ .

Для напірного руху в трубах (в умовах так званої внутрішньої задачі) нижче критичного числа Рейнольдса, яке відповідає переходу турбулентного режиму в ламінарний, слід вважати

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

рівним 2000. Верхнє критичне число  $Re_{кр.в}$ , яке відповідає переходу ламінарного режиму в турбулентний, не є настільки визначеним, як нижнє  $Re_{кр.н}$ ; чисельне значення його можна прийняти приблизно рівним 13000...14000. Практично вважають, що для  $Re < Re_{кр.н}$  має місце ламінарний режим, а для  $Re < Re_{кр.в}$  – турбулентний режим. В інтервалі чисел Рейнольдса  $Re_{кр.н} < Re < Re_{кр.в}$  можливе існування того чи іншого режимів. Зокрема, якщо в потоці існував турбулентний режим, то він буде існувати до значення  $Re = Re_{кр.н}$ . Якщо ж існував ламінарний режим, то він буде мати місце до  $Re = Re_{кр.в}$ .

Частосереднє значення між  $Re_{кр.н}$  і  $Re_{кр.в}$  приймають за критичне число Рейнольдса  $Re$ ; за деякими дослідними даними  $Re_{кр.н}$  можна вважати рівним 2320, але при цьому потрібно завжди пам'ятати про існування області зміни режиму, характеристика якої недостатньо визначена.

Швидкість руху рідини, при якій відбувається зміна режимів, називається критичною швидкістю. На відміну від критичного значення числа Рейнольдса, однакового для потоку будь-якої рідини в трубопроводі будь-якого діаметру, критична швидкість для кожної рідини має своє певне значення, що залежить від діаметра трубопроводу і коефіцієнта в'язкості рідини:

$$v_{кр} = Re_{кр} \frac{v}{d} = 2320 \frac{v}{d}. \quad (10.2)$$

Характер руху частинок при ламінарному і турбулентному режимах різний. При ламінарному режимі частки переміщуються якби шарами по траєкторіях, паралельним між собою. При турбулентному режимі траєкторія руху частинок криволінійна і складна. Частки при русі стикаються між собою, і відбувається досить інтенсивний процес переміщення.

Рух частинок можна зробити видимим, підфарбувавши потік.

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Такимчином, встановитирежим рухуможна двомаметодами: визначеннямчислаРейнольдсаі візуальнимметодом, спостерігаючи за рухомчастинок впідфарбованомупотоці.

Якщо фарба, доданадо потоку, розташовуєтьсяв ньомуу вигляді прямогоструменю, чітковидноговесь час, цесвідчитьпро паралельнепереміщеннячастинокрідини тобтопро наявністьламінарногорежиму руху.Прицьому числоРейнольдсабуде меншимвід критичного значення, тобто менше2320.

Якщострумільфарбирозмиваєтьсяпотоком ірівномірнозабарвлюєйого, цесвідчитьпро рухчастинокпо складних траєкторіях, що призводитьдо перемішування, абопро наявністьтурбулентногорежиму.Прицьому числоРейнольдса – більшеза критичне,тобтобільше2320.

### Порядок проведенняроботи

Лабораторнаробота з визначеннярежиму рухувиконуєтьсяна установці, схематичнозображеноїна рис.10.1.

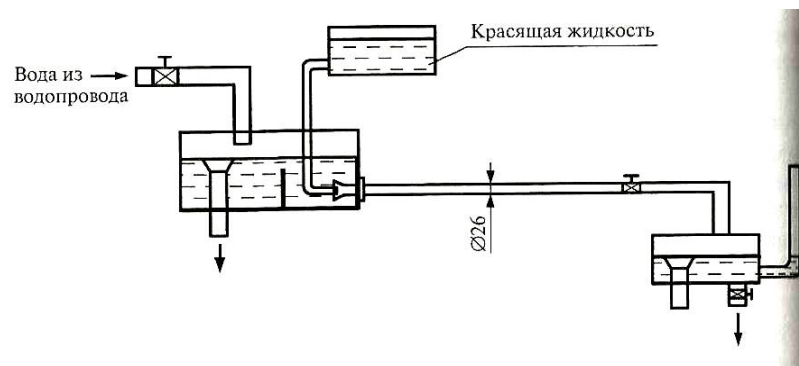


Рис. 10.1. Схема лабораторної установки

Водопровіднавода надходить унапірнийбак деякимнадлишкомі протікаєв склянутрубиз внутрішнімдіаметром 26мм, потімв приймальнийбак, звідкийде в каналізацію. Унапірномубакувстановленапереливнаворонкаі заспокійливаперегородка. Наднапірнимбакомрозташованапосудина, з

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

якої фарба по тонкій трубці надходить у скляну трубку.

Дослідження характеру руху проводиться при рівномірному русі. Як відомо, рівномірним рухом рідини називають ustalений рух в трубопроводі, по довжині якого середня швидкість руху залишається постійною.

Усталений рух рідини можливий в умовах постійного напорі незмінних гідравлічних опорів системи. У цьому випадку об'ємна витрата рідини залишається постійною часі. Сталість напорів у установці забезпечується незмінним положенням вільної поверхні в напірному баку, що збігається з верхньою кромкою переливної воронки. Напір в даному випадку визначається вертикальною відстанню від верхньої кромки переливної воронки до вихідного перетину трубопроводу. Сталість гідравлічного опору досягається незмінним ступенем відкриття під час дослідження вентиля на кінці трубопроводу.

При проведенні роботи необхідно, по можливості, виключити побічні явища, що викликають турбулізацію; так, заспокоїли ваперегорода призначена для локалізації збурень, що виникають у напірному баку при надходженні води.

Для початку роботи необхідно установку наповнити водою і створити рух рідини в трубопроводі, що здійснюється певним ступенем відкриття запірного крана.

Зміна швидкості руху вскляній трубці досягається різним ступенем відкриття вентиля.

Встановивши малу ступінь відкриття крана (при великому опорі), отримуємо малу швидкість руху. Одночасно з візуальним спостереженням за потоком визначається критерій режиму руху, або число Рейнольдса. Для визначення числа Рейнольдса необхідно виміряти внутрішній діаметр скляної трубки і обчислити середню швидкість потоку.

Середню швидкість рідини знаходять з рівняння нерозривності потоку.

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Для цього необхідно визначити витрату рідини, наприклад, об'ємним методом:

$$Q = \frac{V}{\tau}, \quad (10.3)$$

де  $V$  - об'єм, набраної вмірну посудину, рідини,  $\text{м}^3$ ;

$\tau$  - час, с.

Звідки:

$$v = \frac{Q}{S}, \quad (10.4)$$

де  $Q$  - об'ємна витрата, або обсяг рідини, що протікає через площу живого перетину в одиницю часу,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$S$  - живий перетин потоку, тобто перетин, розташований нормально до напрямку руху,  $\text{м}^2$ ;

$v$  - середня швидкість руху рідини,  $\text{м}/\text{с}$ .

Якщо на початку дослідів встановлений ламінарний режим, то подальші випробування проводять, збільшуючи швидкість руху (зменшуючи опір) до критичного значення і далі до надкритичного, при якому існує турбулентний режим руху.

Число Рейнольдса визначають за рівнянням (10.1).

Кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини визначають по табл. 10.1 залежно від температури рідини.

Таблиця 10.1

$t, \text{с}$	$\nu, \text{см}^2/\text{с}$	$t, \text{с}$	$\nu, \text{см}^2/\text{с}$
0	0,0178	20	0,0101
5	0,0152	30	0,0081
10	0,013,1	40	0,0066
15	0,0114	50	0,0055

Значення критичної швидкості знаходять за рівнянням (10.2).

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
Результативипробувань іостаточнірозрахункизводятьв табл.10.2.

Таблиця 10.2

№ досліду	Результати спостережень					Розрахункові величини						
	Режим	$d, м$	$V, м^3$	$t, с$	$t, ^\circ C$	$S, м^2$	$Q, м^3/с$	$v, м/с$	$\nu, м^2/с$	$Re$	$v_{кр}, м/с$	

### Правила і порядок виконання лабораторної роботи

Лабораторна установка для дослідження режиму руху рідини зображена на рис.10.2.

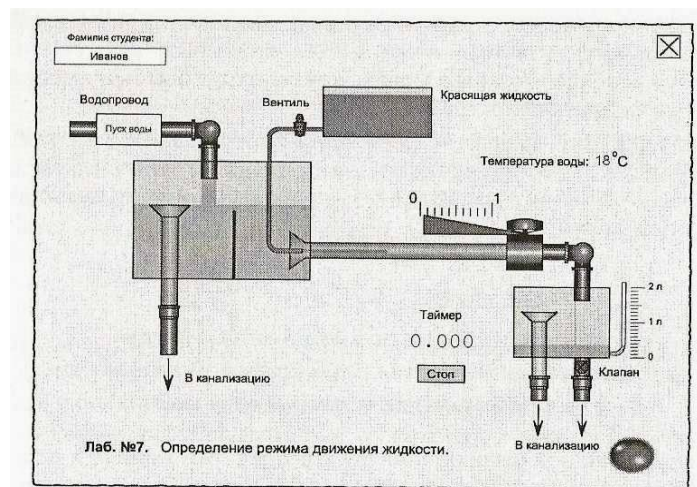


Рис. 10.2. Вихідний стан лабораторної установки

Кнопкою «Пуск води» запустіть процес заповнення пірного бака і прозорої горизонтальної труби водою. Після наповнення бака до верхнього рівня переливної воронки, приступайте до відкривання головного вентиля. Управляти вентилям можна як безпосередньо одним клацанням лівої кнопки миші, так і клавішею клавіатури і стрілкою «вправо». Керуючи ступенем відкриття вентиля, ви зможете тільки збільшувати швидкість протікання води з технічних

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
причиндемонстраційногороликазменшуватипотікв ційлабораторнійроботі не можна. Якщонеобхіднобуде повернутисядо меншоїшвидкостітечії води, доведеться скористатисякнопкою«Сброс», повторитипроцес наповненнябакаводою ізнову встановитипотрібнушвидкість.

Для візуалізаціїрежиму течіїв трубінеобхідно відкритивентиль, який перекриває фарбувальну рідину, для чогодостатньо кликнутипо ньому лівоюкнопкимиші.Цейвентильвідкриється тількив тому випадку, якщо головнийвентильбуде відкритий хочаб наодин поділ. Відкрившивентильфарбувальноїрідини, можна буде спостерігатирежим рухурідинив прозорійгоризонтальнійтрубі.Залежновід ступеня відкриття головноговентиляможна буде спостерігати спочаткуламінальнийпотік рідини, який поступовобудепереходити втурбулентний. При цьомуламінальнимрежимомпотрібноврахувати тільки той, при якому струміньфарбувальноїрідини взагальному потоціабсолютне спотворюється- рис. 10.3, атурбулентним- той, при якомуструміньфарби повністюрозбивається, без залишку(рис. 10.4).

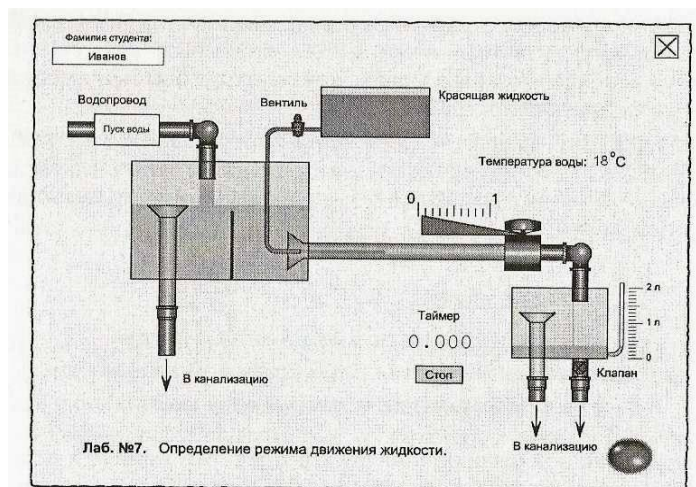


Рис. 10.3. Ламінарний режим руху рідини

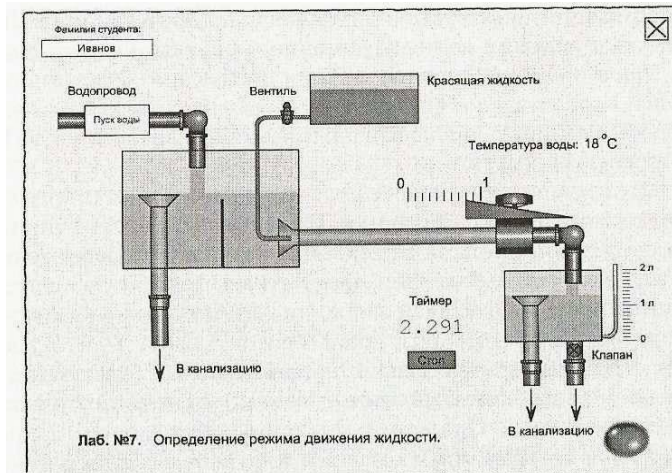


Рис. 10.4. Турбулентний режим руху рідини

Для вимірювання швидкості потоку достатньо клікнути лівою кнопкою миші по пусковому клапану, після чого в порожній мірній посудині автоматично запуститься віртуальний таймер. При цьому користуватися будь-яким іншим таймером забороняється, бо швидкість відтворення ролика безпосередньо залежить від швидкодії конкретного комп'ютера і може дуже відрізнитися від реальної. Як тільки в мірній посудині набереться достатня кількість води, зупиніть таймер і занесіть в табл. 2.7 виміряний об'єм води частини таймера. Крім того, в таблицю необхідно також внести температуру води і діаметр прозорої горизонтальної труби.

Вимірювання повторюють як мінімум для двох режимів – ламінарного і турбулентного.

Далі переходьте до обчислень і заповніть необхідні комірки зведеної таблиці.

### Питання для контролю та самоперевірки

1. Що таке рівномірний рух рідини?
2. Які вам відомі режими руху рідини?
3. Що таке перехідна зона?

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

4. Які значення критерія Рейнольдса відповідають певним режимам руху рідини?

5. За допомогою якого експеримента можна візуально спостерігати за різними режимами руху рідини?

6. Як визначити об'ємні витрати рідини?

7. Що таке критична швидкість?

8. Що характеризує критерій Рейнольдса?

9. Як визначається критерій Рейнольдса?

10. Яка розмірність критерія Рейнольдса?

**Лабораторна робота №11.**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИТІКАННЯ ЧЕРЕЗ МАЛИЙ КРУГЛИЙ ОТВІР І  
ЗОВНІШНЮ ЦИЛІНДРИЧНУ НАСАДКУ**

**Мета роботи**

1. Визначення коефіцієнта стискання, швидкості, витрати і опору при витіканні через отвір і насадку.
2. Розрахунок значення вакууму в зоні віджиму при витіканні через насадку.

**Основні теоретичні положення**

*Дослід 1. Витікання через отвір.*

Малим отвором називається отвір, розміри якого малі порівняно з напором, і можна нехтувати зміною швидкості по висоті отвору. Тоді швидкість по висоті отвору буде однаковою. Отвором тонкої стінці називають отвір з фаскою або загостреними кромками в стінці, товщина якої не впливає на умови витікання і форму струменя.

Струмінь рідини, що протікає через отвір у тонкій стінці, долає лише місцевий опір самого отвору. Витікання з отвору під постійним напором являється сталим рухом рідини. Рідина рухається до отвору з усіх боків по траєкторіях, що плавно змінюються. Крайні струмені надають витікаючому струменю конідальну форми, в результаті чого за отвором відбувається стискання струменя і його деформація під дією сил поверхневого натягу. Це явище називається інверсія струменя.

Встановлено, що найбільше стискання струменя, в районі якого потік підчиняється умовам плавної зміни, спостерігається на відстані половини діаметру отвору від площини отвору (рис. 11.1).

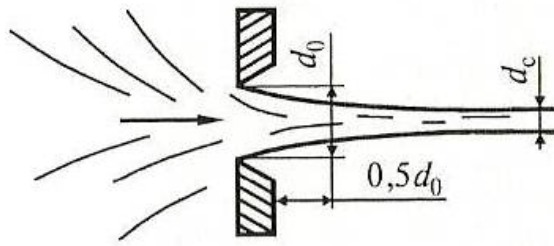


Рис. 11.1. Стиснення струменю

Відношення площі стиснутого перерізу струменя до площі перерізу отвору називають коефіцієнтом стискання і означають через  $\varepsilon$ .

Таким чином:

$$\varepsilon = \frac{S_c}{S_0},$$

а для круглого перерізу, де  $S = \pi d^2/4$ ,

$$\varepsilon = \left(\frac{d_c}{d_0}\right)^2$$

де  $d_c$  - діаметр стисненого струменя, м.

$d_0$  - діаметр отвору, м.

Швидкість витікання в'язкої рідини і її витрата залежать від напору і опору отвору. Вони характеризуються: коефіцієнтом швидкості  $\varphi$ , коефіцієнтом витрати  $\mu$  і коефіцієнтом опору отвору  $\xi$ .

Коефіцієнт швидкості показує в скільки разів дійсна швидкість витікання менша від теоретичної швидкості.

Коефіцієнт витрати показує в скільки разів дійсна витрата менша від теоретичної витрати.

Коефіцієнт опору отвору характеризується відношенням напору, витраченого на подолання опору витіканню, до швидкісного напору витікаючого струменя.

Чисельні значення цих коефіцієнтів встановлюють дослідним шляхом з використанням залежностей, що визначають кількісну сторону процесу витікання.

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Швидкість витікання в'язкої рідини через отвір можна визначити, застосовуючи рівняння Бернуллі відносно перерізів I – I та II – II (рис. 11.2).

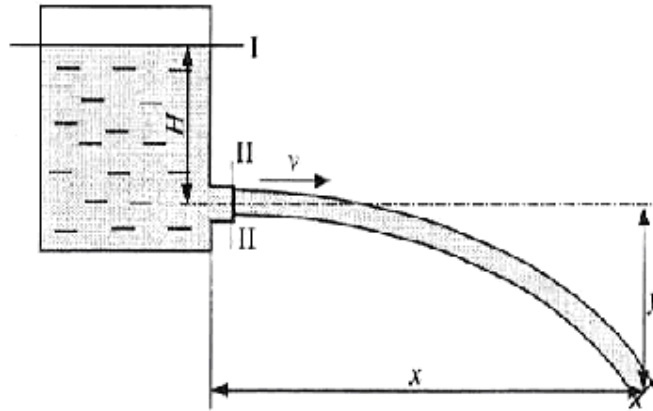


Рис. 11.2. Витікання рідини через отвір

Рівняння Бернуллі для перерізів 1-1 і II - II має вигляд:

$$H + \frac{p_0}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = \frac{p_0}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_0,$$

де  $H$  - геометричний напір, м.

$V_1, V_2$  - середні швидкості у відповідних перерізах, м/с.

$\alpha_1$  і  $\alpha_2$  - коефіцієнти нерівномірного розподілу швидкостей у відповідних перерізах.

$h_0$  - втрати напору, витраченого на подолання місцевого опору (отвори), м.

Якщо напір визначається величиною  $H$ , то рівняння Бернуллі для перерізу II - II матиме вигляд:

$$H = \frac{v_2^2}{2g} + h_0. \quad (11.1)$$

Вирішуючи рівняння (2.50) відносно швидкості отримаємо:

$$v = \frac{1}{\sqrt{1+\xi}} \sqrt{2gH}. \quad (11.2)$$

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

У випадку ідеальної рідини, за відсутності втрат на тертя, теоретичну швидкість розраховують по формулі Торрічеллі.

$$v_T = \sqrt{2gH}.$$

З урахуванням рівняння (11.2) отримуємо коефіцієнт швидкості:

$$\varphi = \frac{v}{v_T} = \frac{1}{\sqrt{1+\xi}}, \quad (11.3)$$

звідки:

$$\xi = \frac{1}{\varphi^2} - 1. \quad (11.4)$$

Кількість витікаючої через отвір рідини  $Q_g$  можна визначити за співвідношенням:

$$Q_g = vS_c. \quad (11.5)$$

Знаючи, що теоретична витрата визначається як  $Q_T = v_T \cdot S_0$ , можна отримати формулу для визначення коефіцієнта витрати :

$$\mu = \frac{Q_g}{Q_T} = \frac{vS_c}{v_T S_0} = \varphi \varepsilon. \quad (11.6)$$

З формули (11.5), замінивши площу перерізу струменя площею перерізу отвору, отримуємо:

$$Q_g = S_0 \mu \sqrt{2gH}. \quad (11.7)$$

Таким чином, визначення коефіцієнта витрати можна провести розрахунковим шляхом за співвідношенням:

$$\mu = \frac{Q_g}{S_0 \sqrt{2gH}}. \quad (11.8)$$

Коефіцієнти стискання, швидкості і витрати при витіканні через отвір залежать від числа Рейнольдса :

$$Re = \frac{\sqrt{2gH} \cdot d_{\text{ЭКВ}}}{\nu}, \quad (11.9)$$

де  $\nu$  - коефіцієнт кінематичної в'язкості,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Коефіцієнт опору зменшується від  $\xi = 1,0$  при  $Re = 100$  до  $\xi = 0,06$  при  $Re > 100000$ . При  $Re > 100000$  коефіцієнти  $\varepsilon$ ,  $\varphi$  і  $\mu$  практично не змінюються і рівні:

$$\varepsilon = 0,62 \dots 0,64; \varphi = 0,97; \mu = 0,60 \dots 0,62.$$

У практичних випадках при витіканні через отвори числа Рейнольдса мають великі значення.

Визначення коефіцієнтів втрат і швидкості показує, що опір отвору витіканню дуже невеликий, внаслідок чого коефіцієнт швидкості близький до одиниці. Між тим, значення коефіцієнта витрати отвору порівняно мале і має порядок 0,6. Причина малого значення коефіцієнта витрати пояснюється процесом стискання витікаючого струменя. Якби стискання струменя було відсутнє, те значення коефіцієнта витрати було б значно більше.

### *Дослід 2. Витікання з насадки*

Насадкою називають щільно приєднаний до отвору в тонкій стінці патрубок або коротку трубку завдовжки 3...4 її діаметра.

Насадки поділяють за способом кріплення і конфігурації. За способом кріплення розрізняють внутрішні і зовнішні насадки. По конфігурації вони бувають циліндричні, конічні, що сходяться і розходяться, а також коноїдальні.

Витікання через насадку значно відрізняється від витікання через отвір.

При поступленні рідини в насадку відбувається стиснення струменя так само, як це спостерігається при витіканні через отвір. Далі струмінь змочує стінки насадки в результаті розширення, і рідина з насадки витікає повним перерізом. Стиснення струменя і потім раптове

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
розширення його створюють в насадці зону віджиму, в межах якої рідина не бере участь в загальному поступальному русі (рис. 11.3).

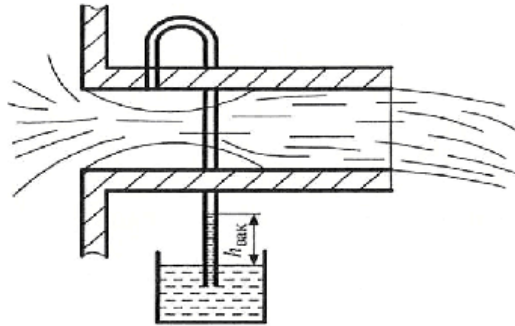


Рис. 11.3. Витікання рідини з насадки

Стиснення перерізу струменя в насадці викликає збільшення швидкості в цьому перерізі і відповідно пониження тиску до утворення розрідження. Зниження тиску викликає кавітаційні тиски, внаслідок чого струмінь, що витікає з насадки, містить у своєму складі бульбашки повітря.

Кількість рідини, витікаючої через насадку в одиницю часу, можна визначити розрахунковим шляхом за рівнянням:

$$Q_g = S_H \mu \sqrt{2gH} , \quad (11.10)$$

де  $Q_g$ - витрата, м<sup>3</sup>/с.

$\mu$  - коефіцієнт витрати;

$S_H$  - площа перерізу насадки, м<sup>2</sup>;

$g$  - прискорення сили тяжіння, 9,81 м/с<sup>2</sup>;

$H$  - напір, м.

Струмінь, витікаючий з насадки, немає стиснення, оскільки швидкість руху часток рідини не змінюється ні за значенням, ні за напрямом, в результаті коефіцієнт стискання відносно вихідного перерізу насадки дорівнює одиниці, а коефіцієнт швидкості дорівнює коефіцієнту витрати, тобто  $\varphi = \mu$ .

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Визначення коефіцієнта витрати проводиться так само, як у разі витікання через отвір:

$$\mu = \frac{Q_g}{S_H \sqrt{2gH}}. \quad (11.11)$$

Використовуючи значення коефіцієнта витрати, можна визначити коефіцієнт втрат насадки.

Оскільки

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1+\xi}},$$

то

$$\xi = \frac{1}{\mu^2} - 1. \quad (11.12)$$

Отримані чисельні значення коефіцієнта витрати насадки приблизно на 32% більші від коефіцієнта витрати отвору. Збільшення його пояснюється відсутністю стискання струменя на виході з насадки.

Чисельне значення коефіцієнта опору насадки виходить значно більшим від коефіцієнта опору отвору.

Збільшення цього коефіцієнта пояснюється наявністю в насадці, окрім опору отвору, ще опору при раптовому розширенні.

Значення вакууму в зоні стискання струменя визначається швидкістю руху, яка, в свою чергу, залежить від стискання струменя при вході насадку і від напору. Можна довести, застосувавши рівняння Бернуллі до потоку в насадці, що:

$$h_{\text{вак}} = \frac{p_{\text{вак}}}{\rho g} = 0,75 \text{ Н}. \quad (11.13)$$

Вимірювання розрідження вакуумметром показує задовільний стан цьому співвідношенню.

### **Опис лабораторної роботи**

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Робота проводиться на установці, схематично показаній на рис. 11.4. Рідина зі збірного бака 1 подається насосом 2 в напірний бак 3, обладнаний заспокійливою перегородкою 4, яка локалізує обурення, що виникають в рідині від дії струменя, що поступає. Переливна воронка 5 забезпечує підтримку постійного напору  $H$ , який визначають по водомірно-

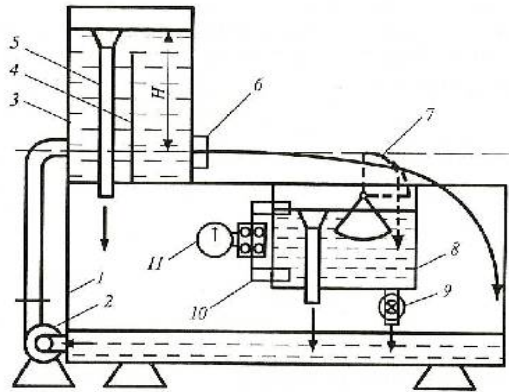


Рис. 11.4. Схематичне зображення установки

му склу. На передній стінці напірного бака розташовано гніздо 6 із запірним пристроєм для установки в нім дисків з досліджуваними отворами і насадок. При витіканні струмінь рідини потрапляє у збірний бак 1; при цьому проводять вимір координат  $x$  і  $y$  падіння струменя. Для визначення витрати встановлюють обмежувач 7, і витікаючий струмінь поступає в мірний бак 8 об'ємом  $V = 50 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ , звідки через запірний вентиль 9 рідину зливають у збірний бак. В стінку мірного бака вбудовані два контактні датчики 10, які електрично з'єднанні з електросекундоміром 11, який фіксує час заповнення мірного бака.

### **Порядок виконання роботи**

Витрату визначають об'ємним методом:

$$Q_g = \frac{V}{t}.$$

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Коефіцієнт швидкості при витіканні через отвір визначають, використовуючи рівняння руху частки рідини в струмені, допускаючи, що кожна частка рухається як матеріальна точка, на яку діє тільки сила тяжіння. В цьому випадку координати будь - якого перерізу струменя будуть:

$$x = vt; \quad y = \frac{gt^2}{2},$$

а рівняння траєкторії:

$$y = \frac{gx^2}{2v^2},$$

де  $v = \varphi\sqrt{2gH}$  - швидкість в стисненім перетині струменя.

Замінюючи увідповідним значенням, отримаємо співвідношення для визначення коефіцієнта швидкості :

$$\varphi = \frac{x}{2\sqrt{yH}},$$

де  $x$  і  $y$ - координати перерізу струменя (рис. 11.2);

$H$  - напір, м.

Визначення коефіцієнта швидкості, відповідно, зводиться до визначення координат струменя  $x$  і  $y$ , а також напору  $H$ .

Потім розраховують коефіцієнти витрати отвору і насадки за рівняннями (11.8) і (11.11), а також коефіцієнти опору за рівняннями (11.4) і (11.12). Коефіцієнт стискання для отвору визначають із співвідношення (11.6). Глибину вакууму в зоні віджимання при витіканні через насадок знаходять за рівнянням (11.13).

Результати дослідів і розрахунків заносять в таблиці. 11.1.

Таблиця 11.1

Об'єкт випробувань	Виміряні величини						Розрахункові величини						
	$H, м$	$V, м^3$	$t, с$	$d, м$	$x, м$	$y, м$	$Q_g, м^3/с$	$S, м^2$	$\epsilon$	$\varphi$	$\mu$	$\xi$	$h_{век}, м$

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Отвір																				
Насадка																				

### Правила і порядок виконання лабораторної роботи

Загальний вигляд обладнання для проведення лабораторної роботи при дослідженні процесу витікання рідини через малий круглий отвір і циліндричну насадку зображений на рис 11.5.

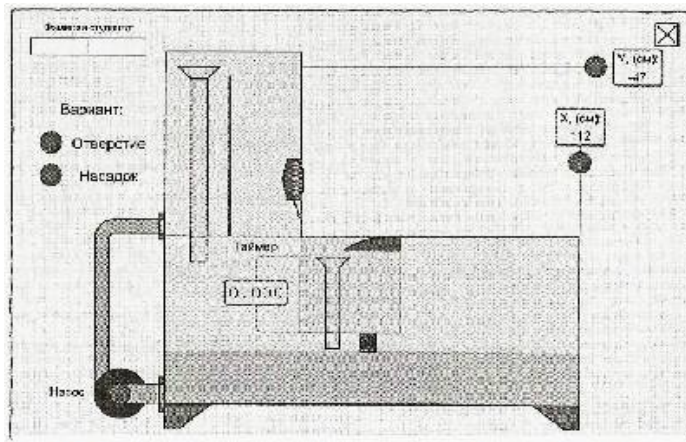


Рис. 11.5. Початковий стан лабораторної установки

Червоними кругами і секторами відмічені кнопки для управління процесами, що відбуваються в цій роботі. При наведенні курсора на будь-який червоний круг або сектор з'являється пояснюючий напис про те, для чого призначена ця кнопка.

Спочатку необхідно вибрати варіант досліду : перший - з витіканням води через отвір або другий - через насадку, для цього досить клікнути по відповідній кнопці. Потім ви зможете включити насос для підйому води в напірний бак. Далі можна буде відкрити клапан, що закриває отвір або насадку, і спостерігати витікання струменя. У першому варіанті при витіканні через отвір, необхідно довільно вибрати точку на траєкторії струменя і виміряти її координати відносно початку струменя за допомогою відповідних вимірювальних лінійок X та Y, див. рис. 11.6.

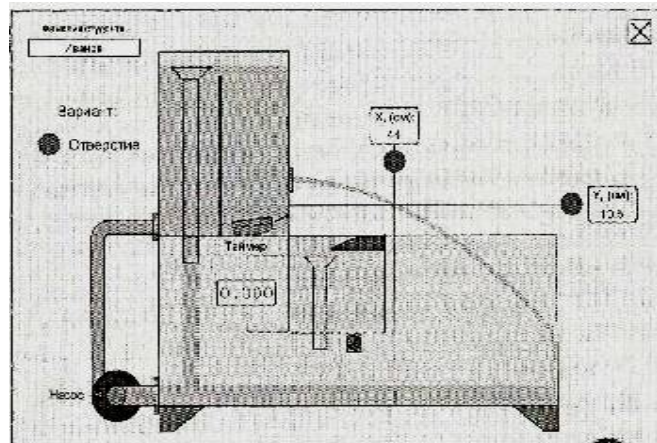


Рис. 11.6. Вимірювання координат X і Y довільної точки в досліді з отвором

Рівень напору також визначається по координаті Y за допомогою вимірювальної лінійки. При цьому приймається її абсолютне значення - знак мінус відкидається.

Завершивши дії з лінійками X і Y, можна включити поворот обмежувача струменя вгору і далі, включивши зливний клапан, дочекатися повного заповнення мірного бака і записати відповідний показ віртуального таймера, див. рис. 11.7.

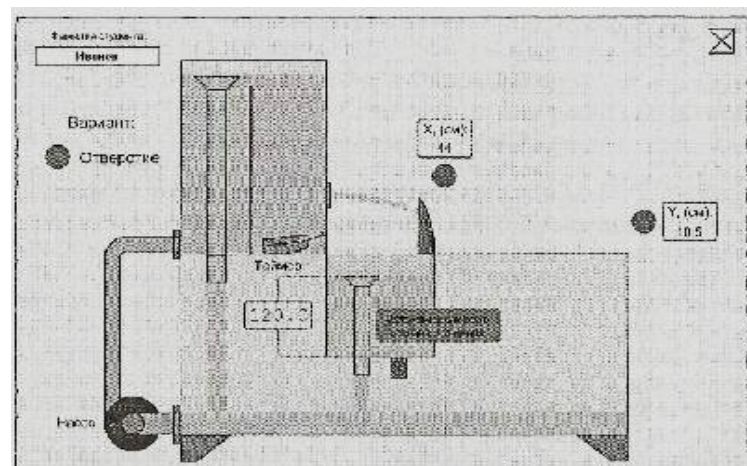


Рис. 11.7. Вимірювання часу заповнення мірного бака на 50 літрів за допомогою віртуального таймера в досліді з отвором

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Користуватися іншими способами виміру часу в даному випадку не можна, оскільки швидкість відтворення SWF-ролика залежить від швидкості конкретного комп'ютера. Швидкість може істотно змінюватися навіть при зміні масштабу екрану, який також впливає на роботу таймера, ось чому його покази можуть дуже відрізнятися від реальних. Проте таймер працює абсолютно синхронно з процесом наповнення мірного бака, і тому його покази є в даному випадку цілком достовірними. Як тільки бак наповниться, вода досягне верхнього електричного контакту і зупинить таймер. Саме ці покази таймера треба внести в клітинку  $t$  табл. 11.1.

Об'єм мірного бака дорівнює 50 літрам, електричні контакти таймера налаштовані саме на такий об'єм. Діаметр отвору не вимірюється, його значення приймається рівним 16 мм.

Для переходу до другого варіанту досліду з насадкою необхідно привести лабораторну роботу в початковий стан. Для цього слід натиснути овальну кнопку "Сброс". Далі вибирається другий варіант досліду з витіканням через насадку (рис. 11.8).

Робота повторюється в такій же послідовності. При цьому внутрішній діаметр насадки дорівнює 14 мм.

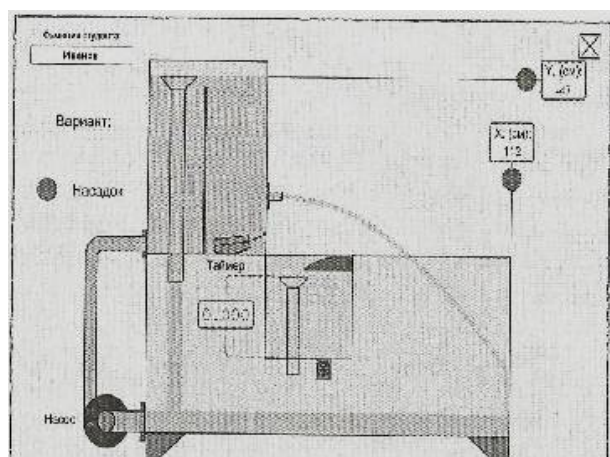


Рис. 11.8. Варіант досліду з насадкою

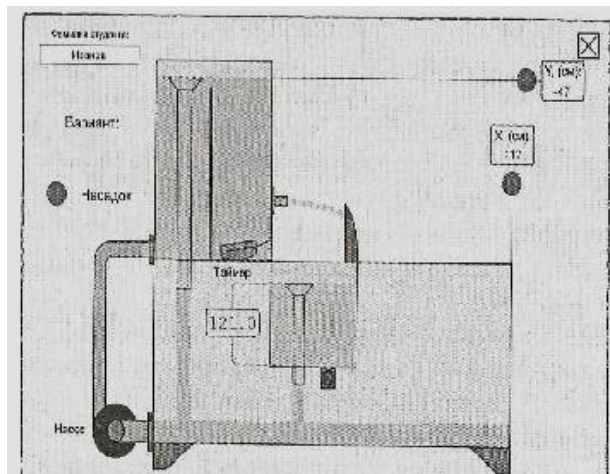


Рис. 11.9. Вимірювання часу заповнення мірного бака на 50 літрів з допомогою віртуального таймера в досліді з насадкою

Включивши зливний клапан, необхідно дочекатися заповнення мірного бака і записати відповідні покази віртуального таймера (рис. 11.9).

Усі задані і виміряні величини внесіть в клітинки табл. 11.1 і приступайте до розрахунків.

### **Питання для контролю і самоперевірки**

1. Що називають малим отвором?
2. Що показують коефіцієнт швидкості та коефіцієнт витрати?
3. Від чого залежать коефіцієнти стискання, швидкості і витрати при витіканні через отвір?
4. Що таке насадка?
5. Які насадки вам відомі?
6. Як визначаються коефіцієнт витрати та коефіцієнт втрат насадки?
7. Чому чисельні значення коефіцієнта витрати насадки більші від коефіцієнта витрати отвору?
8. Що вимірюється за допомогою вакуумметра?

**Лабораторна робота №12.**

**ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ВИТРАТИ ДРОСЕЛЬНОГО  
ПРИЛАДУ(ДІАФРАГМИ) І ВОДОМІРА ВЕНТУРІ**

**Мета роботи**

1. Визначити коефіцієнт дросельного приладу діафрагми і коефіцієнт витрати водоміра Вентурі.

2. Побудувати тарувальні графіки обох приладів, тобто залежності  $Q_D=f(\Delta H_D)$  і  $Q_V=f(\Delta H_V)$ .

**Основні теоретичні положення**

*Дослід 1. Діафрагма*

Визначення витрати роблять не лише об'ємним методом, який у виробничих умовах практично не застосовують, але і за допомогою різних витратомірних приладів. Найбільш поширеними з них в промисловості є мірна шайба або діафрагма і водомір Вентурі.

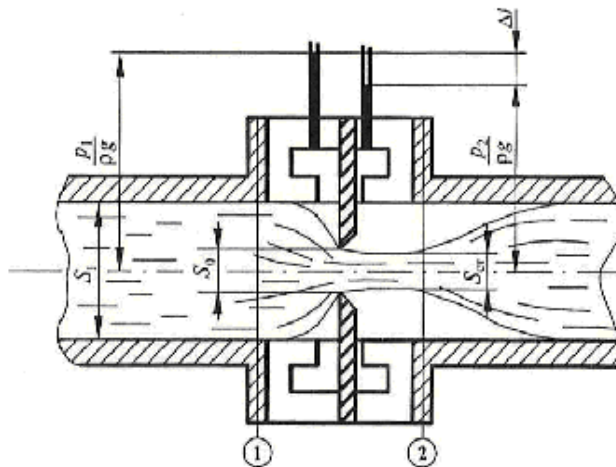


Рис. 12.1. Схема роботи діафрагми

Діафрагма (рис. 12.1) є пластинкою, що має великий центральний отвір. Ця пластинка ставиться в трубопровід перпендикулярно до напрямку руху води і закріплюється за допомогою фланців. Рідина, протікаючи через отвір діафрагми, набуває швидкість руху більшу, ніж до

### Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

цього отвору. Наслідком зміни швидкості руху є падіння тиску, що строго відповідає зміні швидкості. Таким чином, вимірюючи за допомогою рідинного диференціального манометра зміни тиску в рідині і знаючи діаметри отвору діафрагми і трубопроводу, можна визначити витрату.

Потік рідини, проходячи через переріз діафрагми, стискається так, що площа перерізу струменя стає менше площі отвору діафрагми. Надалі потік займає увесь переріз трубопроводу.

Застосовуючи рівняння Бернуллі до перерізів 1 і 2, отримаємо:

$$\Delta H = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} = \frac{v_2^2}{2g} (\alpha_2 + \xi_d) - \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g}, \quad (12.1)$$

де  $p_1$  і  $p_2$  - тиск відповідно в перерізах 1 і 2;

$v_1$  і  $v_2$  - середня швидкість руху в перерізах 1 і 2;

$\xi_d$  - коефіцієнт втрат діафрагми;

$\alpha_1$  і  $\alpha_2$  - коефіцієнт кінетичної енергії в перерізах 1 і 2.

Коефіцієнт кінетичної енергії враховує нерівномірність розподілу істинних швидкостей в цих перерізах і є відношенням дійсної кінетичної енергії потоку до кінетичної енергії, обчисленої за середньою швидкістю.

Вважаючи, що:  $Q = v_1 S_1 = v_2 S_2$  і  $v_1 = \frac{Q}{S_1}$  та замінюючи швидкості:  $v_2 = \frac{Q}{S_0 \varepsilon}$

$$\text{і } v_1 = \frac{Q}{S_1}, \text{ отримаємо: } Q = \frac{S_1 \sqrt{2g\Delta H}}{\sqrt{\frac{\alpha_2 + \xi_d}{\varepsilon^2} - \alpha_1 \left(\frac{S_0}{S_1}\right)^2}},$$

де  $S_1$  і  $S_2$  - відповідно площі живих перерізів 1 і 2, м<sup>2</sup>;

$S_0$  - площа отвору діафрагми, м<sup>2</sup>;

$\varepsilon = \frac{S}{S_0}$  - коефіцієнт стискування.

$$\text{Позначаючи: } \frac{S_1}{\sqrt{\frac{\alpha_2 + \xi_d}{\varepsilon^2} - \alpha_1 \left(\frac{S_0}{S_1}\right)^2}} \sqrt{2g} = c,$$

(де  $c$  - коефіцієнт дросельного приладу), отримаємо:

$$Q = c\sqrt{\Delta H} , \quad (12.2)$$

Таким чином, для визначення витрати в промислових умовах за допомогою діафрагми треба знати значення коефіцієнта дросельного приладу і покази рідинного диференціального манометра, виражене в метрах водяного стовпа.

### Дослід 2. Водомір Вентурі

Водомір Вентурі (рис. 12.2) або, як його ще називають, двохконусний водомір, є прилад, що звужується, але звуження потоку в ньому здійснюється плавно, без створення застійних вихрових зон, як це відбувається в діаграмі.

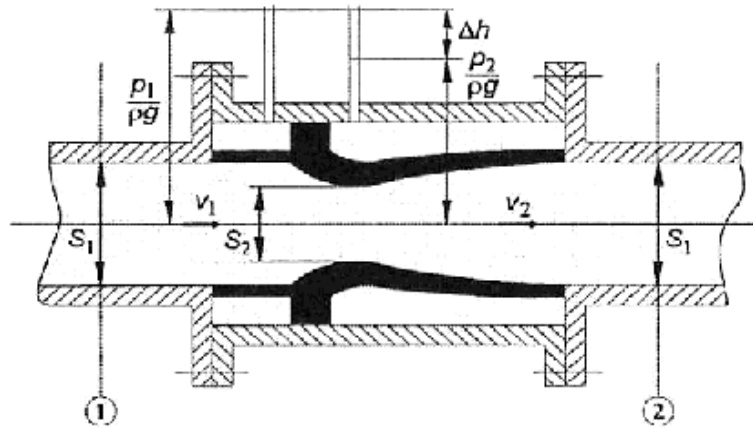


Рис. 12.2. Схема будови водоміра Вентурі.

Відсутність застійних зон дозволяє різко понизити гідравлічні опори при проходженні рідини через цей прилад, що дає можливість використати водомір для виміру дуже великих витрат рідини.

Застосовуючи рівняння Бернуллі для ідеальної рідини відносно перерізів 1 і 2, отримаємо:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}$$

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Різниця тисків, що фіксується диференціальним манометром, є різницею кінетичних енергій в цих перерізах:

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho g} = \Delta H = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}.$$

Виражаючи швидкість  $v_1$  за рівнянням нерозривності через  $v_2$  отримаємо:

$$v_2 = v_1 \frac{S_1}{S_2} = v_1 a,$$

де  $a = S_1 / S_2$ .

Визначимо швидкість в перерізі 1:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2g\Delta H}{a^2 - 1}}$$

За швидкістю  $v_1$  знаходимо теоретичну витрату потоку :

$$Q_t = v_1 S_1, \quad (12.3)$$

При русі в'язкої рідини витрата буде меншою і може бути визначена за формулою дійсної витрати :

$$Q_d = \mu S_1 \sqrt{\frac{2g\Delta H}{a^2 - 1}}, \quad (12.4)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт витрати водоміра - величина, що показує в скільки разів дійсна витрата менша за теоретичну.

У цій роботі необхідно визначити значення коефіцієнта витрати :

$$\mu = \frac{Q_d}{Q_t}, \quad (12.5)$$

Для цього необхідно визначити за допомогою об'ємного лічильника витрати дійсну витрату:

$$Q_d = \frac{V}{t}$$

і теоретичну витрату за рівнянням (2.65).

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Відношення площ :

$$a = \frac{S_1}{S_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2} = \left( \frac{33,6}{20} \right)^2$$

### Проведення лабораторної роботи

Регулюючим вентилем встановлюють витрату рідини через прилади. Записують покази відповідних даному приладу п'єзометрів і визначають витрату рідини. Дані заносять в табл. 12.1.

Таблиця 12.1

№ досліджу	V, м <sup>3</sup>	t, с	Діафрагма		Водомір Вентурі	
			$p_1/\rho g, м$	$p_2/\rho g, м$	$p_1/\rho g, м$	$p_2/\rho g, м$

Далі змінюють витрату рідини за допомогою того ж вентиля і повторюють усі виміри. Кількість дослідів має бути не менше 8... 10. Усі розрахункові дані заносять в табл. 12.2.

Таблиця 12.2

№ досліджу	Діафрагма			Водомір Вентурі			
	$\Delta H_d, м$	$Q_d, м^3/с$	$c, м^{2,5}/с^2$	$\Delta H_B, м$	$Q_d, м^3/с$	$Q_t, м^3/с$	$\mu$

Тарувальні графіки будують в масштабі на міліметровці. Тарувальні графіки значно спрощують контроль за витратою рідини при використанні діафрагми і водоміра в технологічному процесі, оскільки виключають необхідність проведення розрахунків.

### Правила і порядок виконання роботи

Для ознайомлення з будовою діафрагми і водоміра можна візуалізувати їх внутрішню частину, для чого досить навести курсор на корпус відповідного приладу.

Щоб почати виконувати роботу, кнопкою "Пуск води" (рис. 12.3) включіть процес заповнення напірного бака, горизонтальної труби, діафрагми, водоміра Вентурі, диференціальних манометрів і лічильника води. Тільки після наповнення бака до верхнього рівня воронки переливання слід приступати до відкривання головного вентиля.

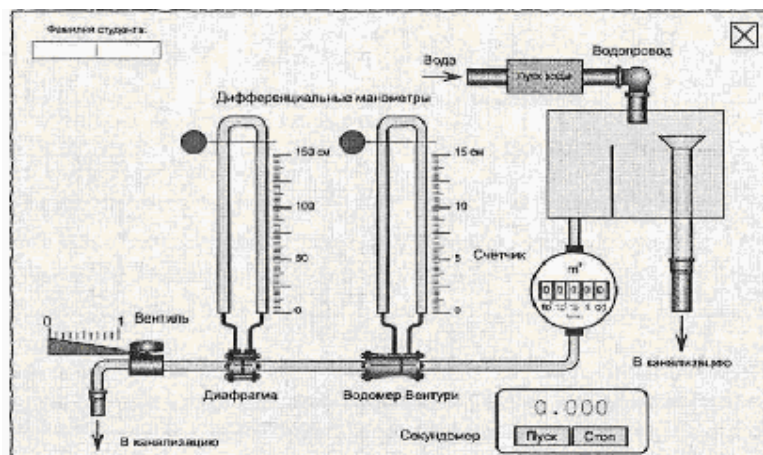


Рис. 12.3. Початковий стан лабораторної установки

Керувати вентилем можна як безпосередньо лівою кнопкою миші, поміщаючи курсор в трикутну зону покажчика шкали вентиля і переміщаючи його одночасно з натисненням на ліву кнопку миші, так і клавішами клавіатури із стрілками "вліво" і "вправо". Керуючи мірою відкриття вентиля, ви зможете збільшувати і зменшувати швидкість протікання води через діафрагму і водомір Вентурі, відповідно, змінюватиметься швидкість обертання лічильника витрати води.

Оскільки при малій мірі відкриття вентиля переважає ламінарний режим руху рідини, роботу рекомендується починати виконувати при повністю відкритому вентилі, тобто при максимальній витраті води, див. рис. 12.4. При цьому втрати в діафрагмі і водомірі Вентурі також будуть

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
 максимальними. Проте за показами диференціальних манометрів легко зрозуміти, що втрати на ділянці діафрагми істотно вищі, ніж у водомірі Вентурі.

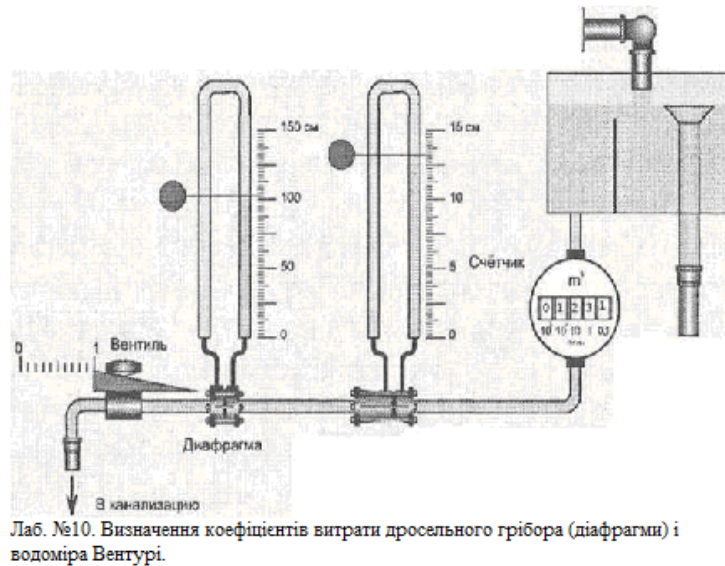


Рис. 12.4. На початку роботи вентиль повністю відкритий

Величину показів диференціальних манометрів знімайте по відповідних шкалах, переміщаючи лівою кнопкою миші потрібну вимірювальну лінію і поєднуючи її з верхніми рівнями рідини в лівій  $p_1/\rho g$  і правій  $p_2/\rho g$  трубках.

Лічильник підраховує кількість води, що протекла. Цифра синьо-зеленого кольору має розмірність 0,1 літра, наприклад, цифра 8 синьо-зеленого кольору означатиме, що протекло 0,8 літра. Група червоних цифр справа-наліво має відповідно розмірності: 1, 10 і 100 літрів. Таким чином, якщо покази лічильника складаються з трьох червоних цифр, наприклад 123, і синьо-зеленою - 1, значить, на даний момент загальна витрата води складає 123,1 літра (див. рис. 12.4).

Для оцінки витрати рідини необхідно скористатися віртуальним секундоміром, включеним до складу лабораторної роботи. Зазвичай ним заміряють час, за який протікає десять літрів води. При цьому користуватися будь-яким іншим секундоміром забороняється, бо

### Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

швидкість відтворення ролика безпосередньо залежить від швидкодії комп'ютера і може дуже відрізнятись від реальної. Для обнулення секундоміра досить навести покажчик миші на його цифрові дані і клікнути лівою кнопкою. Крім того, секундоміром можна управляти за допомогою відповідних клавіш клавіатури в англійській розкладці клавіатури «En» : пуск - клавіша <P>, стоп - <S>, обнулити - <0>.

Послідовно прикриваючи вентиль, проведіть 8...10 вимірів диференціального манометра  $\Delta H_D$  і об'єму  $V$ , протікаючої води, що відповідає йому, за час  $t$  в досліді з діафрагмою і занесіть отримані дані в табл. 12.1. Потім повторіть ті ж виміри  $\Delta H_V$  для водоміра Вентурі. Причому, врахуйте, що покази диференціального манометра і швидкість протікання води для діафрагми необхідно вимірювати в діапазоні від 0,7 до 0,2 міри відкриття вентиля (орієнтуйтеся за шкалою вентиля), а покази диференціального манометра і швидкість протікання води, що відповідає їм, для водоміра Вентурі необхідно вимірювати в діапазоні від 1,0 до 0,4 міри відкриття вентиля.

Далі переходьте до обчислень, заповніть відповідні комірки таблиці 12.2 і побудуйте необхідні тарувальні графіки.

#### **Питання для контролю та самоперевірки**

1. Схема роботи діафрагми.
2. Будова водоміра Вентурі.
3. Рівняння нерозривності потоку.
4. Як визначити витрату рідини через діафрагму?
5. Визначення витрати рідини за допомогою водоміра Вентурі.

Додатки до лабораторних робіт

Додаток 1

Залежність відносної вологості повітря  $\varphi$  від температури, %

Темпе- ратура повіт- ря, °С	Психометрична різниця $t - t^m$ , °С									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	88	76	65	54	44	34	24	14	5	-
11	88	77	66	56	46	36	26	17	8	-
12	89	78	68	57	48	38	29	20	11	-
13	89	79	69	59	49	40	31	23	14	6
14	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
15	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12
16	90	81	71	62	54	46	37	30	22	15
17	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17
18	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
19	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22
20	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
21	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26
22	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
23	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30
24	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
25	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33
30	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Темпе- ратура повіт- ря, °С	Психометрична різниця $t-t^m$ , °С										
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
40	71,5	48	29	13	-	-	-	-	-	-	-
50	74	54	36,5	22	11,5	1,5	-	-	-	-	-
60	76,5	57,5	42	28,5	18	9,5	2,5	-	-	-	-
70	78,5	60,5	45,5	33,5	23,5	15,5	5	3	-	-	-
80	80	63	49	37,5	28	20	13,5	8	3	1	-
90	81,5	65,5	52,5	41	31,5	24	17,5	12	8	4,5	1
100	82,5	67,5	55	44	35	27	21	15,5	11	7,5	4

Залежність властивостей насиченої водяної пари від температури

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Тиск $P \cdot 10^{-5}, \text{Па}$	Питома ентальпія пари $i, 10^3, \text{Дж/кг}$	Питома теплота пароутворення $r,$ $10^3, \text{Дж/кг}$
0	0,0061	2493,1	2493,1
10	0,0123	2512,3	2470,4
20	0,0234	2532,0	2448,2
30	0,0425	2551,3	2425,0
40	0,074	2570,6	2406,3
50	0,123	2589,5	2380,0
60	0,200	2608,3	2356,3
70	0,312	2626,3	2333,0
80	0,474	2644,0	2310,0
90	0,704	2662,0	2235,0
100	1,01	2679,0	2260,0
110	1,435	2696	2234
120	1,99	2711	2207
130	2,71	2726	2179
140	3,64	2740	2150
150	4,77	2759	2120
160	6,23	2765	2089
170	7,95	2776	2056
180	10,4	2785	2021
190	12,6	2792	1984
200	15,5	2798	1945

### 3. ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЗАВДАНЬ

Номери задач студент отримує від викладача індивідуально, а номери варіантів визначає за двома останніми цифрами свого шифру (номера залікової книжки).

Під час розв'язання задач усі математичні операції слід пояснювати в тексті; довідкові дані, що беруть з додатків або рекомендованої літератури, мають супроводжуватися посиланнями на джерело. Для розрахунків використовують лише міжнародну систему одиниць СІ.

#### 3.1 ГІДРАВЛІЧНІ ПРОЦЕСИ

##### Задача 1.1

Знаючи коефіцієнт динамічної (абсолютної) в'язкості рідини  $\mu$  та її густину  $\rho$ , знайти кінематичну в'язкість  $\nu$  і питому вагу цієї рідини  $\gamma$ . Що таке коефіцієнт абсолютної в'язкості рідини?

*Таблиця*

Величина, одиниця вимірювання	Передостання цифра шифру									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\mu \cdot 10^2, \text{Па} \cdot \text{с}$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
	Остання цифра шифру									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\rho, \text{кг/м}^3$	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1220	1180	1150

Вказівки. Визначення коефіцієнта абсолютної в'язкості дати виходячи із закону внутрішнього тертя Ньютона.

##### 1. Визначення фізичних властивостей рідини.

Коефіцієнт кінематичної в'язкості,  $\text{м}^2/\text{с}$ , визначають як відношення абсолютного коефіцієнта в'язкості до густини рідини:

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

$$\nu = \mu/\rho. \quad (1)$$

Питома вага і густина зв'язані залежністю

$$\gamma = \rho g, \quad (2)$$

де  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  — прискорення вільного падіння.

### Задача 1.2

Визначити силу тиску рідини  $T$  на кришку люка, що закриває отвір на боковій вертикальній стінці резервуара та тиск  $p$  на дно резервуара.

Початкові дані вибрати із таблиці: рівень рідини в резервуарі  $H$ , м; відстань від поверхні рідини до верхнього краю отвору  $H_1$ , м; густина рідини  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>; надлишковий тиск на вільну поверхню рідини  $p_{\text{надл}}$ , кПа; радіус отвору  $R$ , мм.

Таблиця

Величина, одиниця вимірюван- ня	Передостання цифра шифру									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	920	925	930	940	950	1003	1004	1060	1070	1080
$R$ , мм	170	180	190	200	210	220	230	200	210	220
$H_1$ , м	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,6
	Остання цифра шифру									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$H$ , м	2,2	2,4	2,6	3,0	3,1	3,4	3,6	4,0	4,2	4,4
$P_0$ , кПа	0	20	40	50	60	70	80	30	20	10

#### 1. Визначення сили тиску на кришку люка.

Сила тиску рідини на плоску поверхню

$$T = (P_0 + \rho g h_{\text{ц.т.}}) F \quad (1)$$

де  $P_0$  — надлишковий тиск на поверхні рідини, Па;

$h_{\text{ц.т.}}$  — глибина занурення центру тяжіння кришки люка під рівень вільної поверхні рідини, м,

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

$$h_{ц.т.} = H_1 + R \quad (2)$$

$F$  – площа поверхні люка, м<sup>2</sup>,

$$F = \frac{\pi D^2}{4}; \quad (3)$$

$D$  – діаметр отвору, м.

**2. Визначення тиску на дно резервуара.**

Згідно з законом Паскаля

$$p = p_0 + \rho g H, \quad (4)$$

де  $H$  – рівень рідини в резервуарі.

**Задача 1.3**

Визначити рівень суспензії  $H$  у відкритому в атмосферу напірному збірнику над місцем введення її фільтраційний апарат.

Початкові дані: густина суспензії  $\rho = 1050$  кг/м<sup>3</sup>; коефіцієнт динамічної в'язкості  $\mu = 1150 \cdot 10^{-6}$  Па·с; надлишковий тиск в апараті  $P_{надл.}$  кПа; швидкість руху суспензії в трубопроводі  $w$ , м/с; трубопровід сталевий діаметром  $d$ , мм; абсолютна шорсткість матеріалу трубопроводу  $\Delta = 0,10 \dots 0,15$  мм; розрахункова довжина трубопроводу  $\ell_p$ : (дійсна довжина плюс еквівалентна довжина, тобто така, що створює такий же гідравлічний опір як і місцеві опори в табл.).

Таблиця

Величина, одиниця вимірюван- ня	Передостання цифра шифру								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\rho_{надл.}$ , кПа	40	55	50	47	62	60	45	60	53
$w$ , м/с	0,8	1,1	0,9	1,1	1,2	1,5	1,4	1,0	0,9
	Остання цифра шифру								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

d, мм	40	50	40	50	90	100	125	75	80
$l_p$ , м	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	9,0	10,0	7,0	6,0

### 1. Визначення рівня рідини в напірному збірнику (див. рисунок).

Рівняння Бернуллі для перерізів I–I і II–II

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{w_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{w_2^2}{2g} + h_w, \quad (1)$$

де  $Z$  - геометричний напір, м;

$\frac{p}{\rho g}$  - п'єзометричний напір, м;

$\frac{w^2}{2g}$  - швидкісний напір, м;

$h_w$  - загальні втрати напору в трубопроводі на подолання опору тертя та місцеві опори, м.

Аналіз рівняння Бернуллі відносно порівняльної площини 0-0.

Переріз I–I:  $Z_1 = H$ ;  $p_1 = p_{\text{атм}}$ ;  $w_1 = 0$  ( $H = \text{const}$ ).

Переріз II–II:  $Z_2 = 0$ ;  $p_2 = p_{\text{надл.}} + p_{\text{ат}}$ ;  $w_2 = w$ ;  $h_w$ .

Після підстановки цих величин в рівняння Бернуллі отримують:

(2)

Визначити втрати напору в трубопроводі, м:

$$h_w = \lambda \frac{l_p}{d} \frac{w^2}{2g}, \quad (3)$$

де  $\lambda$  - коефіцієнт опору тертя;

$l_p$  - розрахункова довжина трубопроводу, м;

$d$  – діаметр труби, м;

$w$  – швидкість руху рідини в трубопроводі, м/с.

Для розрахунку коефіцієнта опору тертя  $\lambda$  треба встановити зону гідравлічного опору.

## 2. Визначення режиму руху рідини.

Критерій Рейнольдса

$$Re = \frac{wd\rho}{\mu}. \quad (4)$$

Визначають критичні значення критерія Рейнольдса  $Re_{гг}$  і  $Re_{кв}$ :

$$; \quad (5)$$

$$(6)$$

При  $Re < Re_{гг}$ , - зона гідралічно гладких труб, де  $\lambda = f(Re)$ :

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}; \quad (7)$$

При  $Re_{гг} < Re < Re_{кв}$  – зона докватратичного опору, де  $\lambda = f(Re, \bar{\Delta})$ :

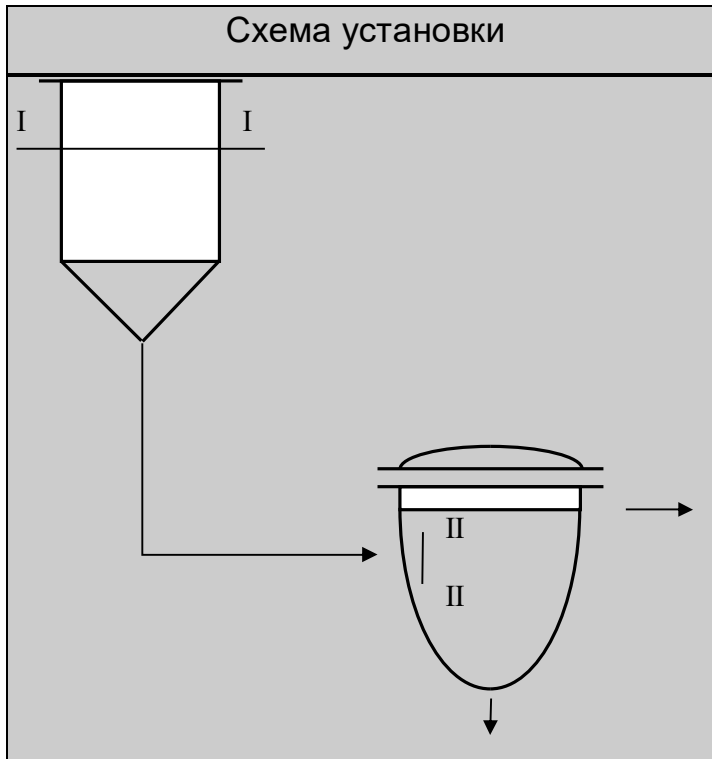
$$\lambda = 0,11 \left( \bar{\Delta} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (8)$$

де  $\bar{\Delta}$  - відносна шорсткість

$$\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{d}, \quad (9)$$

При  $Re_{гг} > Re_{кв}$  – зона квадратичного опору, де  $\lambda = f(\bar{\Delta})$ :

$$\lambda = 0,11 \left( \bar{\Delta} \right)^{0,25}. \quad (10)$$



#### Задача 1.4

Визначити режим руху рідини в трубках і міжтрубному просторі кожухотрубного теплообмінника для нагрівання технічного розчину водою і накреслити схему теплообмінника.

Початкові дані вибрати із табл.: масова витрата води, що подається в міжтрубний простір  $G$ , т/год; середня температура води  $t_v$ , °С; середня температура технічного розчину  $t_p$ , °С; концентрація технічного розчину  $n=4,0$  % мас; внутрішній діаметр корпусу теплообмінника  $D$ , мм; діаметр трубок  $d = 30 \times 1,5$  мм (перша цифра означає зовнішній діаметр трубки, друга – товщину стінки трубки); кількість трубок  $n$ , шт.; швидкість руху технічного розчину  $w$ , м/с.

Таблиця

Величина, одиниця вимірюван- ня	Передостання цифра шифру									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$G$ , т/год	100	125	130	140	150	135	145	160	165	110
$t_в$ , °C	70	80	90	80	80	90	70	80	70	90
$D$ , мм	450	460	480	500	520	510	515	520	525	470
	Остання цифра шифру									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$w$ , м/с	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
$t_p$ , °C	50	60	70	60	50	70	60	50	70	60
$n$ , шт.	30	32	33	34	35	32	33	36	35	31

**1. Визначення критерію Рейнольдса при русі технічного розчину:**

$$Re = \frac{wd\rho}{\mu} ; \quad (1)$$

де  $d$  – внутрішній діаметр трубки, м;

$\rho$  - густина технічного розчину, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu$  - динамічна в'язкість технічного розчину, Па·с.

Властивості технічного розчину вибирають з табл. Д.1-Д.8 за температурою  $t_p$  і  $n = 4,0$  % мас.

При  $Re \leq 2300$  – ламінарний режим;

$Re > 10000$  – турбулентний режим;

$2300 < Re < 10000$  – перехідна зона.

**2. Визначення режиму руху води в міжтрубному просторі.**

Критерій Рейнольдса

$$Re = \frac{wd_e\rho}{\mu},$$

де  $d_e$  – еквівалентний діаметр міжтрубного простору.

Фізичні властивості води вибирають з табл. додатку за середньою температурою  $t_b$ .

Еквівалентний діаметр міжтрубного простору

$$d_e = \frac{4f}{\Pi} = \frac{D^2 - nd^2}{D + nd}; \quad (2)$$

де  $f$  – площа живого перерізу міжтрубного простору,  $m^2$ ;

$\Pi$  – змочений периметр,  $m$ .

Площа живого перерізу міжтрубного простору

$$f = \frac{\pi D^2}{4} - n \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi}{4} (D^2 - nd^2), \quad (3)$$

де  $D$  – внутрішній діаметр корпуса,  $m$ ;

$d$  – зовнішній діаметр трубки,  $m$ ;

$n$  – кількість трубок, шт.

Змочений периметр

$$\Pi = \pi D + n\pi d = \pi(D + nd) \quad (4)$$

Швидкість руху води в міжтрубному просторі

$$w = \frac{G}{\rho f}. \quad (5)$$

### **Задача 1.5.**

Визначити потужність на валу насоса під час його роботи на трубопроводі і накреслити схему установки.

Початкові дані вибрати із табл. 2: подача насоса  $Q$ ,  $m^3/год$ ; геометрична висота подачі рідини  $Z$ ,  $m$ ; діаметр трубопроводу  $d$ ,  $mm$ ; загальна довжина трубопроводу  $l$ ,  $m$ ; коефіцієнт опору тертя  $\lambda = 0,02$ ; втрати напору на місцеві опори еквівалентні втратам на тертя по довжині труби  $l_{\text{æä}} = 30$   $m$ ; ККД насоса  $\eta$ , %; густина рідини  $\rho = 990$   $kg/m^3$ .

**Технічна характеристика насосу** представлена в табл. 1.

Таблиця 1

Q, м <sup>3</sup> /год	0	40	80	120	180	200	240	300
H, м	36	40	38,5	37,5	34	30	25,5	20
η, %	0	39	57	60	73	73	69	65

Таблиця 2

Величина, одиниця вимірювання	Передостання цифра шифру									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Z, м	15	20	25	20	22	21	19	18	15	19
	Остання цифра шифру									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d, мм	200	140	150	160	170	180	200	190	200	180
$l_p$ , м	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140

### 1. Розрахунок гідравлічної характеристики *H-Q* трубопроводу

Повний напір, що його потрібно створити для забезпечення необхідної подачі рідини в трубопроводі, визначається за таким рівнянням:

(1)

де  $Z$  – геометрична висота подачі рідини, м;  $p_1, p_2$  – тиск на вільну поверхню рідини у всмоктувальному і напірному резервуарах, Па;  $h_w$  – втрата напору в трубопроводі, м.

У випадку, коли резервуари відкриті в атмосферу,  $p_1 = p_2 = p_{ат}$ , тоді рівняння набуває такого вигляду:

(2)

Втрати напору в трубопроводі

(3)

де  $\lambda$  - коефіцієнт опору тертя;

$l$  - довжина трубопроводу, м;

$l_{екв}$  - еквівалентна довжина трубопроводу, м;

$d$  - діаметр трубопроводу, м;

$w$  - швидкість рідини у трубопроводі, м/с.

Швидкість руху рідини визначають з рівняння нерозривності потоку:

$$Q = wF, \quad (4)$$

де  $Q$  - об'ємна витрата рідини, м<sup>3</sup>/с;  $F$  - площа живого перерізу потоку, м<sup>2</sup>.

Для всіх значень подачі насоса визначають  $w$ ,  $h_w$  і  $H_{мп}$ .

## 2. Визначення робочої точки

На міліметровому папері побудувати характеристики насоса  $H-Q$  і  $\eta-Q$  (необхідні дані взяти з табл. 1) і характеристику  $H-Q$  трубопроводу.

Робоча точка знаходиться в місці перетину напірних характеристик  $H-Q$  насоса і трубопроводу.

Визначити параметри насосної установки в робочій точці: напір -  $H$ , м; подачу -  $Q$ , м<sup>3</sup>/с і ККД -  $\eta$ , %.

**3. Визначення потужності на валу насоса, кВт, під час його роботи на трубопроводі:**

$$N = \frac{Q\rho gH}{1000\eta}, \quad \text{або} \quad N = \frac{Q\rho H}{102\eta}, \quad (5)$$

де  $N$  - потужність на валу насоса, кВт;

$\rho$  - густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;

$H$  - напір в робочій точці, м;

$\eta$  - ККД установки в робочій точці.

### 3.2 ГІДРОМЕХАНІЧНІ ПРОЦЕСИ

#### Задача 2.1

Розрахувати і накреслити схему відстійника безперервної дії для освітлення водної суспензії.

Під час розрахунку слід визначити швидкість осідання в гравітаційному полі  $w_{oc}$ , м/с; масу освітленої рідини  $G_p$ , кг/с; площу поверхні відстійника  $F$ , м<sup>2</sup>; діаметр апарата  $D$ , м.

Початкові дані: витрата водної суспензії  $G$ , т/год.; температура суспензії  $t$ , °С; концентрація твердої фази у суспензії, % мас.; концентрація твердої фази у згущеній суспензії, % мас.; діаметр частинок  $d$ , м; густина частинок  $\rho_c$ , кг/м<sup>3</sup>(табл.).

Таблиця

Перед- остання цифра шифру	Задані величини			Остан-ня цифра шифру	Задані величини		
	$G$ , т/год	$t$ , °С	$x_1$ , % мас.		$x_2$ , % мас.	$d \cdot 10^6$ , м	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
0	20	50	10,5	0	25	10	1150
1	13	30	12,0	1	27	15	1200
2	15	40	12,5	2	28	18	1250
3	10	60	10,5	3	22	20	1300
4	18,5	80	8,5	4	24	13	1250
5	18	70	14,0	5	30	23	1320
6	25	40	9,0	6	28	25	1880
7	16	60	13,0	7	26	16	1340
8	13,5	70	11,5	8	29	28	1210
9	12,0	80	11,0	9	18	30	1280

#### 1. Визначення швидкості осаджування частинок

Знаходимо критерії Архімеда ( $Ar$ ) за формулою

$$Ar = \frac{gd^3 \rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}}{\nu_{\text{с}}^2 \rho_{\text{с}}}, \quad (1)$$

де  $d$  – діаметр кулеподібної частини, м;

$\nu_{\text{с}}$  – кінематична в'язкість середовища, м<sup>2</sup>/с;

$\rho_{\text{ч}}$  – густина частинки, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{с}}$  – густина середовища, кг/м<sup>3</sup>;

$g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>.

При температурі розчину  $t$  визначаємо по (табл. Д.10) фізичні параметри води: густину  $\rho_{\text{с}}$ , кг/м<sup>3</sup>, динамічну в'язкість  $\mu_{\text{с}}$ , Па · с.

Кінематична в'язкість середовища

$$\nu_{\text{с}} = \frac{\mu_{\text{с}}}{\rho_{\text{с}}}. \quad (2)$$

Визначивши числові значення критерія Архімеда, знаходимо критерій Рейнольдса:

якщо  $Ar \leq 36$   $Re = \frac{Ar}{18}; \quad (3)$

якщо  $84000 > Ar > 36$   $Re = \left( \frac{Ar}{13,9} \right)^{1/1,4}; \quad (4)$

якщо  $Ar > 84000$   $Re = \sqrt{\frac{Ar}{0,33}}. \quad (5)$

Знаючи значення числа  $Re$ , знаходимо швидкість осаджування частинок:

$$w_{\text{ос}} = \frac{Re \nu_{\text{с}}}{d}, \text{ м/с} \quad (6)$$

## **2. Визначення маси освітленої рідини**

Масу освітленої рідини визначаємо за допомогою рівняння матеріального балансу:

$$G = G_{\text{o}} + G_{\text{p}}, \quad (7)$$

де  $G_{\text{o}}$  – продуктивність відстійника по твердій фазі, кг/с;

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

$G_p$  – продуктивність відстійника по освітленій рідині, кг/с.

Знаходимо продуктивність відстійника за твердою фазою:

$$G_o = G \frac{x_1}{x_2}. \quad (8)$$

Визначаємо продуктивність відстійника за освітленою рідиною:

$$G_p = G - G_o. \quad (9)$$

### **3. Визначення площі поверхні відстійника**

Площа відстійника, м,

(10)

### **4. Визначення діаметра відстійника**

Для відстійника циліндричної форми

$$F = \frac{\pi D^2}{4}, \quad (11)$$

де  $D$  – діаметр відстійника, м,

$$D = \sqrt{\frac{4F}{\pi}}. \quad (12)$$

## **Задача 2.2**

Розрахувати і накреслити схему барабанного вакуум-фільтра для фільтрування суспензії.

Під час розрахунку треба визначити площу поверхні барабанного вакуум-фільтра  $F$ , м<sup>2</sup>; кількість отриманого фільтрату  $G_{\phi}$ , кг/с; тривалість повного циклу фільтрування  $\tau$ , с; частоту обертання  $n$ , об/хв; ступінь занурення барабана в суспензію,  $\varphi$ .

Початкові дані: витрата суспензії  $G_c$ , кг/с; (табл.) вміст твердої фази в суспензії  $x_1$ , мас %; густина суспензії  $\rho_c$ , кг/м<sup>3</sup>; товщина шару осаду  $h_{oc}$ , мм; вологість осаду  $w$ , мас %; питомий опір осаду  $r_{oc}$ , м<sup>2</sup>; опір фільтрувальної перегородки  $R_{пер}$ , м<sup>-1</sup>; густина фільтрату  $\rho_{\phi}$ , кг/м<sup>3</sup> та його в'язкість  $\mu_{\phi}$ , Па·с; в'язкість фільтрату під час промивання  $\mu_{пр}$ , Па·с.

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Витрата води на промивання осаду становить  $V = 1,5 \text{ м}^3$  на  $1 \text{ м}^2$  вологого осаду. Перепад тисків при фільтруванні та промивці дорівнює  $\Delta p = 0,64 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

Таблиця

Пере- доста- ння цифра шифру	Задані величини					Остан- ня цифра шифру	Задані величини				
	$G_c$ , кг/с	$X_1$ , ма с %	$\rho_c$ , кг/м <sup>3</sup>	$h_{oc}$ , мм	$w$ , мас %		$r_{oc} \cdot 10^{-12}$ , м <sup>-2</sup>	$R_{пер} \cdot 10^{-10}$ , м <sup>-1</sup>	$\rho_f$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu_f \cdot 10^4$ , Па·с	$\mu_{пр} \cdot 10^4$ , Па·с
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	8,5	20	2100	10	15	0	18	14,5	1080	6	4
1	9,0	22	1950	8	25	1	13	14,0	1070	6,5	4,5
2	8,0	18	2020	11	20	2	12	15,0	1050	5,9	4,2
3	9,1	15	1940	12	30	3	14	13,2	1090	7,0	5,1
4	8,2	21	2110	15	35	4	17	13	1030	5,7	4,1
5	8,9	17	1955	13	28	5	15	13,8	1020	6,3	4,8
6	9,4	20	2002	9	17	6	16	14,3	1100	6,5	5,2
7	10,0	19	1945	14	38	7	13	14,8	1060	7,2	5,5
8	10,2	18	2120	7	22	8	11	15,1	1040	6,8	5,1
9	10,5	23	2050	10	31	9	17	15,5	1055	5,9	4,1

**1. Визначаємо масу твердої фази  $G_m$ , кг/с, яка потрапляє разом з суспензією в апарат**

$$G_T = G_c \cdot X_1 \quad (1)$$

Розраховуємо масу отриманого вологого осаду  $G_{oc}$ , кг/с

$$G_{oc} = \frac{G_T}{1 - w} \quad (2)$$

маса отриманого фільтрату  $G_f$ , кг/с

$$G_f = G_c - G_{oc} \quad (3)$$

Об'єм фільтрату, м<sup>3</sup>/с

$$V_f = G_f / \rho_f \quad (4)$$

Знаходимо густину осаду,  $\rho_{oc}$ , кг/м<sup>3</sup>

$$(5)$$

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

де  $\rho_e$  – густина води при 20°C, кг/м<sup>3</sup> (табл. Д.10).

Кількість вологого осаду, який припадає на 1м<sup>3</sup> отриманого фільтрата, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

(6)

**2. Визначаємо питому продуктивність фільтра за цикл  $v$ , м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>**

$$v = \frac{h_{oc}}{X_{oc}} \quad (7)$$

Тривалість фільтрування  $\tau_{\phi}$ , с

$$\tau_{\phi} = \left( \frac{\mu_{\phi} r_{oc} v^2}{2\Delta p} \right) + \left( \frac{\mu_{\phi} R_{пер} v}{\Delta p} \right) \quad (8)$$

Визначаємо питомий опір осаду при промивці  $r_{пр}$ , м<sup>-2</sup>

$$r_{пр} = \mu_{пр} \cdot r_{oc} / \mu_{\phi} \quad (9)$$

Тривалість промивки  $\tau_{пр}$ , с

(10)

Тривалість повного циклу фільтрування  $\tau$ , с

(11)

де  $m$ ,  $m_{\phi}$ ,  $m_{пр}$  – відповідно загальна кількість секцій, кількість секцій в зоні фільтрування та в зоні промивки.

Загальну кількість секцій в барабані приймаємо  $m = 18$ , в зоні фільтрування  $m_{\phi} = 6$  та в зоні промивки  $m_{пр} = 3$ .

**3. Визначаємо необхідну площу поверхні барабанного вакуум-фільтра  $F$ , м<sup>2</sup>**

$$F = V_{ocT} / v \quad (12)$$

**4. Частота обертання барабана  $n$ , об/хв**

$$n = 60 / \tau \quad (13)$$

**5. Ступінь занурення барабана в суспензію  $\varphi$**

$$\varphi = \frac{\tau}{\tau_{oc}} \quad (14)$$

**Задача 2.3**

Визначити потужність  $N$  приводу повітродувки та нарисувати схему установки для пневматичного перемішування рідини з повітрям у закритому апараті.

При розрахунку повітродувки використовують такі початкові дані: висота шару рідини в апараті  $H$ , м; густина рідини  $\rho_r$ , кг/м<sup>3</sup>; тиск над рідиною в апараті  $P_0$ , мм. вод. ст.; гідравлічний опір трубопроводу  $P_{тр}$ , Па; ККД повітродувки  $\eta$ ; діаметр резервуара  $D$ , м; питома витрата повітря на 1 м<sup>2</sup> вільної поверхні рідини  $V$ , м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·хв).

Таблиця

Передостання цифра шифру	Задані величини			Остання цифра шифру	Задані величини			
	$H$ , м	$\rho_r$ , кг/м <sup>3</sup>	$P_0$ , мм. вод.ст		$P_{тр}$ , Па	$\eta$	$D$ , м	$V$ , м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·хв)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,6	920	78	0	1150	0,5	1,2	0,4
1	1,0	925	80	1	1200	0,55	1,5	0,6
2	1,2	940	82	2	1250	0,6	2,0	0,5
3	1,5	930	85	3	1400	0,5	2,1	0,8
4	2,1	950	81	4	1155	0,55	2,4	0,7
5	2,4	1000	90	5	1300	0,6	2,8	0,65
6	2,8	1010	93	6	1320	0,58	3,0	0,75
7	2,0	1050	79	7	1050	0,52	2,2	0,85
8	1,7	1100	84	8	1025	0,62	2,5	0,9
9	1,5	1150	86	9	1100	0,7	2,9	1,0

**1. Потужність  $N$ , кВт на валу повітродувки при пневматичному перемішуванні визначають з рівняння**

$$N = \frac{QP}{1000\eta}, \quad (1)$$

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

де  $Q$  – об'ємна витрата повітря, що подається,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$P$  – повний гідравлічний опір системи, Па.

(2)

**2. Кількість повітря, що подається в апарат визначається з рівняння,  $\text{м}^3/\text{с}$**

$$Q = V \cdot F, \quad (3)$$

де  $F$  – площа вільної поверхні рідини,  $\text{м}^2$ ;

$$F = \frac{\pi D^2}{4}. \quad (4)$$

**Задача 2.4**

Якою має бути потужність привода мішалки для перемішування водної суспензії пропелерною /гвинтовою/ мішалкою, що обертається з частотою  $n$  в апараті діаметром  $D$ , якщо густина суспензії  $\rho$ , в'язкість  $\mu$ , а діаметр мішалки  $d$  втричі менший за діаметр посудини для перемішування (апарату).

*Таблиця*

Величина, одиниця вимірювання	Передостання цифра шифру									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$n$ , об/хв	100	60	75	80	90	110	120	150	130	60
$D$ , мм	1200	950	1000	850	950	1000	850	900	950	1100
	Остання цифра шифру									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\rho$ , $\text{кг}/\text{м}^3$	1200	1050	1100	1050	1300	1150	1000	980	1250	1000
$\mu \cdot 10^6$ , Па·с	1790	1310	1000	804	657	549	470	670	855	615

**1. Визначення критерію Рейнольдса при русі суспензії під час перемішування:**

$$Re = \frac{\rho n d^2}{\mu} ; \quad (1)$$

де  $d$  - діаметр мішалки, м;

$\rho$  - густина суспензії, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu$  - коефіцієнт динамічної в'язкості водної суспензії, Па·с.

## **2. Визначення критерію потужності (критерію Ейлера) за графіком (дод. Д12).**

Для визначення критерію Ейлера потрібно за розрахованим значенням Рейнольдса вибрати точку перетину із кривою, що відповідає типу мішалки та симплексам геометричної подібності.

Наприклад, для чотирьохлопатевої мішалки із кутом встановлення лопатей під кутом 60° (крива 7), що перемішує розчин із чисельним значенням критерію Рейнольдса у 10000 критерій Ейлера складає 1,4.

## **4. Потужність перемішування визначають за рівнянням:**

$$N = Eu_{\mu} \rho n^3 d^5 \quad (2)$$

### 3. 3 ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ

#### Задача 3.1

Знайти коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  від насиченої водяної пари, що конденсується, до зовнішньої поверхні вертикальних труб висотою  $H$  і горизонтальних труб діаметром  $d$ , якщо тиск насиченої пари  $p$ , температура плівки конденсату  $t$ , різниця температур насичення і стінки  $\Delta t$ . Задачу розв'язати у двох варіантах (для  $H$  і для  $d$ ). Початкові дані вибрати із таблиці.

Таблиця

Передостання цифра шифру	Задані величини			Остання цифра шифру	Задані величини	
	$H$ , м	$d$ , мм	$p$ , МПа		$\Delta t$ , °C	$t$ , °C
1	2	3	4	5	6	7
0	1,8	20	0,1	0	25	96
1	1,5	22	0,16	1	30	105
2	2,0	25	0,2	2	40	112
3	2,5	28	0,24	3	50	118
4	3,0	30	0,3	4	55	124
5	3,5	32	0,36	5	45	128
6	4,0	36	0,4	6	60	132
7	2,5	20	0,12	7	25	98
8	2,3	25	0,14	8	15	102
9	2,2	32	0,28	9	10	126

Вказівки. Нарисувати схему кожухотрубного теплообмінника (для варіанту визначення  $\alpha$  при визначальному розмірі  $H$  – вертикальний, для  $d$  – горизонтальний) з позначенням потоків і температурного режиму.

Під час розрахунків скористатися рівнянням

$$\alpha = c^4 \sqrt{\frac{rg\lambda^3 \rho^2}{H\mu\Delta t}}, \quad (1)$$

де  $c$  – коефіцієнт, що характеризує положення поверхні теплообміну ( $c=1,15$  – для вертикальних труб,  $c=0,725$  – для горизонтальних);

$r$  – теплота конденсації пари, Дж/кг;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$\lambda$  – теплопровідність плівки конденсату, Вт/(м·К);

$\rho$  – густина плівки конденсату, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості плівки конденсату, Па·с.

За температурою плівки конденсату визначити його теплофізичні властивості за таблицею для води.

За результатами розрахунку зробити висновок про ефективність тепловіддачі.

### Задача 3.2

У пластинчастому теплообміннику гаряча вода в кількості  $G_1$  із початковою температурою  $t_{1п}$  нагріває воду від  $t_{2п}$  до  $t_{2к}$ . Кінцева температура гарячої води  $t_{1к}$ . Коефіцієнт теплопередачі  $K$ . Знайти необхідну площу поверхні теплопередачі теплообмінника і кількість нагрітої води. Початкові дані вибрати із таблиці.

Таблиця

Передостання цифра шифру	Задані величини			Остання цифра шифру	Задані величини		
	$G_1$ , кг/год	$t_{2п}$ , °С	$t_{2к}$ , °С		$t_{1п}$ , °С	$t_{1к}$ , °С	$K$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
0	7000	20	50	0	90	65	2800
1	8500	22	70	1	85	57	3750
2	8000	25	60	2	78	55	1700
3	9500	28	60	3	84	70	2720

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

4	10000	30	70	4	95	65	2900
5	8500	32	75	5	92	50	1950
6	9000	36	80	6	95	65	3880
7	11250	20	55	7	85	60	1730
8	11350	25	80	8	95	70	2650
9	15000	32	65	9	82	50	2920

Вказівки. Нарисувати схему пластинчастого теплообмінника з нанесенням потоків і температурного режиму. Теплофізичні характеристики робочих середовищ взяти з довідникових таблиць.

### 1. Визначення температурних умов нагріву

Середню різницю температур між парою і рідиною, що нагрівається, визначають як середньологарифмічну різницю

$$\Delta t_c = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_M}{\frac{\ln(\Delta t_{\delta})}{\Delta t_M}} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_M}{2,3 \lg(\Delta t_{\delta})}, (1)$$

де  $\Delta t_{\delta}$ ,  $\Delta t_M$  - різниці температур між теплоносіями на кінцях теплообмінника визначаються за температурним графіком;

Якщо  $\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_M} \leq 2$ , то середньологарифмічну різницю можна замінити середньоарифметичною різницею:

$$\Delta t_c = \frac{\Delta t_{\delta} + \Delta t_M}{2}. (2)$$

Середня температура рідини, яку нагрівають:

$$(3)$$

### 2. Теплофізичні властивості рідини, що нагрівається

При середній температурі  $t_{2c}$  води визначаються за допомогою таблиць: густину  $\rho$  [кг/м<sup>3</sup>]; теплоємність  $C_2$  [Дж/(кг·К)].

### 3. Теплове навантаження і витрати холодного теплоносія

Теплове навантаження без врахування теплових втрат визначається за рівнянням, Дж/с або Вт:

Витрати холодного теплоносія можна визначити із рівняння

(4)

де  $x$  – коефіцієнт, що враховує втрати теплоти в навколишнє середовище;  $x = 1,02 \dots 1,05$ ;  $G$  - витрата рідини, кг/с;  $c$  - теплоємність рідини, Дж/(кг·К).

Витрати води, кг/с:

(5)

#### **4. Визначення площі поверхні теплопередачі**

Площа поверхні нагрівання теплообмінника визначається за формулою

$$F = \frac{Q}{K \Delta t_c} \quad (6)$$

#### **Задача 3.3**

У поверхневому холодильнику потрібно охолодити  $G$  продукту теплоємністю  $C$  від  $t_n$  до  $t_k$ . Охолодження здійснюється водою, температура якої на вході в апарат  $t_{вп}$ , на виході  $t_{вк}$ . Обчислити потрібну площу поверхні теплообміну, прийнявши коефіцієнт теплопередачі таким, що дорівнює  $K$ , і витрату охолодної води. Тепловтрати у навколишнє середовище дорівнюють  $x$ . Розрахунок виконати за двома

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
 варіантами руху теплоносіїв: прямо- і протитечійному. Початкові дані  
 вибрати із таблиці.

Таблиця

Перед- остання цифра шифру	Задані величини				Остання цифра шифру	Задані величини			
	G, кг/год	t <sub>п</sub> , °C	t <sub>к</sub> , °C	C, кДж/(кг·К)		K,Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	x,%	t <sub>вп</sub> , °C	t <sub>вк</sub> , °C
0	6500	50	30	3,30	0	1300	5	5	15
1	6800	45	30	3,35	1	1350	6	8	12
2	7000	60	20	3,40	2	1400	7	7	11
3	7200	50	20	3,45	3	1450	8	2	13
4	5000	55	30	3,32	4	1500	9	6	14
5	5500	60	20	3,34	5	1550	10	5	15
6	5800	45	25	3,44	6	1380	2	9	11
7	7400	50	40	3,48	7	1480	3	8	12
8	7600	55	35	3,46	8	1520	4	7	13
9	7800	60	30	3,48	9	1500	15	6	14

Вказівки. Нарисувати схему кожухотрубного холодильника з нанесенням потоків і температурного режиму. Теплофізичні характеристики робочих середовищ взяти з довідникових таблиць.

Обчислення провести за методикою задачі 3.2. В якості гарячого теплоносія у задачі буде виступати продукт, а холодного – вода. Побудувати температурний графік та провести розрахунки за двома варіантами – прямотечією і протитечією.

### Задача 3.4

Визначити коефіцієнт теплопередачі під час нагрівання води у вертикальному кожухотрубному теплообміннику за таких умов: кількість води, яку потрібно нагріти G, т/год; початкова температура води t<sub>2п</sub>, °C;

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум  
кінцева температура  $t_{2к}$ , °С; тиск гріючої пари  $P$ , МПа; швидкість руху води у трубках теплообмінника  $w$ , м/с, внутрішній діаметр трубок  $d_v$ , мм стінки трубки вибирається у межах  $\delta = 1,5...3$  мм; довжина (висота) трубок  $H$ , м, матеріал трубок і коефіцієнт його теплопровідності  $\lambda_{ст}$ , Вт/(м·К): мідь  $\lambda_{ст} = 380$ ; латунь  $\lambda_{ст} = 93$ ; алюміній  $\lambda_{ст} = 200$ ; сталь  $\lambda_{ст} = 46$ ; нержавіюча сталь  $\lambda_{ст} = 17,5$ . Початкові дані вибрати із таблиці.

### Методика теплового розрахунку поверхневого теплообмінника

#### 1. Визначення температурних умов нагрівання

Середню різницю температур між паром і рідиною, що нагрівається, визначають як середньологарифмічну різницю

$$\Delta t_c = \frac{\Delta t_г - \Delta t_н}{\frac{\ln(\Delta t_г)}{\Delta t_н}}, \quad (1)$$

Таблиця

Передостання цифра шифру	Задані величини					Остання цифра шифру	Задані величини		
	G, т/год	w, м/с	$d_v$ , мм	H, м	$\lambda_{ст}$ , Вт/(м·К)		$t_{2п}$ , °С	$t_{2к}$ , °С	P, МПа
0	50	0,5	20	2,0	380	0	7	50	0,055
1	52	0,6	25	2,5	93	1	10	60	0,060
2	48	0,8	30	3,0	200	2	15	70	0,075
3	47	1,0	40	3,2	17,5	3	20	75	0,090
4	45	0,9	50	3,5	46	4	12	65	0,070
5	44	0,7	20	4,0	380	5	14	70	0,080
6	46	0,5	25	2,2	93	6	16	80	0,10
7	42	1,0	30	2,8	200	7	18	78	0,11
8	40	0,7	40	3,5	17,5	8	20	55	0,060
9	45	0,5	50	4,0	46	9	22	80	0,11

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

де  $\Delta t_{\text{б}}$ ,  $\Delta t_{\text{м}}$  - різниці температур між теплоносіями на кінцях теплообмінника;

;

$t$  - температура насиченої пари за тиску  $P$ .

Якщо  $\frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}} \leq 2$ , то середньологарифмічну різницю можна замінити середньоарифметичною різницею:

$$\Delta t_{\text{с}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} + \Delta t_{\text{м}}}{2}.$$

Середня температура рідини, яку нагрівають:

$$t_{2\text{с}} = t - \Delta t_{\text{с}}.$$

### **2. Теплофізичні властивості рідини, що нагрівається**

При середній температурі  $t_{2\text{с}}$  теплофізичні параметри води: коефіцієнт динамічної в'язкості  $\mu$  [Па·с]; густину  $\rho$  [кг/м<sup>3</sup>]; теплоємність  $C$  [Дж/(кг·К)]; коефіцієнт теплопровідності рідини  $\lambda$  [Вт/(м·К)] визначають за допомогою таблиці для води (Табл. Д.10).

### **3. Теплове навантаження і витрати пари.**

Теплове навантаження з урахуванням теплових втрат, Дж/с або Вт:

$$Q = xGC(t_{\text{к}} - t_{\text{п}}) \quad (2)$$

де  $x$  - коефіцієнт, що враховує втрати теплоти в навколишнє середовище;  $x = 1,02 \dots 1,05$ ;

$G$  - витрата рідини, кг/с;

$C$  - теплоємність рідини, Дж/(кг·К).

Витрати пари, кг/с:

$$D = \frac{Q}{I - i}, \quad (3)$$

де  $I$ ,  $i$  - ентальпія грючої пари і конденсату, Дж/кг (з табл.Д.9 вибираємо значення для ентальпії пари).

Ентальпія конденсату визначається за рівнянням

$$i = Ct_k = 4190t_k \quad (4)$$

де  $t_k$  - температура конденсату, яка дорівнює  $t_n - (2...3) ^\circ\text{C}$ .

#### 4. Розрахунок коефіцієнта теплопередачі

Загальний коефіцієнт теплопередачі визначають за формулою

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (5)$$

де  $\alpha_1$  - коефіцієнт тепловіддачі від конденсуючої пари до стінки, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\delta$  - товщина стінки, м;

$\lambda_{ст}$  - теплопровідність стінки, Вт/(м · К);

$\alpha_2$  - коефіцієнт тепловіддачі від стінки до рідини, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_2$  визначається залежно від режиму руху рідини. При  $Re < 2300$

$$Nu = 0,15 Re^{0,3} Pr^{0,4} Gr^{0,1} \left( \frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \quad (6)$$

де  $Nu$ ,  $Re$ ,  $Gr$  - відповідно критерії Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля, Грасгофа;

$Pr_{ст}$  - критерії Прандтля при температурі стінки.

При  $2300 < Re < 10000$

$$Nu = 0,008 Re^{0,9} Pr^{0,43} \quad (7)$$

При  $Re > 10000$

$$\dots \quad (8)$$

У рівняннях 8 –10 фізичні константи треба вибирати за середньою температурою рідини.

Визначальний геометричний розмір – внутрішній діаметр трубки  $d_e$ , м.

За знайденою величиною  $Nu$  визначається:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \lambda}{d_e} \quad (9)$$

Розрахункове рівняння для обчислення коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_1$ :

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

$$\alpha_1 = 2,04 \cdot A^4 \sqrt{\frac{r}{H \cdot (t - t_{ст1})}}, \quad (10)$$

де  $A$  - розрахунковий коефіцієнт, який залежить від фізичних властивостей плівки конденсату,

$r$  – теплота конденсації, Дж/кг;

$H$  – висота (довжина) вертикальної трубки, м;

$t$  – температура пари, °С;

$t_{ст1}$  - температура стінки, на якій конденсується пара;

(11)

Значення  $A$  залежно від температури плівки конденсату  $t_{пл}$  можна обчислити з таблиці.

Таблиця

$t_{пл}$	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
A	120	139	155	169	179	188	194	197	199	199

У зв'язку з тим, що температура стінки зі сторони пари  $t_{ст1}$  невідома, її визначають методом послідовного наближення. Для цього задаються значенням  $t_{ст1}$ , яке знаходиться між  $t_p$  і  $t_c$ ; при цьому  $t_{ст1}$  буде ближче до  $t_p$ .

Задану температуру перевіряють за рівнянням

$$t_{ст1} = t - \frac{K}{\alpha_1} \Delta t_c, \quad (12)$$

де  $K = K_0 \cdot \varphi$  - розрахунковий коефіцієнт теплопередачі.

Різниця між заданою і розрахунковою температурами повинна бути не вища 1°С.

### Задача 3.5

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Визначити концентрацію розчину після кожного корпусу трикорпусної випарної установки, якщо початкова концентрація розчину  $X$ , початкова кількість розчину  $G$ , маса випареної води в кожному корпусі відповідно  $W_1, W_2, W_3$ .

Початкові дані вибрати із таблиці.

Вказівки. Нарисувати схему випарної установки з нанесенням матеріальних потоків. Розрахунок виконується на основі матеріального балансу.

### **1. Розрахунок концентрації розчину в корпусах.**

Перед початком розрахунку рисують принципову схему випарної установки з позначенням матеріальних і теплових потоків.

При визначенні концентрації розчину після кожного корпусу випарної установки користуються співвідношенням

(1)

Таблиця

Передостання цифра шифру	Задані величини		Остання цифра шифру	Задані величини		
	$G$ , т/год	$X$ , % мас		$W_1$ , т/год	$W_2$ , т/год	$W_3$ , т/год
0	21	13	0	4,0	3,5	3,0
1	17	16	1	4,2	4,0	3,4
2	28	15	2	4,5	4,2	4,1
3	19	14	3	3,8	3,2	3,0
4	20	14,5	4	4,5	4,0	3,8
5	21	15	5	3,8	3,7	3,2
6	16	13	6	3,6	3,0	2,5
7	25	15,5	7	4,3	4,0	3,8
8	23	12	8	4,8	4,2	3,7

9

24

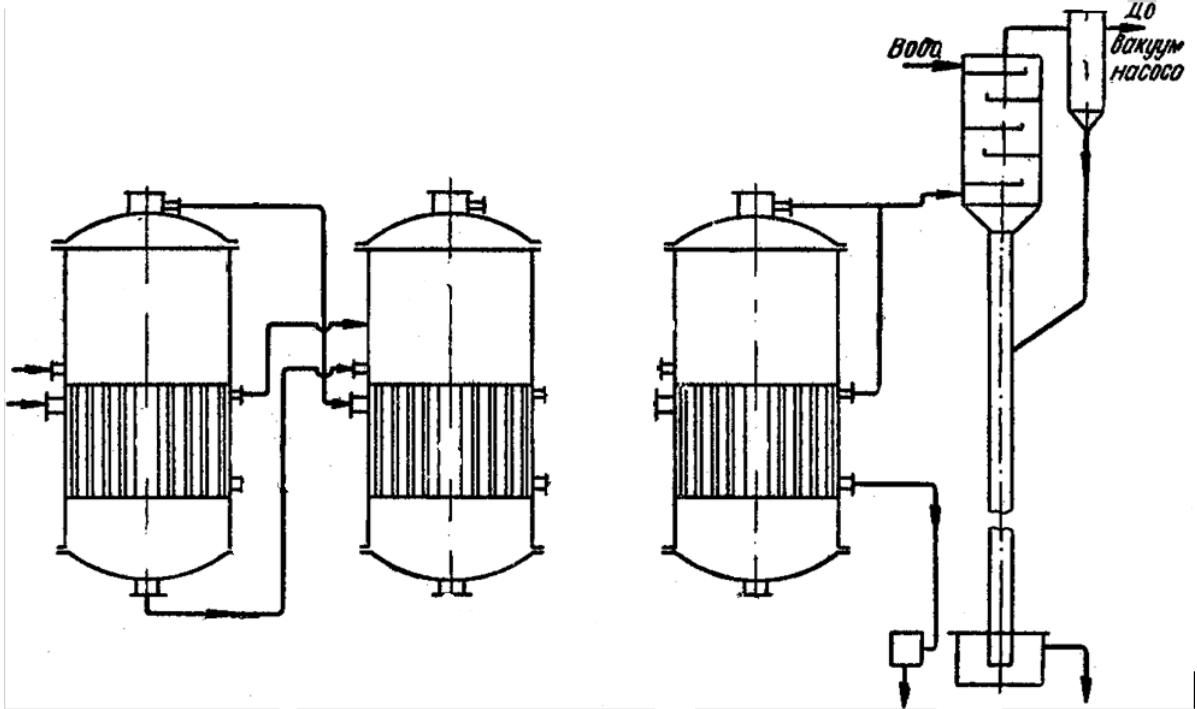
12,5

9

5,0

4,5

4,2



### Задача 3.6

Знайти повну  $\Delta t_n$  і корисну  $\Delta t_k$  різниці температур у корпусах трикорпусної випарної установки при відомих температурних депресіях у кожному корпусі  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$ ,  $\Delta_3$  і втратах температур у паропроводах  $\Delta_0$ . Тиск гріючої пари  $p$ , температура вторинної пари відповідно  $t_{вт1}$ ,  $t_{вт2}$ ,  $t_{вт3}$ .

Початкові дані вибрати із таблиці.

Таблиця

Передостання цифра шифру	Задані величини					Остання цифра шифру	Задані величини		
	$p \cdot 10^{-5}$ , Па	$\Delta_1$ , °C	$\Delta_2$ , °C	$\Delta_3$ , °C	$\Delta_0$ , °C		$t_{вт1}$ , °C	$t_{вт2}$ , °C	$t_{вт3}$ , °C
0	2,5	0,5	1,0	1,5	1,0	0	125	115	101
1	4,0	1,0	1,5	2,0	1,5	1	123	110	100
2	3,0	0,5	1,5	2,5	0,5	2	120	112	99
3	3,3	1,0	1,0	2,0	2,0	3	124	114	102

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

4	3,5	1,0	2,0	2,5	1,0	4	127	117	103
5	1,8	1,0	1,5	3,0	0,5	5	123	112	95
6	2,0	0,5	2,0	2,0	1,0	6	122	110	102
7	2,3	0,5	1,0	2,5	1,5	7	124	114	89
8	2,7	1,0	1,0	1,5	0,5	8	121	111	98
9	2,9	0,5	2,0	3,0	1,0	9	126	112	90

Вказівки. Виконати схему установки з позначенням температур кипіння розчину в корпусах, температур гріючої пари, корисних різниць температур у корпусах і повної різниці температур.

### **Порядок розрахунку температурного режиму випарних апаратів**

Основна мета розрахунку температурного режиму випарної установки - розподілити сумарну корисну різницю температур по окремих корпусах:

$$\sum \Delta t = t_n - t_k - \sum_1^n \Delta; \quad (1)$$

де  $t_n$  - температура гріючої пари, яка йде на 1-й корпус;

$t_k$  - температура вторинної пари при вході в конденсатор;

$\sum_1^n \Delta$  - сумарні температурні втрати в усіх корпусах випарної установки.

Температурні втрати під час випарювання складаються з температурних втрат від фізико-хімічної температурної депресії  $\Delta_{\text{ф}}$ , втрат від гідростатичної депресії  $\Delta_r$  та втрат температур у паропроводах між корпусами  $\Delta_c$ , спричинених гідравлічними опорами.

Сумарна корисна різниця температур розподіляється, виходячи із заданих температур вторинної пари. Для визначення температурного режиму випарної установки знаходять:

температуру гріючої пари в  $i$ -му корпусі

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

$$t_{ni} = t_{BT\ i-1} - \Delta t_{ci-1} \quad (2)$$

температуру кипіння розчину в і-му корпусі

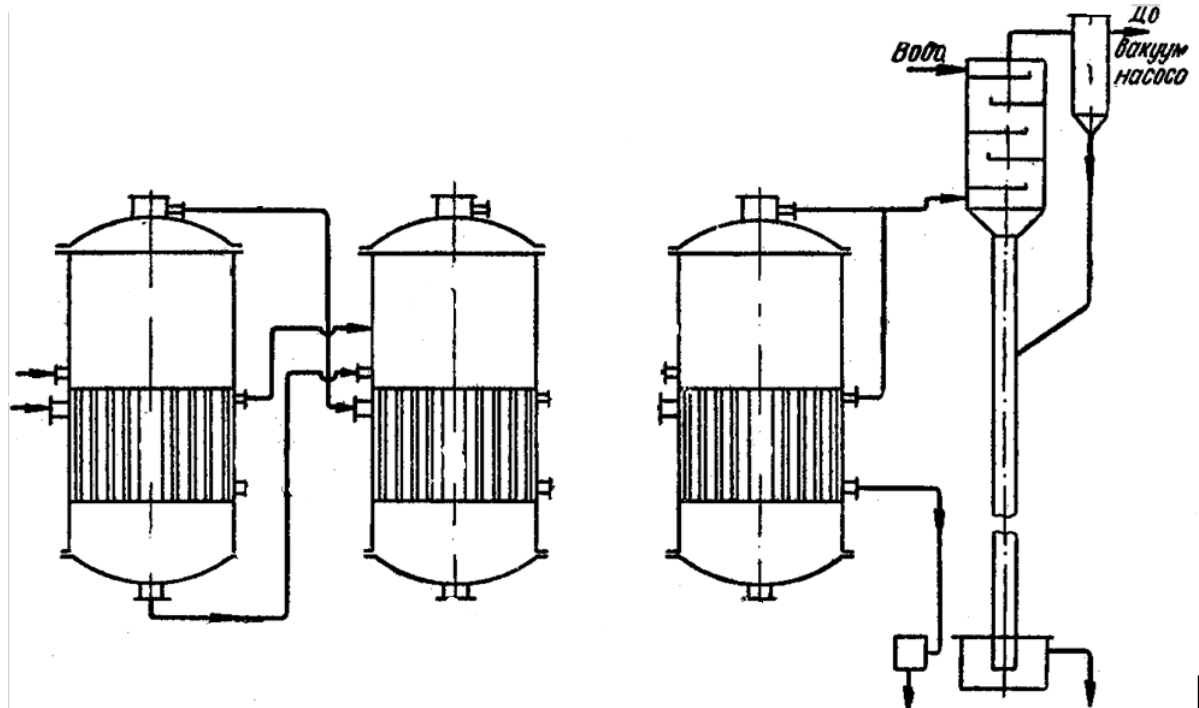
$$t_{pi} = t_{BTi} + (\Delta t_{fi} + \Delta t_{ri}); \quad (3)$$

корисну різницю температур

$$\Delta t_{ki} = t_{ni} - t_{pi}. \quad (4)$$

За температурами гріючої і вторинної пари знаходять їх ентальпію  $I_i$  і теплоту конденсації (пароутворення)  $r_i$  і заносять у таблицю.

Величина, її позначення та одиниці виміру	Корпус		
	1	2	3
Температура, °С:			
гріючої пари, $t_n$			
вторинної пари, $t_{BT}$			
Температура кипіння розчину, $t_p$			
Корисна різниця температур, $\Delta t$			
Ентальпія, Дж/кг:			
гріючої пари, $I''$			
вторинної пари, $I'$			
Теплота конденсації, $r$ , Дж/кг			



## 4.4 МАСООБМІННІ ПРОЦЕСИ

### Задача 4.1

Розрахувати і накреслити барабанну сушарку з реальним процесом сушіння. Основний елемент барабанної сушильної установки – циліндричний барабан, що обертається, з внутрішньою насадкою, яка сприяє переміщенню матеріалу. Сушильний агент (повітря), параметри якого  $l_0, x_0, t_0, \varphi_0$ , вентилятором подається у калорифер, де підігрівається до стану  $l_1, x_1, t_1, \varphi_1$ , а потім надходить у сушильний барабан (рис.1).

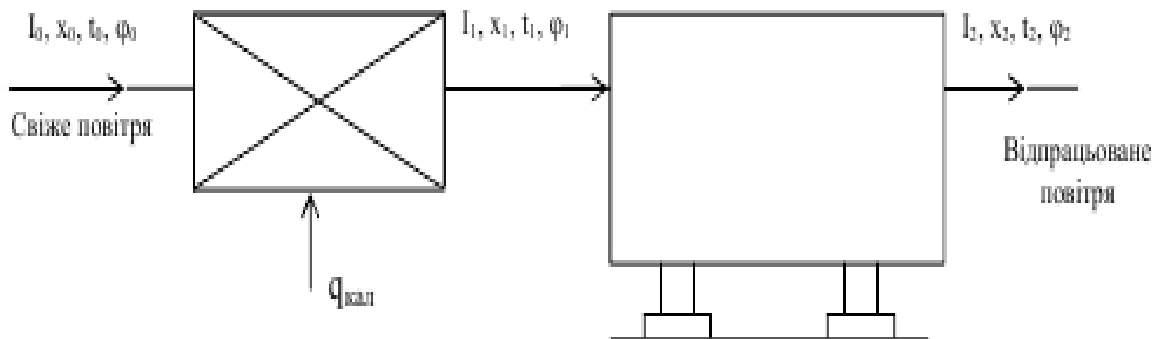


Рис. 1. Схема сушильної установки

Установка працює за принципом проточної повітря і матеріалу під час сушіння цукру-піску і протитечії під час сушіння крохмалю.

Початкові дані: потужність сушарки за висушеним матеріалом -  $G_2, \text{кг/год}$ ; питома теплоємність абсолютного сухого матеріалу -  $C_s, \text{м}$ ; вологість матеріалу, % до загальної маси: початкова -  $w_1$ , кінцева -  $w_2$ ; температура матеріалу, який

### Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

надходить на сушіння -  $\theta_1$ ; температура матеріалу, який виходить з сушильного барабана -  $\theta_2$  (табл. 1).

Параметри повітря:

- температура свіжого повітря, що надходить до калорифера -  $t_0$ ;
- відносна вологість свіжого повітря -  $\varphi_0$ ,
- температура повітря, що надходить до сушильного барабана, -  $t_1$ ;
- температура відпрацьованого повітря, що виходить з сушильного барабана, -  $t_2$ ;
- загальні втрати теплоти в навколишнє середовище –  $Q_{н.с}$ ;
- напруга барабана за вологою –  $A$ .

Під час виконання розрахунку необхідно: накреслити принципову схему сушильної установки і показати продуктивні і теплові потоки та їх параметри; побудувати і описати процес, що протікає в сушильній установці, в  $I$ -діаграмі.

У результаті графоаналітичного розрахунку визначити: кількість видаленої вологи; параметри повітря, що надходить до калорифера  $I_0, x_0$ ; параметри повітря на виході з калорифера -  $I_1, x_1, \varphi_1$ ; на виході з сушильного барабана –  $I_2, x_2, \varphi_2$ ; питому і повну витрати повітря; питому і повну витрату теплоти в калорифері; основні розміри сушильного барабана. Барабанну сушарку розраховують аналітично і графічно за допомогою діаграм вологого повітря.

**Розрахунок потужності барабанної сушарки за вологим матеріалом.**

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Нехтуючи втратами сухої речовини під час сушіння, потужність сушарки завологим матеріалом розраховують за таким рівнянням,

$$\text{кг/год: } G_1 = G_2 \frac{100 - \omega_2}{100 - \omega_1}$$

Розрахунок кількості випареної вологи. Згідно з законом збереження речовини витрата висушеної вологи, кг/год,

$$W = G_1 - G_2$$

Таблиця 1

Початкові дані для розрахунку барабанної сушарки

Цифра шифру	Величина	Варіант									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Цукор-пісок											
Передостання	$G_2$ , кг/год.	9500	11500	12500	6400	8500	7500	14000	15000	18000	19000
	$C_{с.м.}$ , кДж/кг	0,712	0,712	0,712	0,712	0,712	0,712	0,712	0,712	0,712	0,712
	$\omega_1$ , %	1,5	1,4	1,6	1,6	1,5	1,7	1,7	1,5	1,6	1,7
	$\Theta_1$ , °C	50	52	54	54	50	55	55	53	51	49
	$\omega_2$ , %	0,45	0,47	0,50	0,50	0,53	0,45	0,45	0,49	0,50	0,55
	$\Theta_2$ , °C	32	33	34	34	36	38	38	39	40	35
Остання	$t_0$ , °C	18	20	22	22	25	-10	-10	20	-5	25
	$\varphi_0$ , %	60	65	70	70	80	65	65	70	75	80
	$t_1$ , °C	105	110	115	115	125	120	120	115	110	105

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

	t <sub>2</sub> , °C	65	70	75	75	80	70	70	65	80	75
	Q <sub>нс</sub> , кДж	25000	30000	35000	40000	25000	25000	30000	35000	40000	40000
	A, кг/(м <sup>3</sup> ·год)	7	6	7	7	7	7	7	6	7	6

Крохмаль

Передостання	G <sub>2</sub> , кг/год.	250	300	350	400	450	500	550	600	650	300
	S <sub>с.м.</sub> , кДж/кг	1,09	1,04	1,13	1,215	1,25	1,09	1,04	1,13	1,215	1,25
	ω <sub>1</sub> , %	34	35	36	37	38	34	35	36	37	38
	Θ <sub>1</sub> , °C	12	11	10	9	8	12	11	10	9	8
	ω <sub>2</sub> , %	13	14	15	19	21	20	18	16	14	13
	Θ <sub>2</sub> , °C	30	35	28	32	29	30	34	32	28	34

Остання	t <sub>0</sub> , °C	10	15	20	25	-5	10	15	20	-5	25
	φ <sub>0</sub> , %	60	65	70	75	80	80	75	70	65	60
	t <sub>1</sub> , °C	77	85	100	110	85	80	85	90	100	110
	t <sub>2</sub> , °C	32	35	35	40	32	32	35	35	40	32
	Q <sub>нс</sub> , кДж	15000	20000	25000	30000	40000	20000	25000	30000	35000	40000
	A, кг/(м <sup>3</sup> ·год)	6	7	6	7	6	7	6	7	6	7

Для перевірки кількість висушеної вологи визначають також з

таких рівнянь: 
$$W = G_1 \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_2}$$

$$W = G_2 \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_1}$$

### Тепловий розрахунок барабанної сушарки

Відмінність дійсногосушильного процесу, що відбувається в сушарці, від теоретичного визначається величиною Δ, кДж/кг вологи:

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

де  $c_w = 4,19$  кДж/(кг·К) - теплоємність води;

$\theta_1$  - температура матеріалу на входів сушарку;

$q_m$  - питомі витрати теплоти на нагрівання матеріалу, кДж/кгвологи;

$q_{nc}$  - питомі втрати теплоти в навколишнє середовище, кДж/кг вологи.

Питомі витрати теплоти на нагрівання матеріалу в сушарці

$$q_m = \frac{G_2 c_{m2} (u_2 - u_1)}{W}$$

$c_{m2}$  - питома теплоємність абсолютно сухого матеріалу,

$$\text{кДж/(кг·К)}, c_{m2} = \frac{c_2 \omega_2 + c_{с.м.}(100 - \omega_2)}{100},$$

де  $c_{с.м.}$  - питома теплоємність абсолютно сухого матеріалу, кДж/(кг·К);

$\theta_2$  - температура матеріалу на виході з сушарки;

$c_w$  – питома теплоємність води.

Питомі втрати теплоти в навколишнє середовище:

$$q_{н.с} = \frac{Q_{н.с}}{W}.$$

Визначивши питомі втрати теплоти, розраховують поправку  $\Delta$  на дійснисушарку.

**Зображення стану повітря і побудова процесу сушіння на І–х діаграмі**(рис. 2). Робимо ксерокопію І–х діаграми і на ній виконуємо побудову. Зазаданими значеннями початкової температури

### Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

$t_0$  і початкової відносної вологості  $\phi_0$  визначаємо положення точки А, яка характеризує стан свіжого повітря. На перетині лінії сталого вологовмісту  $x_0 = \text{const}$  з ізотермою  $t_1 = \text{const}$  знаходять точку В, яка характеризує стан нагрітого повітря перед сушильною камерою. Через точку А проводять лінії  $I = \text{const}$ ,  $x = \text{const}$  і визначають значення питомої ентальпії  $I_0$  і питомого вологовмісту  $x_0$  свіжого повітря.

Провівши через точку В лінії  $I = \text{const}$  і  $\phi = \text{const}$ , визначають параметри нагрітого в калорифері повітря  $I_1$ ,  $\phi_1$ ,  $x_1 = x_0$ .

Точка С, яка характеризує стан повітря на виході з сушарки при теоретичному процесі сушіння, міститься на перетині ізотерми  $t_2$  та  $I_1 = \text{const}$ . Теоретичний сушильний процес у барабанній сушарці для заданих умов зображується лінією ВС.

Лінія реального сушильного процесу починається в точці В і пройде вище лінії  $I_1 = \text{const}$ , якщо  $\Delta > 0$  або нижче лінії  $I_1 = \text{const}$ , якщо  $\Delta < 0$ .

Через довільну точку е на лінії ВС проводять горизонтальну лінію еF до перетину з лінією  $x_0 = \text{const}$ . Потім паралельно осі ординат проводять лінію еЕ.

Довжина відрізка еЕ

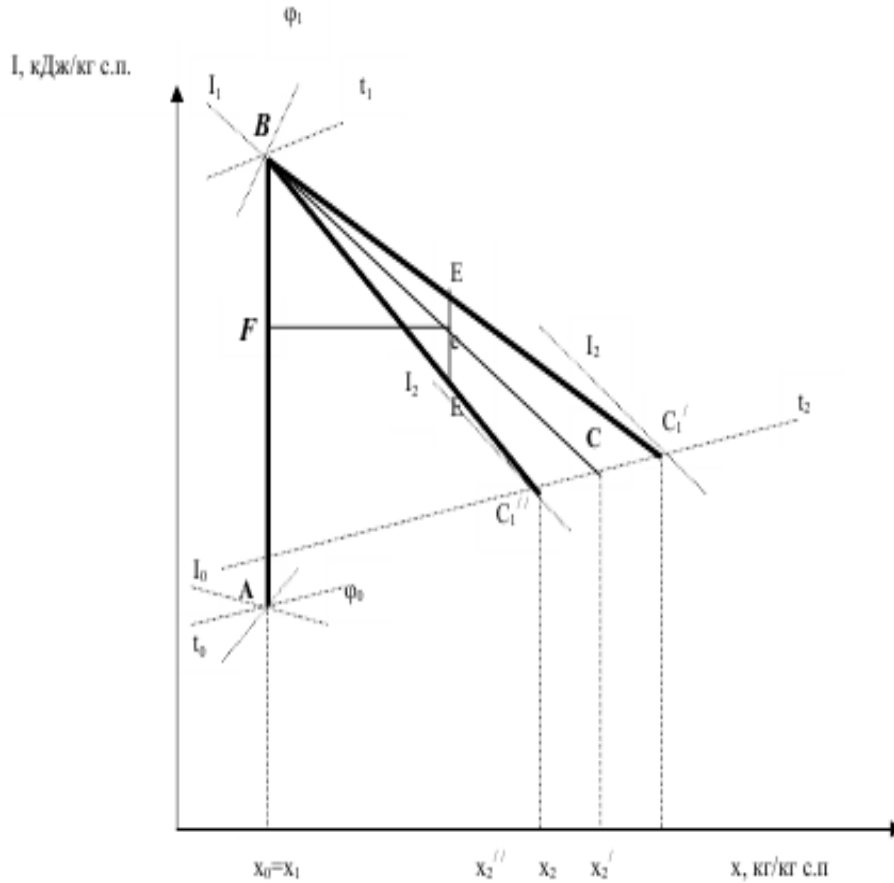


Рис. 2. Побудова реального процесу сушіння.

$$eE = eF \frac{\Delta}{m}$$

де  $eF$  - довжина відрізка, мм;

$$m = \frac{M_1}{M_x}$$

де  $M_1$ ,

$M_x$

відповідно масштаби осі питої ентальпії і осі питої вологості в діаграмі.

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

Якщо  $\Delta > 0$ , відрізок  $EB$  відкладають вгору від точки  $e$ , при  $\Delta < 0$  - вниз. Через точки  $B$  і  $E$  проводять лінію реальної сушарки до перетину з лінією  $t_2 = \text{const}$ .

Отримана точка  $C_1$  (при  $\Delta > 0$ ) характеризує стан повітря на виході з сушильного барабана.

Весь процес, що відбувається в реальній сушарці, зображається ламаною лінією  $ABC_1$ .

При побудові процесу за допомогою діаграми  $I-x$  визначають усі невідомі параметри вологого повітря.

### **Розрахунок витрати повітря в сушарці**

Питома витрата повітря, що подається в сушильний барабан, кг/кг  
вологи,

$$l = \frac{1}{x_2 - x_1}$$

Повна витрата повітря, кг/год,

$$L = lW$$

Оцінка отриманого результату: порядок величини питомої витрати повітря  $\approx 50$  кг повітря/кг висушеної вологи і може змінюватись приблизно у півторарази. Повна витрата повітря за порядком величини у 50 разів перевищує витрату висушеної вологи.

**Розрахунок витрати теплоти в калорифері.** Питома витрата теплоти в калорифері для барабанної сушарки, кДж/кг вологи,

де  $l_1$  і  $l_0$  - питома ентальпія свіжого повітря відповідно до і після калорифера, кДж/кг с.п.

Оцінка отриманого результату. Питома витрата теплоти  $q_{\text{кал}}$ , кДж на 1 кг висушеної вологи, повинна не більше ніж у півтори рази перевищувати теплоту пароутворення води при  $0^\circ\text{C}$ , яка дорівнює

## Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

2500 кДж/кг. Висока витрата теплотина сушіння пояснюється значними витратами теплоти з повітрям, яке виходить із сушарки ще досить теплим. З метою економії теплової енергії наобезвожування харчових продуктів частину вологи перед сушінням видаляють пресуванням або центрифугуванням.

Повна витрата теплоти в калорифері  $Q$ , кДж/год,

### **Визначення основних розмірів сушильного барабана.**

Знаючи напругу барабана по волозі, тобто кількість вологи, що видаляється з матеріалу в 1 м<sup>3</sup> простору сушильного барабана, можна визначити об'єм барабана  $V$ , м<sup>3</sup>:

$$V = \frac{W}{A},$$

де  $A$  - напруга барабана по волозі, кг/(м<sup>3</sup>·год).

Об'єм сушильного барабана  $V$ , м<sup>3</sup>, можна також визначити з

такогорівняння: 
$$V = \frac{\pi D^2}{4} B,$$

де  $D$  і  $B$  - відповідно діаметр і довжина барабана, м.

Діаметр барабана визначають виходячи з витрати сухого повітря  $L$ ,

$$D = 0,0188 \sqrt{\frac{LV_0}{(1-b)\omega}}$$

де  $V_0$  - об'єм вологого повітря, який припадає на 1 кг сухого повітря, м<sup>3</sup>/кг сухого повітря, визначається з табл. Д.11 залежно від температури  $t_2$  і відносної вологості  $\phi_2$  повітря, яке виходить з сушильного барабана;

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

$b$  - коефіцієнтзаповнення барабана, який приймається в межах 0,04...0,06;

$w$  - швидкістьсушильного агента в барабані; при сушінні цукру-піску  $w = 0,5...1$ м/с.

За відомими об'ємом і діаметром барабана довжину барабана визначаютьз рівняння

$$B = \frac{4V}{\pi D^2}$$

Діаметр барабана приймають 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2400, 2800 мм.Відношення довжини барабана до його діаметра має бути в межах  $B/D = 3,5...7$ .

**ДОДАТКИ ДО ВИКОНАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЗАВДАНЬ**

Таблиця Д1

**Густина водних розчинів цукру при температурі 20 °С залежно від концентрації**

Б, % мас.	$\rho_{20}$ кг/м <sup>3</sup>	Б, % мас.	$\rho_{20}$ кг/м <sup>3</sup>	Б, % мас.	$\rho_{20}$ кг/м <sup>3</sup>	Б, % мас.	$\rho_{20}$ кг/м <sup>3</sup>
1	1004	19	1079	37	1163	54	1254
2	1008	20	1083	38	1168	55	1260
3	1012	21	1087	39	1174	56	1266
4	1016	22	1092	40	1179	57	1271
5	1020	23	1097	41	1184	58	1277
6	1024	24	1101	42	1189	59	1283
7	1028	25	1105	43	1194	60	1289
8	1034	26	1110	44	1199	61	1295
9	1036	27	1115	45	1205	62	1301
10	1040	28	1120	46	1210	63	1307
11	1044	29	1124	47	1215	64	1313
12	1048	30	1129	48	1221	65	1319
13	1053	31	1134	49	1226	66	1325
14	1057	32	1139	50	1232	67	1331
15	1061	33	1144	51	1237	68	1337
16	1065	34	1149	52	1243	69	1343
17	1070	35	1153	53	1249	70	1350
18	1074	36	1158				

Густина цукру при температурі визначається за формулою:

$$\rho = \rho_{20} - (0,4 + 0,0025Б) \cdot (t_c - 20), \text{ кг/м}^3,$$

де Б – масова концентрація розчину, %.



**Теплофізичні характеристики цукрових розчинів**

Концентрація, мас. %	t, °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)	c, Дж/(кг·К)	$\mu \cdot 10^3$ , Па·с	Pr
1	2	3	4	5	6	7
20	50	1068	0,5706	3760	0,9681	6,38
	60	1063	0,5809	3775	0,8084	5,26
	70	1059	0,5893	3790	0,6798	4,37
	80	1054	0,5965	3805	0,5912	3,76
30	50	1113	0,5368	3546	1,427	9,17
	60	1108	0,5458	3568	1,1198	7,84
	70	1103	0,5536	3591	0,9996	6,49
	80	1098	0,5604	3614	0,8509	5,48
40	50	1162	0,5020	3333	2,4866	16,52
	60	1157	0,5100	3363	1,9680	12,97
	70	1152	0,5180	3393	1,6001	10,48
	80	1146	0,5340	3423	1,3213	8,62
50	50	1215	0,4630	3119	5,0701	33,82
	60	1210	0,4750	3157	3,8090	25,30
	70	1205	0,482	3195	2,9426	19,47
	80	1119	0,488	3232	2,5799	15,50
65	60	1321	0,426	2847	19,9999	12,00
	70	1316	0,433	2893	13,7522	74,30
80	80	1310	0,438	2943	9,8774	51,80

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

*Теплопровідність цукрових розчинів.*

Теплопровідність цукрових розчинів Вт/(м·К), визначається з такого рівняння:

$$\lambda = K\lambda_v(1 - 556 \cdot 10^{-5} \cdot B),$$

де  $\lambda_v$ - теплопровідність води при заданій температурі, Вт/(м · К);

Б - концентрація розчину, мас. %;

К - коефіцієнт (визначається за табл. Д.3).

*Таблиця Д3*

Концентрація цукру	10	20	30	40	50	60	70
К	0,950	0,890	0,834	0,777	0,720	0,666	0,605

*Теплоємність цукрових розчинів*

Теплоємність розчинів цукру, кДж/(кг·К),

$$C = 4190 - (2520 - 7,5 t_c) \cdot B/100,$$

де  $t_c$  - температура розчину, °С;

Б - концентрація цукру, мас. %.

*Таблиця Д4*

***В'язкість водяних розчинів цукру концентрації Б, мас. %***

Б	В'язкість $\mu \cdot 10^3$ , Па · с, при температурі t, °С									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
10	1,90	1,46	1,12	0,86	0,70	0,61	0,49	0,44	0,38	0,34
12	2,07	1,61	1,17	0,91	0,74	0,63	0,53	0,46	0,41	0,38
14	2,24	1,70	1,21	0,97	0,78	0,68	0,56	0,49	0,46	0,42
16	2,46	1,74	1,24	1,02	0,84	0,72	0,62	0,52	0,50	0,45
18	2,59	1,83	1,37	1,11	0,91	0,77	0,65	0,55	0,52	0,46

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

*Продовження табл. Д4*

20	2,81	2,09	1,51	1,21	0,98	0,82	0,69	0,59	0,55	0,47
25	3,51	2,67	1,95	1,62	1,39	0,95	0,84	0,68	0,59	0,49
30	5,13	3,46	2,44	1,90	1,52	1,21	1,02	0,81	0,71	0,62
35	6,61	4,70	3,48	2,59	1,94	1,62	1,33	1,02	0,85	0,74
40	9,64	6,61	4,47	3,32	2,56	2,02	1,62	1,32	1,11	0,96
45	16,40	10,09	6,87	4,83	3,51	2,61	2,15	1,75	1,48	1,28
50	2,69	16,65	10,30	7,20	5,02	3,91	3,14	2,38	1,92	1,56
55	49,5	30,14	18,50	13,17	7,95	5,71	4,32	3,12	2,63	2,11
60	121,07	59,87	34,15	21,4	14,20	9,84	7,17	5,32	4,73	3,18
62	176,15	88,35	49,53	30,34	19,63	13,20	9,34	6,91	5,21	4,11
64	271,24	138,09	71,51	42,10	26,51	17,52	12,15	8,93	6,43	4,93
65	345,01	174,11	85,40	47,60	29,1	19,81	14,40	8,92	6,81	5,14
68	694,21	301,29	139,11	77,08	41,31	26,54	17,62	12,33	8,84	6,68

**Густина водно-спиртових розчинів  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>**

Концентрація спирту Б, мас.%	Температура t, °C					
	30	40	50	60	70	80
10	979	975	971	964	957	951
20	964	959	953	947	939	932
30	948	941	935	927	919	910
40	928	920	912	903	894	885
50	906	898	889	880	871	862
60	883	874	865	856	846	837
70	859	850	841	831	822	812
80	836	826	817	807	797	787

**Теплопровідність водно-спиртових розчинів  $\lambda$ , Вт/(м·К)**

Концентрація спирту Б, мас.%	Температура t, °C					
	30	40	50	60	70	80
10	0,572	0,580	0,608	0,619	0,619	0,630
20	0,525	0,536	0,550	0,560	0,571	0,585
30	0,478	0,490	0,502	0,514	0,525	0,536
40	0,420	0,444	0,455	0,466	0,489	0,490
50	0,374	0,386	0,397	0,409	0,420	0,430
60	0,327	0,338	0,361	0,374	0,386	0,386
70	0,280	0,304	0,314	0,327	0,339	0,350
80	0,257	0,269	0,280	0,292	0,304	0,314

**Теплоємність водно-спиртових розчинів  $c$ , кДж/ (кг·К)**

Концентрація спирту Б, мас. %	Температура $t$ , °С							
	30	40	50	60	70	80	90	100
10	4,27	4,27	4,31	4,31	4,31	4,31	4,31	4,35
20	4,31	4,31	4,31	4,31	4,31	4,31	4,31	4,31
30	4,27	4,27	4,40	4,44	4,48	4,52	4,56	4,60
40	4,10	4,10	4,19	4,27	4,35	4,40	4,44	4,48
50	3,85	3,89	4,02	4,10	4,23	4,31	4,40	4,48
60	3,60	3,64	3,85	3,93	4,10	4,23	4,35	4,48
70	3,35	3,39	3,68	3,77	3,93	4,10	4,27	4,44
80	3,14	3,22	3,48	3,64	3,85	4,06	4,27	4,48

**В'язкість водно-спиртових розчинів,  $\mu \cdot 10^6$ , Па·с**

Концентрація спирту Б, мас. %	Температура $t$ , °С				
	30	40	50	60	70
10	1153	896	725	602	509
20	1539	1144	896	728	606
30	1849	1038	1038	826	677
40	1944	1455	1116	887	724
50	2001	1475	1136	904	739
60	1906	1426	1100	887	727
70	1744	1328	1044	844	696
80	1519	1181	950	778	648

## Теплофізичні властивості сухої насиченої водяної пари

Тиск $P$ , МПа	Температура $T$ , °C	Густина, $\rho$ м <sup>3</sup> /кг	Ентальпія $l$ , кДж/кг	Теплота пароутворення (випарювання), кДж/кг
1	2	3	4	5
0,0010	7	0,00770	2513	2484
0,0015	13	0,001138	2525	2470
0,0020	18	0,01493	2533	2459
0,0025	21	0,01843	2539	2451
0,0030	24	0,02190	2545	2444
0,0035	27	0,02533	2550	2438
0,0040	29	0,2873	2554	2433
0,0045	31	0,03211	2557	2427
0,0050	33	0,03547	2561	2423
0,0060	36	0,04212	2567	2415
0,0070	39	0,04871	2572	2409
0,0080	42	0,05525	2576	2402
0,0090	44	0,06172	2580	2397
0,010	46	0,06812	2584	2392
0,011	48	0,07462	2588	2388
0,012	49	0,08097	2591	2384
0,013	51	0,08726	2594	2380
0,014	53	0,09354	2596	2376
0,015	54	0,09980	2599	2373
0,020	60	0,1308	2609	2358
0,025	65	0,1612	2618	2346
0,030	69	0,1913	2625	2336
0,040	76	0,2504	2636	2318

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

0,050	81	0,3087	2645	2304
0,060	86	0,3661	2653	2293
0,070	90	0,4230	2660	2283
0,080	94	0,4792	2665	2273
0,090	97	0,5350	2670	2265
0,100	100	0,5903	2675	2258
0,11	102	0,6453	2679	2250
0,12	105	0,6999	2683	2244
0,13	107	0,7545	2687	2238
0,14	109	0,8088	2690	2232
0,15	111	0,8627	2693	2226
0,16	113	0,9164	2696	2221
0,17	115	0,9699	2699	2216
0,18	117	1,023	2702	2211
0,19	119	1,076	2704	2206
0,20	120	1,129	2707	2202
0,21	122	1,182	2709	2198
0,22	123	1,535	2711	2193
0,23	125	1,287	2713	2189
0,24	126	1,340	2715	2185
0,25	127	1,392	2717	2182
0,26	129	1,444	2719	2178
0,27	130	1,496	2712	2175
0,28	131	1,548	2722	2171
0,29	132	1,599	2724	2167
0,30	134	1,651	2725	2164
0,31	135	1,703	2727	2161
0,32	136	1,754	2728	2157
0,33	137	1,805	2730	2154
0,34	138	1,857	2731	2151

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

0,35	139	1,908	2732	2148
0,36	140	1,959	2734	2145
0,37	141	2,010	2735	2142
0,38	142	2,061	2736	2139
0,39	143	2,112	2737	2136
0,40	144	2,163	2738	2133

Таблиця Д10

**Фізичні властивості води на лінії насичення**

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Густина $\rho$ , кг/м	Теплоємність $C, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	Теплопровідність $\lambda$ , Вт/(м·К)	Динамічна в'язкість, $\mu\cdot 10^6$ , Па·с	Критерій Прандтля, $Pr$
10	1000	4,19	0,575	1300	9,52
20	998	4,19	0,599	1000	7,02
30	996	4,18	0,618	804	5,42
40	992	4,18	0,634	657	4,31
50	988	4,18	0,648	549	3,54
60	983	4,18	0,659	470	2,98
70	978	4,19	0,668	406	2,55
80	972	4,19	0,675	355	2,21
90	965	4,19	0,680	315	1,95
100	958	4,23	0,683	282	1,75
110	951	4,23	0,685	256	1,58
120	943	4,25	0,686	231	1,43
130	935	4,27	0,686	212	1,32

Об'єм вологого повітря  $V$ , м<sup>3</sup>/кг-с-п при барометричному тиску $B = 745$  мм рт.ст

Температура, °C	Відносна вологість повітря $\varphi$ , %					
	30	40	50	60	70	80
30	0,8873	0,8912	0,8951	0,8990	0,903	0,9070
35	0,9058	0,9111	0,9164	0,9217	0,9272	0,9327
40	0,9255	0,9326	0,9398	0,9471	0,9545	0,9620
45	0,9468	0,9563	0,9660	0,9759	0,9860	0,9963
50	0,9700	0,9827	0,9957	0,0090	1,0090	1,0368
55	0,9957	1,0125	1,0300	1,0480	1,0667	1,0860
60	1,0245	1,0469	1,0702	1,0946	1,1201	1,1468
65	1,0573	1,0870	1,1170	1,1514	1,1866	1,2239
70	1,0951	1,1345	1,1754	1,2222	1,2713	1,3244
75	1,1349	1,1919	1,2494	1,3126	1,3824	1,4600
80	1,1920	1,2625	1,3417	1,4313	1,5336	1,6518
85	1,2558	1,3515	1,4628	1,5398	1,7502	1,9401
90	1,3342	1,4662	1,6268	1,8264	2,0812	2,4176
95	1,4332	1,6197	1,8612	2,1863	2,6476	3,3529
100	1,5473	1,8078	2,1726	2,7198	3,6310	5,4554

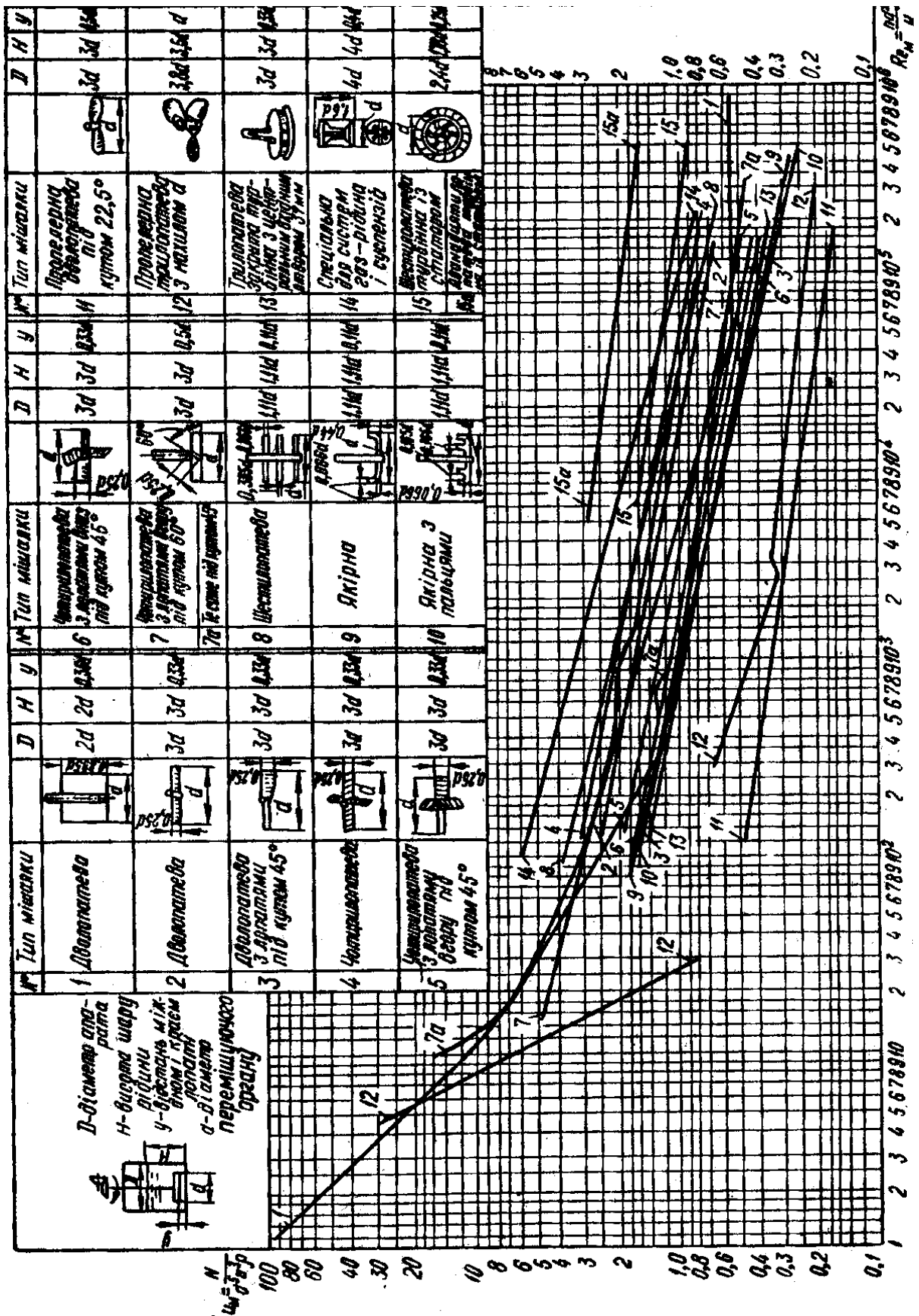


Рис.1 Графік для визначення витрат енергії на перемішування

**СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Алексеев, Г.В. Копьютерные технологии при проектировании и эксплуатации технологического оборудования /Г.В.Алексеев и др. – СПб.: ГИОРД, 2006. – 295 с.
2. Бриденко, И.И. Методическое и практическое руководство по разработке интерактивных приложений и виртуальных практикумов в среде флеш: Ч.3: Основы проектирования в среде FlashMX. – СПб.: СПбГУНИПТ, 2006. – 62 с.
3. Гребенюк, С.М. Расчеты по процессам и аппаратам пищевых производств / С.М. Гребенюк и др. – М.: Агропромиздат, 1987. – 304 с.
4. Грачев, Ю.П. Математические методы планирования экспериментов : учебное пособие для вузов. – М.: ДеЛи, 2005. – 296 с.
5. Гурский, Д. ActionScript 2.0: программирование во FlashMX 2004. Для профессионалов. – СПб.: Питер, 2004. – 1088 с.
6. Кавецкий, Г.Д. Процессы и аппараты для пищевых производств / Г.Д.Кавецкий, А.В.Королев. – М.: Агропромиздат, 1991. – 432 с.
7. Кафаров, В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. – М.: Химия, 1976. – 463 с.
8. Лонцин, М. Основные процессы пищевых производств /М. Лонцин, Р.Мерсон. – М.: Легкая пром-сть, 1983. – 384 с.
9. Основные процессы и аппараты пищевых производств /Под ред. Ю.И.Дытнерского. – М.: Химия, 1991. – 286 с.
10. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу «Процессы и аппараты химической технологии». – Л.: Химия, 1987. – 575 с.

Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум

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

12. Проектирование процессов и аппаратов пищевых производств /Под ред. В.Н. Стабникова. – К.: Вища школа, 1982. – 199 с.

13. Процессы и аппараты пищевых производств /Под ред. А.Н.Острикова. – СПб.: ГИОРД, 2007. – Т. 1, 2. – 700 с.

14. Процессы и аппараты пищевых производств : метод.указания к лабораторным работам. – СПб.: СПбГУНИПТ, 2008. – 18 с.

15. Стабников, В.Н. Процессы и аппараты пищевых производств / В.Н.Стабников. – М.: Аропромиздат, 1988. – 509 с.

16. Стахеев, И.В. Пособие по курсовому проектированию процессов и аппаратов пищевых производств /И.В. Стахеев. – Минск: Вища школа, 1975. – 287 с.

17. Valentas, K.J. Food Engineering Praktice /K.J.Valentas et al. – New York: CRC Pess, 2001. – 164 с.

## ЗМІСТ

Передмова	3
Вступ	6
1. Основні процеси харчових технологій	8
1.1. Класифікація основних процесів харчових виробництв	8
1.2. Механічні процеси	14
1.2.1. Подрібнення твердих матеріалів	14
1.2.2. Визначення дисперсності сипких матеріалів	17
1.3. Гідромеханічні процеси	18
1.3.1. Перемішування в рідких середовищах	18
1.3.2. Псевдозрідження	20
1.4. Теплообмінні процеси	27
1.4.1. Нагрівання і охолодження рідких систем	27
1.4.2. Рекуперація теплоти	29
1.4.3. Випарювання	30
1.5. Масообмінні процеси	32
1.5.1. Конвективне сушіння	33
2. Методичні вказівки до виконання віртуальних лабораторних робіт	40
2.1. Структурна будова віртуальної лабораторної роботи	40
2.2. Механічні процеси.	44
<i>Лабораторна робота №1. Вивчення процесу подрібнення в</i> <i>молотковій дробарці</i>	44
2.3. Гідромеханічні процеси	54
<i>Лабораторна робота №2. Визначення витрати потужності при</i> <i>перемішуванні</i>	54
<i>Лабораторна робота №3. Дослідження гідродинаміки псевдо-</i> <i>зрідженого шару</i>	67
2.4. Теплообмінні процеси	76
<i>Лабораторна робота №4. Вивчення процесів нагрівання і</i>	76

<u>Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум</u>	
рекуперації теплоти у трубчастій теплообмінній установці	
<i>Лабораторна робота №5. Дослідження роботи двокорпусної</i>	91
випарної установки	
2.5. Масообмінні процеси	104
<i>Лабораторна робота №6. Дослідження роботи розпилувальної</i>	104
сушильної установки	
2.6. Гідравлічні процеси	119
<i>Лабораторна робота №7. Визначення гідростатичного тиску</i>	119
<i>Лабораторна робота №8. Сила тиску рідини на плоску поверхню</i>	127
<i>Лабораторна робота №9. Побудова напірної і п'єзометричної</i>	135
ліній для трубопроводу опору	
<i>Лабораторна робота №10. Визначення режиму руху рідини</i>	143
<i>Лабораторна робота №11. Дослідження процесу витікання через</i>	153
малий круглий отвір і зовнішню циліндричну насадку	
<i>Лабораторна робота №12. Визначення коефіцієнтів витрати</i>	160
дросельного приладу(діафрагми) і водоміра Вентурі	
Додатки до виконання лабораторних робіт	174
3. Вказівки до виконання індивідуальних завдань	174
3.1 Гідравлічні процеси	177
3.2 Гідромеханічні процеси	187
3.3 Теплові процеси	195
3.4 Масообмінні процеси	208
Додатки до виконання самостійних робіт	219
Список рекомендованої літератури	230

**НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ**

**Сухенко Юрій Григорович**

доктор технічних наук, професор

**Жеплінська Марія Михайлівна**

кандидат технічних наук, доцент

**Муштрук Михайло Михайлович**

кандидат технічних наук, доцент

**Процеси і апарати харчових виробництв**

**Лабораторний практикум**