

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до самостійної роботи та виконання розрахунково-графічної роботи
з навчальної дисципліни

«ГІДРАВЛІКА НАФТОГАЗОВИХ СИСТЕМ»

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
зі спеціальності 185 – Нафтогазова інженерія та технології,
освітня програма «Нафтогазова інженерія та технології»)*

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2026

Методичні рекомендації до самостійної роботи та виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни «Гідравліка нафтогазових систем» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 185 – Нафтогазова інженерія та технології, освітня програма «Нафтогазова інженерія та технології») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : О. В. Ромашко, О. В. Бобловський. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026. – 38 с.

Укладачі: канд. техн. наук, доц. О. В. Ромашко
асист. О. В. Бобловський

Рецензент

Б. С. Ільченко, доктор технічних наук, професор кафедри нафтогазової інженерії і технологій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою нафтогазової інженерії і технологій, протокол № 1 від 30 серпня 2024 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ.....	5
1.1 Визначення сили тиску рідини на плоскі стінки.....	5
1.2 Моделювання потоків за критеріями гідродинамічної подібності.....	10
1.3 Розрахунок режиму руху газорідинної суміші в трубопроводі.....	18
2 МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ.....	24
2.1 Мета розрахунково-графічної роботи.....	24
2.2 Методика гідравлічного розрахунку кільцевих трубопроводів.....	25
2.3 Гідравлічний розрахунок кільцевих газових мереж низького тиску....	29
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	34
ДОДАТКИ.....	35

ВСТУП

У практичній діяльності інженерам нафтогазової галузі часто доводиться розв'язувати задачі, що пов'язані процесами руху та рівноваги рідин. Уміння використовувати закони гідравліки для розв'язку практичних питань може бути досягнуте лише шляхом оволодіння навичками проведення розрахунків гідравлічних систем.

Гідравлічні системи є однією з основних складових структурних елементів більшості механізмів і машин, що реалізують технологічні процеси видобування та транспортування нафти і газу. Ефективність експлуатації об'єктів нафтогазового комплексу визначається значною кількістю факторів, які ускладнюють прогнозування показників робочого процесу бурового, нафтогазопромислового та нафтогазотранспортного обладнання. У цих умовах суттєво зростають вимоги до сучасних методів аналітичного визначення гідродинамічних характеристик гідравлічних систем.

Метою завдань до самостійної роботи є закріплення знань із курсу лекцій дисципліни «Гідравліка нафтогазових систем». Виконуючи завдання, студенти набувають досвід розрахунків процесів, які відбуваються в технічних гідравлічних системах, використанням законів руху та рівноваги рідин, здобувають навички проєктування і самостійної роботи з технічною літературою.

Студент вивчає матеріал курсу шляхом засвоєння лекцій, виконання завдань з практичних і лабораторних занять, проте частину матеріалу вивчають самостійно. Курс рекомендується вивчати за розділами, що наводяться нижче. Після вивчення матеріалу розділу необхідно перевірити рівень засвоєння за контрольними запитаннями, що наведені в кінці кожного розділу. Під час вивчення матеріалу розділів варто основну увагу зосередити на фізичній суті процесів, осмислити основні поняття та означення і лише тоді розпочинати процес виведення та аналізу формул.

Під час виконання завдань потрібно дотримуватись таких вимог та рекомендацій:

1. Завдання виконується згідно з номером варіанта, який визначено викладачем.
2. Обов'язково потрібно виписати умову задачі.
3. Користуватись тільки системою одиниць СІ.
4. Розв'язання задачі супроводжувати короткими поясненнями (яка величина визначається; за якою формулою; звідки взяті значення величини, які входять в формулу і т. д.).
5. Поряд з величиною числового значення обов'язково ставиться одиниця виміру.
6. Під час визначення тих чи інших явищ та розгляді математичних формул насамперед потрібно звернути увагу на їхній фізичний та технічний зміст.

1 МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

1.1 Визначення сили тиску рідини на плоскі стінки

Рекомендовані джерела літератури: [1] с. 56–60; [2] с. 48–51; [8] с. 26–29.

Стислі теоретичні відомості

Питання про визначення сили тиску рідини на ту чи іншу поверхню (стінку, заглушку, мембрану тощо) має велике практичне значення. Водночас потрібно розрізняти такі випадки:

- 1) рідина «невагома», її маса не має істотного впливу на величину тиску;
- 2) рідина «важка», сила тиску створюється завдяки вазі рідини.

Рідину можна розглядати як невагому в закритих посудинах, що знаходяться під значним внутрішнім тиском (наприклад, у трубах, котлах). Важкою рідину вважають насамперед у відкритих резервуарах, заповнених краплинною рідиною, а також у різних гідротехнічних спорудах. Звичайно, нас цікавить надлишкова сила тиску (порівняно з силою атмосферного тиску), тому будемо виходити не з абсолютного, а з надлишкового тиску.

Невагома рідина. У цьому випадку тиск в усіх точках закритої посудини, заповненої краплинною рідиною або газом, можна вважати однаковим. Отже, сила тиску на плоску стінку такої посудини дорівнюватиме добутку цієї площі S на надлишковий тиск у посудині $p_{\text{надл}}$, тобто

$$F = p_{\text{надл}} \cdot S. \quad (1.1.1)$$

Важка рідина. Сила надлишкового тиску тут виникає внаслідок ваги самої рідини. Якщо на плоску стінку AB (рис. 1.1.1), нахилену під кутом до горизонту, з однієї сторони діє рідина, а з другої – атмосферний тиск, то величина рівнодіючої сил тиску дорівнює:

$$F = (p_c - p_{\text{атм}})S = p_n \cdot S = (p_0 + \rho g h_c)S, \quad (1.1.2)$$

де p_c – абсолютний тиск в центрі тяжіння змоченої частини стінки; $p_{\text{атм}}$ – атмосферний тиск; S – площа змоченої поверхні; p_n – надлишковий тиск у центрі тяжіння плоскої стінки; p_0 – надлишковий тиск на вільній поверхні рідини; h_c – глибина занурення центра тяжіння змоченої поверхні.

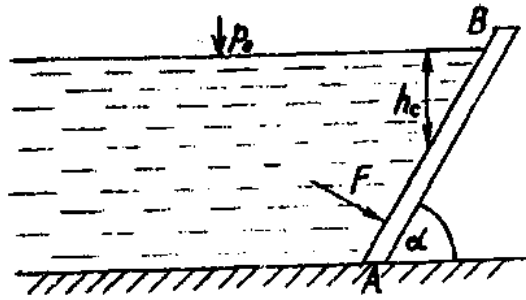


Рисунок 1.1.1 – До визначення сили тиску рідини на плоскі стінки

У випадку відкритої посудини надлишковий тиск на вільній поверхні дорівнює нулю і сила тиску:

$$F = \rho g h_c \cdot S, \quad (1.1.3)$$

Таким чином, сила тиску важкої рідини на плоску стінку дорівнює добутку площі змоченої поверхні на надлишковий тиск в її центрі тяжіння.

Якщо на вільну поверхню рідини діє вакуум, то сила тиску дорівнює:

$$F = (-p_v + \rho g h_c) S. \quad (1.1.4)$$

Крім величини самої сили тиску, необхідно знати ще точку її прикладення (рівнодіючу елементарних сил) – центр тиску. Точка перетину лінії дії сили F з площиною стінки називається *центром тиску*. Положення центра тиску відносно п'єзометричної площини визначається за допомогою такого виразу:

$$y_d = y_c + \frac{I_c}{S y_c}, \quad (1.1.5)$$

де y_c – відстань по стінці від п'єзометричної площини до центра тяжіння змоченої поверхні; I_c – момент інерції стінки відносно горизонтальної осі, яка проходить через центр тяжіння; S – площа змоченої поверхні стінки.

Можливі три варіанти положення центра тиску відносно центра тяжіння:

- при $h_c > 0$ центр тиску лежить нижче центра тяжіння. Тоді сила тиску діє зі сторони рідини;
- при $h_c < 0$ центр тиску лежить вище центра тяжіння, а сила діє зі сторони незмоченої поверхні стінки;
- при $h_c = 0$, $F = 0$ і поняття центра тиску втрачає зміст.

Рівняння надлишкового тиску $F = \rho g h$ є рівнянням прямої лінії, тому епюра розподілу тиску на стінку буде мати вигляд трикутника (рис. 1.1.2, а). В закритій посудині з надлишковим тиском на вільній поверхні $p_0 = p_{абс} - p_{атм}$

тиск у різних точках визначається з основного рівняння гідростатики $p = p_0 + \rho gh$. Епюра розподілу тиску матиме вигляд трапеції (рис. 1.1.2, б).

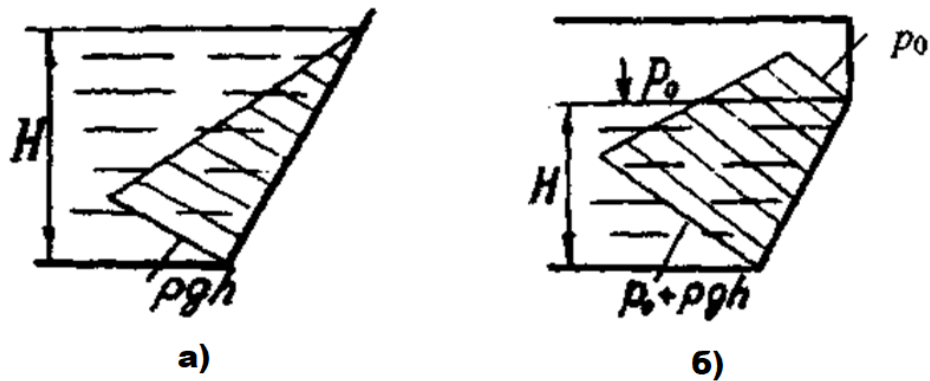


Рисунок 1.1.2 – Епюри розподілу тиску

Для горизонтальної зануреної стінки (наприклад, дно резервуара) $h = \text{const}$, тоді сила тиску визначається за виразом:

$$F = (p_0 + \rho gh)S. \quad (1.1.6)$$

Звідси виходить, що сила тиску на дно ємності ($S = \text{const}$) не залежить від форми її бічних стінок (так званий *гідростатичний парадокс*) (рис. 1.1.3). Парадокс полягає в тому, що вага рідини, яка міститься в посудинах, буде різною, а сила тиску на дно однакова у всіх трьох посудинах.

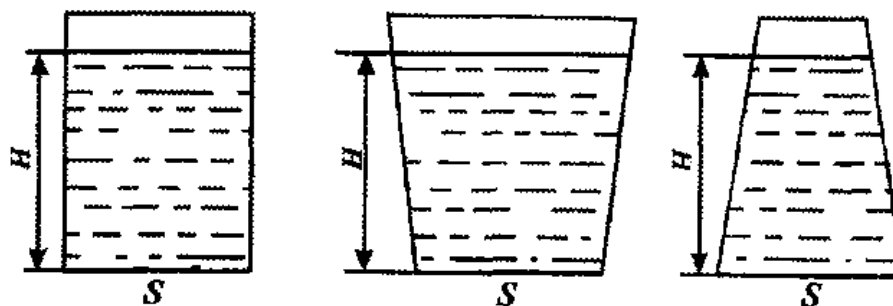
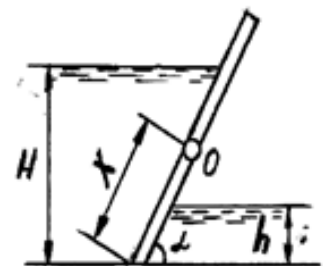


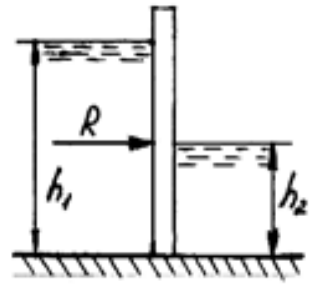
Рисунок 1.1.3 – Гідростатичний парадокс

Завдання до самостійної роботи

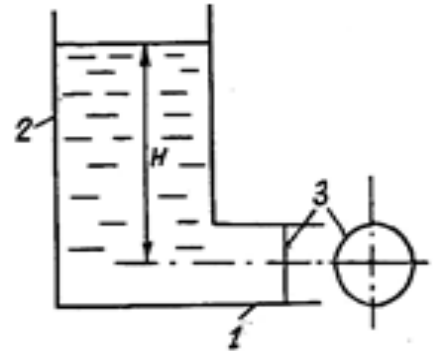
Задача 1.1.1. Плоска похила стінка може обертатись навколо осі O . Рівень рідини праворуч стінки $h = 0,5$ м, кут нахилу стінки $\alpha = 45^\circ$. Відстань від осі обертання до низу стінки $x = 1,35$ м. Визначити глибину H , за якої буде виникати автоматичне відкриття стінки. Вагою стінки і тертям при її обертанні нехтувати.



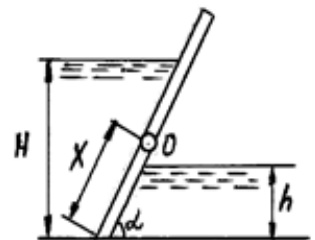
Задача 1.1.2. Проміжна вертикальна стінка ділить резервуар на два відсіки, рівень рідини в яких становить відповідно h_1 і h_2 . Рівнодійна сил тиску рідини R на вертикальну стінку розміщена на рівні вільної поверхні в другому резервуарі. Визначити співвідношення глибин h_1 і h_2 у відсіках резервуара, заповнених однаковою рідиною.



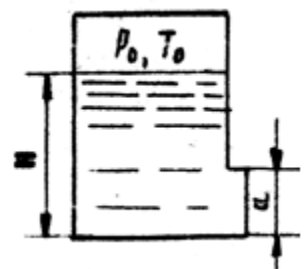
Задача 1.1.3. Труба 1 круглого перерізу під'єднана до заповненого рідиною резервуара 2. У вихідному перерізі труби 1 розміщений люк 3. Визначити, як розмістити горизонтальну в площині люка вісь, щоб рідина не могла самовільно його відкрити. Що буде з положенням осі люка, якщо в резервуарі над поверхнею рідини створювати вакуум, який може змінюватись в межах $0 \leq |P_v| \leq 2\rho gH$?



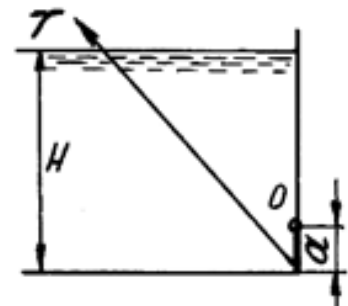
Задача 1.1.4. Плоска похила стінка може обертатись навколо осі O . Визначити положення шарніра (відстань X), за якого підйом верхнього рівня води вище $H = 2,0$ м викликав би автоматичне перевертання стінки. Рівень води праворуч стінки $h = 0,4$ м; кут нахилу стінки $\alpha = 60^\circ$.



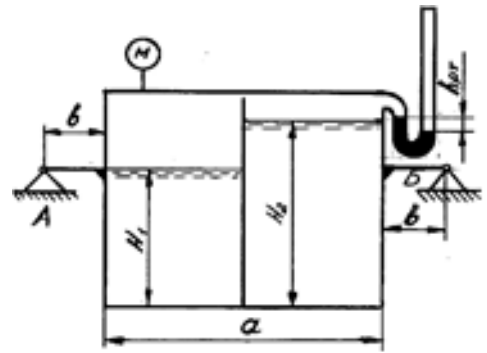
Задача 1.1.5. Резервуар за температури $T_0 = 283$ К заповнений водою до рівня H і герметично закритий. Визначити силу дії на квадратний люк з стороною « a » та місце її прикладання. Як зміниться величина сили і положення точки її прикладання після зниження та зростання температури? Розширенням рідини нехтувати. Розв'язок задачі обґрунтувати графічно.



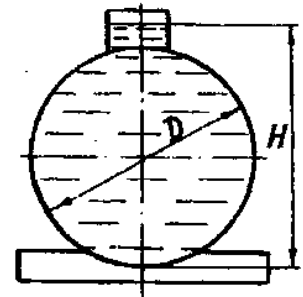
Задача 1.1.6. У нижній частині резервуара розміщений отвір, закритий плоскою прямокутною кришкою, яка шарнірно закріплена в точці O . Визначити, яке зусилля T необхідно прикласти до троса для відкриття кришки для таких умов: глибина занурення точки прикладання зусилля T , $H = 2$ м, висота кришки $a = 0,5$ м, ширина кришки $b = 0,7$ м, кут між напрямом троса і вільною поверхнею $\alpha = 45^\circ$. У резервуарі знаходиться нафта густиною $\rho = 900$ кг/м³.



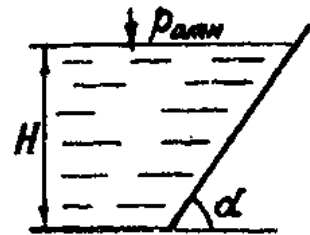
Задача 1.1.7. Кубічний бак поділений на дві однакові частини внутрішньою стінкою. Обидві частини посудини заповнені водою до рівня $H_1 = 0,7$ м та $H_2 = 1$ м. Визначити реакції опор A і B та силу, що діє на дно посудини для таких умов: покази манометра M : $P = 0$ кПа; $h_{рт} = 73,6$ мм; $\rho_{рт} = 13\,600$ кг/м³; $a = 1,2$ м; $b = 10$ см. Вагою посудини та вимірних приладів нехтуємо.



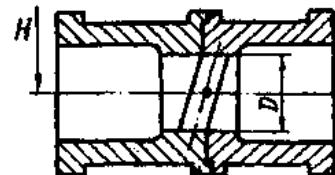
Задача 1.1.8. Визначити силу тиску на торцеву плоску стінку горизонтальної циліндричної цистерни діаметром $D = 2,2$ м, якщо рівень бензину ($\rho = 720$ кг/м³) в цистерні знаходиться на віддалі $H = 2,4$ м від дна. Цистерна герметично закрита, і надлишковий тиск пари бензину на вільну поверхню складає $h = 367$ мм рт. ст.



Задача 1.1.10. Визначити силу тиску і точку її прикладання на плоску прямокутну стінку, ширина якої $b = 1,5$ м. Стінка нахилена під кутом $\alpha = 30^\circ$ до горизонту. Стінка знаходиться на глибині $H = 1,2$ м у відкритій посудині.



Задача 1.1.11. На трубопроводі, який підводить воду до гідротурбіни, встановлений поворотний дросельний клапан діаметром $D = 1,5$ м, який перебуває під напором $H = 15$ м.



Контрольні запитання

1. Як визначається сила тиску на плоску стінку?
2. Що таке центр тиску?
3. Чи може рівно дійна сил тиску діяти із зовнішньої сторони твердої поверхні, де нема рідини?
4. Чи може центр тиску знаходитися вище центра тяжіння змоченої частини плоскої поверхні?
5. Як побудувати епюру розподілу тиску, якщо на вільній поверхні вакуум?
6. Що буде з силою тиску, якщо підігріти рідину?

7. Як розташована лінія дії сили надлишкового гідростатичного тиску, що діє на плоску фігуру будь-якої форми?
8. Як визначити точку прикладання сили тиску графічним способом?
9. Як визначити силу тиску на плоску стінку графоаналітичним методом?
10. Чи впливає надлишковий тиск над вільною поверхнею на силу тиску на плоску стінку?
11. Чи може центр тиску співпадати з центром тяжіння змоченої твердої поверхні?
12. Що буде з силою тиску на плоску стінку невеликої посудини, якщо її закрити і над вільною поверхнею рідини в ньому створювати постійно зростаючий вакуум?
13. Чи проходить лінія дії сили надлишкового тиску, що діє на плоску фігуру, через центр тяжіння?
14. Чи залежить сила тиску від глибини занурення фігури?

1.2 Моделювання потоків за критеріями гідродинамічної подібності

Рекомендовані джерела літератури: [1] с. 288–299; [2] с. 130–135; [8] с. 251–273.

Стислі теоретичні відомості

Експериментальне моделювання є фундаментальним засобом під час проєктування й аналізу механізмів і пристроїв, пов'язаних з рідиною та газом. На жаль, зважаючи на розміри багатьох реальних об'єктів і систем, проводити досліди на повномасштабних моделях є достатньо витратною дією, що приводить, наприклад, до моделювання із застосуванням аеродинамічної труби або на зменшених моделях природних і побудованих об'єктів. Тому виникає питання, наскільки вірогідними для розуміння процесів, що відбуваються на реальних об'єктах, є результати, отримані на моделях у зменшеному масштабі. Моделювання поля потоку, течії, яке дає розподіл швидкостей і тиску в потоці рідини або газу, проводиться за правилами гідродинамічної подібності.

Гідродинамічна подібність – це подібність потоків нестисливої рідини, яка містить геометричну, кінематичну та динамічну подібності.

Геометрична подібність, яка вважається найпростішою, означає пропорційність подібних розмірів і рівність відповідних кутів. У гідравліці під цим розуміють подібність тих поверхонь, котрі обмежують потоки рідини, що означає подібність трубопроводів, по яких тече рідина.

Кінематична подібність – це подібність ліній течії та пропорційність подібних швидкостей за величиною та напрямком. Для неї є необхідним дотримання геометричної подібності.

Динамічна подібність полягає у пропорційності сил, які діють на подібні елементи кінематично та геометрично подібних потоків, і рівності кутів, які характеризують напрямки дії цих сил. У потоці рідини зазвичай діють різні сили – тиску, в'язкого тертя, ваги, інерційні. Дотримання пропорційності усіх сил, які діють у потоці, означає повну гідродинамічну подібність. На практиці це досягається рідко, тому доводиться обмежуватися частковою (неповною) гідродинамічною подібністю, за якою маємо пропорційність лише основних сил.

Вивчення динамічно подібних течій рідини є основою для теорії моделювання, проектування експериментальних установок та узгодження експериментальних даних. Інтерес до динамічно подібних рухів рідини виникає ще і з прагнення дослідити течію зі складними граничними умовами за допомогою експериментів на геометрично подібній системі, яка відрізняється від натурної тільки розміром. Варто згадати про дослідження в аеродинамічних трубах або створення моделей рік або інших природних об'єктів.

На практиці зручно користуватися наступним визначенням динамічної або взагалі – фізичної подібності. Два явища є подібними, якщо за заданими характеристиками одного можна отримати характеристики іншого простим перерахунком, аналогічним до переходу від однієї системи одиниць вимірювання до іншої. За умов задоволення критеріїв усіх трьох типів подібності отримують повну подібність між моделлю та повномасштабним об'єктом. Виникнення проблем під час отримання результатів на моделях та їхнім адаптуванням до реальних об'єктів приводить до визначення критеріїв, які характеризують відношення сил різного фізичного походження, і тому є критеріями динамічної подібності.

Вивчення динамічно подібних течій рідини є основою для теорії моделювання, проектування експериментальних установок та узгодження експериментальних даних. Інтерес до динамічно подібних рухів рідини виникає ще і з прагнення дослідити течію зі складними граничними умовами за допомогою експериментів на геометрично подібній системі, яка відрізняється від натурної тільки розміром.

Критерії подібності для всіх подібних між собою явищ зберігають одне й те саме числове значення, їх називають двома першими літерами прізвищ учених, які зробили суттєвий внесок в науку у певній сфері. З критеріїв гідродинамічної подібності можна назвати критерії Рейнольдса, Фруда, Ейлера, Дарсі. Основними критеріями подібності під час вивчення в'язкої стисливої

рідини при течії по трубах є число Рейнольдса, а для газорідинної суміші та при перебігу рідини у відкритих каналах – число Фруда.

Загалом під час моделювання гідравлічних процесів застосовують такі критерії подібності:

1. *Критерій Рейнольда* дозволяє встановити режим руху рідини та загальні умови, за яких можливі існування ламінарного і турбулентного режимів руху і перехід від одного режиму до іншого. Для напірного руху в циліндрових трубах зручніше число Рейнольдса визначати по відношенню до діаметра:

$$Re = \frac{vd\rho}{\mu} = \frac{vd}{\nu}, \quad (1.2.1)$$

де v – середня швидкість руху рідини по трубі, м/с; d – гідравлічний діаметр, м; ρ – густина рідини, кг/м³; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, Па · с; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м²/с.

2. *Критерій Фруда* є важливим критерієм подібності газорідинних потоків і визначає вид структурних форм двофазної течії. Число Фруда суміші є відношенням сил інерції газорідинного потоку до сили тяжіння:

$$Fr = \frac{v^2}{gd}, \quad (1.2.2)$$

де v – середня швидкість руху газорідинної суміші, м/с; g – прискорення сили тяжіння, м/с²; d – внутрішній діаметр трубопроводу, м.

3. *Критерій Дарсі* – критерій подібності, що характеризує співвідношення в'язкісних сил і сил тиску. Для фільтраційного потоку записується у вигляді:

$$Da = \frac{\mu v}{k|\text{grad } p|}, \quad (1.2.3)$$

де μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, Па · с; v – швидкість фільтрації, м/с; k – коефіцієнт проникності, м²; $|\text{grad } p|$ – градієнт тиску (його модуль) під час фільтрації, Па/м.

4. *Критерій Ейлера* – критерій подібності, що характеризує співвідношення сил тиску та інерції. Для фільтраційного потоку записується у вигляді:

$$Eu = \frac{|\text{grad } p|}{c\rho v^2}, \quad (1.2.4)$$

де c – експериментальна константа пористого середовища; v – швидкість фільтрації, м/с; ρ – густина рідини, кг/м³; $|\text{grad } p|$ – градієнт тиску (його модуль) при фільтрації, Па/м.

5. *Критерій Архімеда* використовується під час вивчення руху рідини, пов'язаного з її неоднорідністю за густиною. Число Архімеда характеризує відношення виштовхувальної сили до сили в'язкості:

$$Ar = \frac{gd^3(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{р}})}{v^2 \rho_{\text{р}}}, \quad (1.2.5)$$

де d – визначальний лінійний розмір (діаметр), м; $\rho_{\text{п}}$ – густина частинок породи, кг/м³; $\rho_{\text{р}}$ – густина рідини, кг/м³; v – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м²/с.

6. *Критерій Нуссельта* характеризує інтенсивність переходу теплоти (теплопередачі) на границі потік-стінка для стаціонарних процесів конвекційного теплообміну в однофазній нестисливій рідині. Число Нуссельта визначає безрозмірний коефіцієнт тепловіддачі та характеризує зв'язок між інтенсивністю тепловіддачі і температурним полем у приграничному шарі:

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}, \quad (1.2.6)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м² · К); l – характеристичний розмір, м; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м · К).

7. *Критерій Фур'є* є критерієм гомохронності нестационарних теплових процесів, тобто пов'язує в часі різні ефекти. Число Фур'є характеризує співвідношення між швидкістю зміни теплових умов в навколишньому середовищі і швидкістю перебудови поля температури всередині розглядуваної системи, який залежить від розмірів тіла й коефіцієнта його теплопровідності:

$$Fo = \frac{\chi \tau}{l^2} = \frac{\lambda \tau}{\rho c_{\text{п}} h^2}, \quad (1.2.7)$$

де $\chi = \frac{\lambda}{\rho c}$ – коефіцієнт теплопровідності, що характеризує теплову інерцію тіла. Чим більше значення χ , тим швидше нагрівається та охолоджується тіло; τ – характерний час зміни зовнішніх умов; l – характерний лінійний розмір тіла; $c_{\text{п}}$ – масова теплоємність пласта; h – товщина пласта.

8. *Критерій Пекле* використовується під час побудови розрахункових схем для розв'язання диференціальних рівнянь у частинних похідних, що описують потік в'язкої рідини. Число Пекле – це міра відношення молекулярного та конвективного перенесення теплоти:

$$Pe = \frac{v l}{a} = \frac{v \rho c_{\text{р}} h}{\lambda}, \quad (1.2.8)$$

де v – швидкість потоку рідини відносно поверхні теплообміну (характеристична швидкість) м/с; l – характерний лінійний розмір поверхні

теплообміну, м; a – коефіцієнт термічної дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$; c_p – масова теплоємність рідини за сталого тиску, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; h – товщина пласта, м; λ – коефіцієнт теплопровідності рідини.

9. *Критерій Прандтля* характеризує подібність полів швидкості та температури в потоці. Число Прандтля є мірою співвідношення інтенсивності перенесення імпульсу внутрішнім тертям та інтенсивності перенесення енергії теплопровідністю в потоці рідини:

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a}, \quad (1.2.9)$$

де a – коефіцієнт термічної дифузії; ν – кінематична в'язкість рідини.

10. *Число Струхаля* – характеризує відношення локальної інерційної сили до конвективної:

$$\text{Sh} = \frac{L}{v_t} = \omega \frac{L}{v}, \quad (1.2.10)$$

де v – швидкість рідини; L – лінійний розмір; $\omega = 1/t$ – частота вихроутворення.

11. *Число Маха* – характеризує відносну величину впливу стисливості на течію рідини:

$$\text{M} = \frac{v}{a}, \quad (1.2.11)$$

де v – швидкість рідини; a – швидкість звуку в цій рідині.

За умови $\text{M} \approx 0$ рідина вважається нестисливою; повітря при $\text{M} < 0,3$ також вважається нестисливим середовищем, зростання величини M веде до поняття стисливого середовища. Діапазон $\text{M} < 1$ вважається дозвуковим, перехідна зона $0,9 < \text{M} < 1,2$ – навіколозвуковою. При $0,9 < \text{M} < 3,0$ визначають надзвуковий потік, а при $\text{M} > 5$ працюють у термінах гіперзвуку.

12. *Число Річардсона* – визначає відношення потенційної енергії тіла, зануреного в рідину, до його кінетичної енергії:

$$\text{Ri} = \frac{\text{Ar}}{\text{Re}^2} = \frac{(\rho_t - \rho)gL}{\rho_t v^2}, \quad (1.2.12)$$

де ρ – густина рідини; ρ_t – густина тіла; v – характерна швидкість; L – характерний розмір тіла. Під «тілом» зазвичай розглядають рідину або газ. Також наведено вираз цього числа через числа Рейнольдса та Архімеда.

13. *Критерій Лапласа* – число, що виражає співвідношення між силою поверхневого натягу та дисипативними силами:

$$\text{Lp} = \frac{\rho \sigma d}{\mu^2}, \quad (1.2.13)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу, $\text{Н}/\text{м}$.

14. *Число Вебера* – для рухомої рідини характеризує відношення інерційної сили до поверхневого напруження:

$$We = \frac{\rho v^2 L}{\sigma}, \quad (1.2.14)$$

де ρ – густина рідини; v – швидкість рідини; L – лінійний розмір; σ – поверхневий натяг (поверхневий натяг – фізичне явище, суть якого полягає у прагненні рідини скоротити площу своєї поверхні за незмінного об'єму, розмірність – Н/м). Використовується обмежено: для характеристики капілярних потоків, під час вивчення формування крапель при витіканні рідини з насадок або форсунок.

У варіанті запису $We = \frac{\rho g L^2}{\sigma}$ для рідини у стані спокою в полі гравітації воно характеризує відношення сили гравітації до поверхневого напруження.

15. *Число Бонда* – характеризує співвідношення між зовнішніми силами (зазвичай силою ваги) та силами поверхневого натягу; пов'язане з проблемою втягування рідких крапель або бульбашок густиною ρ_2 у рідину з густиною ρ_1 :

$$Bo = \frac{g(\rho_2 - \rho_1)L^2}{\sigma}, \quad (1.2.15)$$

де L – лінійний розмір; σ – поверхневий натяг.

В останніх трьох виразах фігурує поверхневий натяг, який пояснюється так. На поверхнях поділу між газом і краплинною рідиною або між різними краплинними рідинами, які не змішуються, внаслідок взаємного притягання молекул виникають сили, які примушують поверхню поділу поводити себе подібно натягнутій перетинці. Завдяки дії сил поверхневого натягу об'єм рідини, на який не діють інші сили, набуває сферичної форми. Із властивістю поверхневого натягу пов'язана здатність рідини утворювати краплі, тому звичайні рідини називають краплинними. Процеси, що відбуваються на границі середовищ, характеризуються поверхневим натягом, величина якого залежить від типу контактуючих рідин і майже не залежить від температури.

Варто зазначити, що в наведених визначеннях застосовується термін «рідина», але взагалі розуміється текуче середовище, до якого відносять рідину і газ. Вказаними числами, названими на честь видатних вчених, безрозмірні критерії не обмежуються; наприклад відносна шорсткість Δ/d , яка визначає відношення середньої висоти виступів у трубопроводі до його діаметра, але зазначені критерії є найбільш поширеними під час проведення досліджень в гідравліці.

Всі критерії характеризують відношення сил різного фізичного походження, і тому є критеріями динамічної подібності. За умови існування

механічно подібних потоків, записавши систему диференціальних рівнянь руху в безрозмірному вигляді, отримуємо єдине рішення, до якого входять як параметри зафіксовані значення вказаних вище чисел. Це рішення визначає цілий клас фізично реальних процесів, розмірні параметри яких у подібних точках будуть відрізнятися тільки числовими множниками, а безрозмірні будуть однаковими.

Зміна величини Re означає зміну співвідношення усіх основних сил у потоці, у зв'язку з чим вказані коефіцієнти можуть також дещо змінюватися. Тому всі ці коефіцієнти потрібно розглядати як функції Re , хоча в деяких інтервалах Re вони можуть залишатися постійними. Останнє характеризує число Рейнольдса як найважливіше для гідравліки.

Із законами подібності тісно пов'язаний метод розмірностей, який дає змогу сформулювати і представити співвідношення між будь-яким фізично обґрунтованим зв'язком розмірних величин і безрозмірними їхніми комплексами, незалежно від масштабу основних одиниць (маси – кг, довжини – м, часу – секунди). Метод аналізу розмірностей можна розглядати як віртуальний аналог фізичного моделювання процесу, але за допомогою засобів розмірностей фізичних величин. Суть методу полягає в тому, що з параметрів, які характеризують систему, складається вираз-модель, що має потрібну розмірність і у певний спосіб відтворює (емулює, імітує) функціонування фізичної системи. Часто саме складена за правилом розмірності формула і виявляється шуканим співвідношенням (з точністю до безрозмірного множника).

Завдання до самостійної роботи

Задача 1.2.1. При напірній течії рідини в трубі перепад тиску Δp залежить від її діаметра d і довжини l еквівалентної шорсткості стінок труби Δ_e , густини рідини ρ і її в'язкості ν та середньої швидкості v . Привести залежність перепаду тиску Δp від безрозмірних комплексів π .

Задача 1.2.2. По гладкій трубі діаметром $d_1 = 0,1$ м тече нафта з витратою $0,02 \text{ м}^3/\text{с}$. Динамічна в'язкість нафти $\mu = 0,01 \text{ Па} \cdot \text{с}$, густина $\rho = 900 \text{ кг}/\text{м}^3$. Знайти швидкість течії води по трубі діаметром $d_2 = 0,01$ м, при якій обидві течії будуть подібні.

Задача 1.2.3. Визначити режим руху води за температури 40°C , яка протікає в трубопроводі діаметром 200 мм з витратою $12 \text{ м}^3/\text{год}$.

Задача 1.2.4. Нафта з кінематичним коефіцієнтом в'язкості $\nu = 8,3 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ рухається по трубопроводу. Знайти мінімальний діаметр трубопроводу, за якого нафта буде рухатися у ламінарному режимі з об'ємною витратою $Q = 8,14 \text{ л}/\text{с}$.

Задача 1.2.5. Бензин, коефіцієнт кінематичної в'язкості якого дорівнює $0,7 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, перекачується по затрубному простору. Внутрішній діаметр зовнішнього трубопроводу 200 мм, зовнішній діаметр внутрішнього трубопроводу 100 мм. Визначити режим руху бензину, якщо середня швидкість течії рівна 0,5 м/с. За якої швидкості буде ламінарний режим?

Задача 1.2.6. Яка кількість води Q витікає із труб діаметром 25 мм при критичному значенні числа Рейнольдса?

Задача 1.2.7. Рідина витікає із зовнішньої циліндричної насадки діаметром $d = 0,02 \text{ м}$ при сталому рівні в резервуарі $H = 1 \text{ м}$. Чи можна змодельовати процес витікання, використовуючи цю ж рідину?

Задача 1.2.8. По трубопроводу діаметром 232 мм перекачується веретенне масло за температури 47°C із швидкістю 1 м/с. Встановити режим течії масла. За якої температури рідини режим течії стане ламінарним?

Задача 1.2.8. У систему змащування дизельного двигуна бурової установки масло МС-20 надходить після охолодження його в радіаторі до температури 50°C по трубі діаметром 36 мм. Нагріте в двигуні масло до температури 100°C подається по трубі діаметром 40 мм в радіатор. Визначити режими течії масла в трубопроводах, якщо витрата його 60 л/хв.

Задача 1.2.9. По самотливому трубопроводу діаметром 400 мм зливається нафта, температура якої 20°C ($\nu = 9 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$). Вичислити числа Рейнольдса та Фруда, якщо при витраті нафти $113 \text{ м}^3/\text{год}$ трубопровід заповнений до половини діаметра.

Задача 1.2.10. Через лоток прямокутного перерізу ($b = 300 \text{ мм}$, $h = 100 \text{ мм}$) в амбар зливається нафта в кількості $M = 82 \text{ т/год}$, густина якої $\rho = 865 \text{ кг/м}^3$ і в'язкість $\mu = 7,8 \text{ МПа} \cdot \text{с}$. Визначити режим руху нафти і його зміну, якщо витрату збільшити в два рази.

Контрольні запитання

1. Як визначити режим руху рідини в некруглих трубах?
2. Як вичислити критичну витрату рідини?
3. Дайте визначення гідродинамічної подібності потоків.
4. У чому основні відмінності між геометричною, кінематичною та динамічною подібністю гідравлічних явищ?
5. Сформулюйте основний закон гідродинамічної подібності потоків.
6. Які умови моделювання потоків, коли домінуючими є сили тертя, ваги, тиску та ін.?
7. Який зв'язок методу розмірностей з модельним методом вивчення явищ?

1.3 Розрахунок режиму руху газорідинної суміші в трубопроводі

Рекомендовані джерела літератури: [1] с. 273–287; [9] с. 7–87.

Стислі теоретичні відомості

Газорідинна суміш – це система, що складається з газу та рідини, які рухаються разом у трубопроводах або інших середовищах. Такі суміші широко використовуються у видобуванні нафти та газу, а також у технологічних процесах, де необхідно транспортувати газ і рідину разом. Їхня поведінка визначається складними гідродинамічними процесами, які впливають на ефективність транспортування та розділення фаз. Газорідинна суміш може мати різні структури залежно від співвідношення фаз, швидкості потоку та інших параметрів.

Двофазний газорідинний потік є сумішшю газової і рідкої фаз. Об'ємну витрату суміші $Q_{\text{см}}$ визначають, як суму об'ємних витрат фаз:

$$Q_{\text{см}} = Q_{\text{р}} + Q_{\text{г}}, \quad (1.3.1)$$

де $Q_{\text{р}}$, $Q_{\text{г}}$ – об'ємна витрата рідкої і газової фази відповідно.

Середня швидкість суміші – це відношення її витрати до площі перерізу трубопроводу ω :

$$W_{\text{см}} = \frac{Q_{\text{см}}}{\omega}. \quad (1.3.2)$$

Відношення об'ємної витрати кожної фази за середнього тиску і середньої температури суміші в трубопроводі до площі перерізу трубопроводу ω називається зведеною швидкістю даної фази:

$$W_{\text{зв}}^{\text{р}} = \frac{Q_{\text{р}}}{\omega}; \quad W_{\text{зв}}^{\text{г}} = \frac{Q_{\text{г}}}{\omega}. \quad (1.3.3)$$

Істинні середні швидкості фаз визначаються як відношення їх витрат до площі труби, зайнятої цією фазою:

$$W_{\text{р}} = \frac{Q_{\text{р}}}{\omega(1-\psi)}; \quad W_{\text{г}} = \frac{Q_{\text{г}}}{\omega\psi}, \quad (1.3.4)$$

де ψ – істинний газовміст, під яким розуміють частку перерізу труби, зайняту газовою фазою.

Для характеристики співвідношення фаз у газорідинному потоці використовується також поняття витратного газовмісту суміші β_x , який дорівнює відношенню витрати газу до витрати суміші:

$$\beta_x = \frac{Q_g}{Q_{cm}} = \frac{Q_g}{Q_g + Q_p}. \quad (1.3.5)$$

Якщо розглядати трубопровід великої протяжності, у якому тиск помітно змінюється, то витрата газової фази Q_g , а отже, і витратний газовміст β_x , не є сталими величинами.

Відповідно до витратного газовмісту вводять поняття густини газорідинної суміші:

$$\rho_{cm} = \frac{M_{cm}}{Q_{cm}} = \rho_p(1 - \beta_x) + \rho_g \beta_x. \quad (1.3.6)$$

де M_{cm} – масова витрата суміші; ρ_p , ρ_g – густина відповідно рідини і газу в умовах труби.

Важливим критерієм подібності газорідинних потоків є число Фруда суміші:

$$Fr_{cm} = \frac{W_{cm}^2}{gD}, \quad (1.3.7)$$

де g – прискорення вільного падіння; D – внутрішній діаметр трубопроводу.

Число Фруда є відношенням сил інерції газорідинного потоку до сили тяжіння.

Двофазні потоки характеризуються наявністю різних *структурних форм* течії. Структурні форми течії і межі їхнього існування можуть вивчатись тільки експериментально з використанням візуальних методів. Численні дослідження показали, що структурні форми потоків дуже різноманітні і залежать від співвідношення витрат рідкої та газової фаз, їхніх фізичних властивостей, а також від діаметра і кута нахилу трубопроводу.

Найхарактернішими структурними формами є:

1. *Бульбашкова* структура (рис. 1.3.1). За такого характеру течії газова фаза у вигляді окремих бульбашок розподілена у всій масі рідини. У випадку горизонтальної і слабонахиленої течії спостерігається тенденція скупчення бульбашок у верхній частині труби. Це пояснюється дією сил гравітації. Бульбашкова структура спостерігається за малих концентрацій газу.

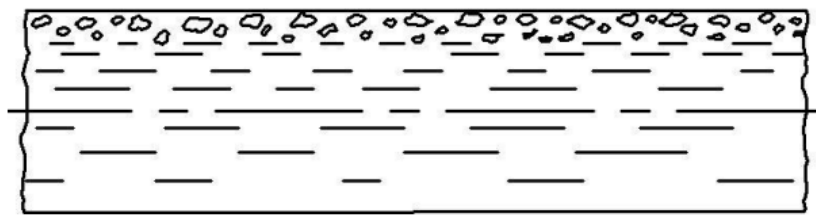


Рисунок 1.3.1 – Бульбашкова структурна форма течії

2. *Пробкова* структура (рис. 1.3.2). За зниження тиску нижче тиску насичення проходить збільшення об'єму газової фази як завдяки переходу із розчиненого стану, так і завдяки розширенню об'єму газу, який виділився раніше. Внаслідок цього окремі бульбашки зливаються, утворюючи пробки. Пробкова структура характеризується послідовним чергуванням пробок газу і рідини. У випадку горизонтальних потоків газові пробки концентруються у верхній частині труби. За пробкової структури спостерігається пульсація тиску, яка характеризується тим, що тиски у будь-якому фіксованому перерізі коливаються.

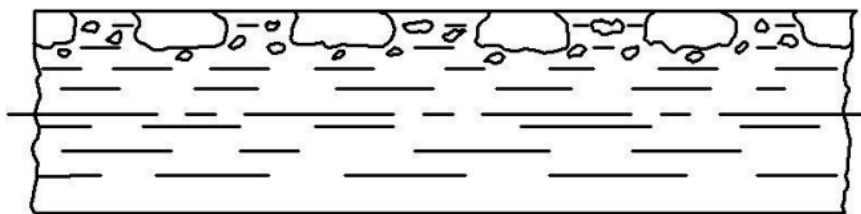


Рисунок 1.3.2 – Пробкова структурна форма течії

3. *Розшиарована* структура (рис. 1.3.3). Ця структура газорідинного потоку буває тільки в трубах горизонтальних або з відносно невеликими значеннями кута нахилу, коли під дією сил гравітації потік розшиаровується: рідина тече в нижній частині, змочуючи тільки частину поверхні труби, а газ – у верхній частині. При цьому границя розділення рідина – газ може бути гладкою і плоскою, може мати невеликі брижі або хвилі значної довжини і амплітуди. Розшиарована структура може бути отримана із пробкової шляхом збільшення об'ємного витратного вмісту газу, коли окремі пробки зливаються. Подальше збільшення витрати газу призводить до утворення спочатку невеликих, потім більших і, нарешті, шквальних хвиль.

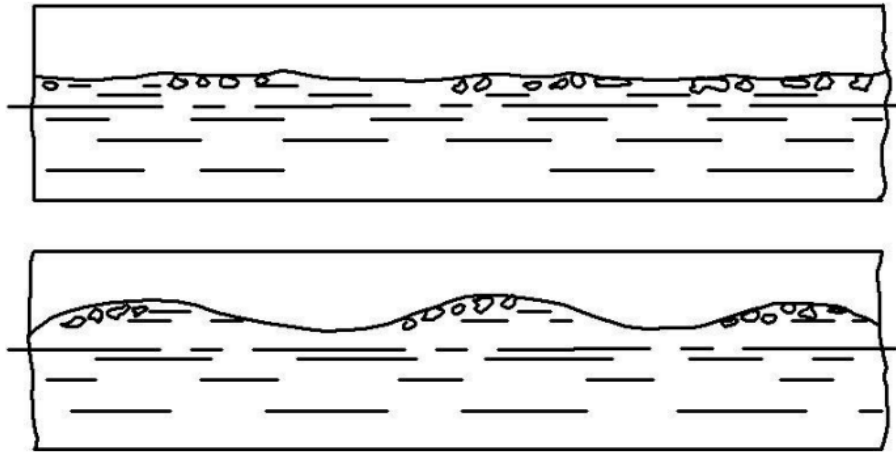


Рисунок 1.3.3 – Розширована структурна форма течії

4. *Спінена* або *дрібнодиспергована* структура (рис. 1.3.4). Ця структура є перехідною від пробкової до кільцевої. Поява спіненої структури пояснюється розпадом пробок на більш дрібні через турбулентні пульсації швидкості і тиску. Інакше кажучи, проходить диспергування газової фази до дуже малих розмірів. Окремі глобули газу розділяються між собою тонкою плівкою рідини, міцність якої залежить від фізичних властивостей рідини, зокрема і від поверхневого натягу. У випадку горизонтальної течії спінену структуру ще часто називають емульсійною.

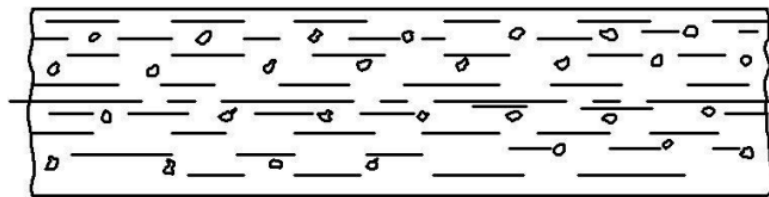


Рисунок 1.3.4 – Спінена структурна форма течії

5. *Кільцева* структура (рис. 1.3.5). Така течія рідинного потоку характеризується тим, що на стінках труб є шар рідини, у центральній частині рухається газ, що включає дрібні краплинки рідини. Кільцева структура існує за дуже великого вмісту газу і великих швидкостей руху газорідинної суміші. Межа розділення рідина – газ становить хвилясту поверхню, з якої проходить відривання і винесення краплин рідини. Із збільшенням швидкості суміші кількість розпиленої рідини в газовому ядрі потоку і ступінь дисперсності збільшується.

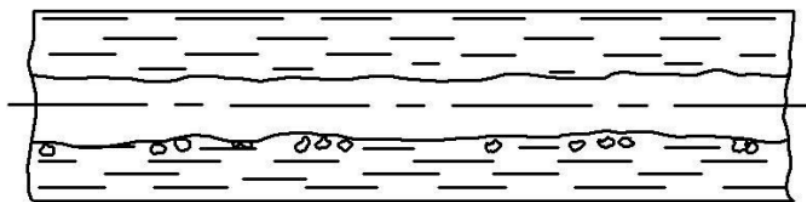


Рисунок 1.3.5 – Кільцева структурна форма течії

Багаторічний досвід експлуатації промислових трубопроводів показав, що за руху газонафтових і газоконденсатних сумішей трубопроводами діаметром понад 0,2 м у практичному діапазоні швидкостей руху основними структурами є розшарована і пробкова. Причому за низхідних і горизонтальних потоків може бути як розшарована, так і пробкова структура. За висхідних газорідинних потоків з кутом нахилу понад 2° завжди спостерігається пробкова структура. Кожна структура потоку характеризується своїми значеннями відносної швидкості руху фаз, своїми закономірностями гідравлічних опорів. Саме тому важливо правильно визначити структуру газорідинного потоку. Тут визначальним критерієм подібності є число Фруда Fr_{cm} . Якщо $Fr_{cm} < Fr_{кр}$, то течія газорідинної суміші розшарована, за $Fr_{cm} > Fr_{кр}$ – течія пробкова.

Рекомендується визначати критичне значення числа Фруда за формулою:

$$Fr_{кр} = \left(0,2 + \frac{2 \sin \alpha}{\lambda_p}\right) \exp(-2,5\beta_x) \frac{1}{(1 - \beta_x)^2}, \quad (1.3.8)$$

де α – кут нахилу трубопроводу до горизонту; λ_p – коефіцієнт гідравлічного опору безнапірної течії рідини в нахиленому трубопроводі під дією сили тяжіння.

Завдання до самостійної роботи

Задача 1.3.1. Газонасичена нафта перекачується по трубопроводу з внутрішнім діаметром 250 мм. Визначити структурну форму потоку, якщо кут нахилу трубопроводу до горизонту дорівнює 5° , а коефіцієнт гідравлічного опору складає 0,097. Об'ємна витрата відповідно рідкої фази становить $0,0018 \text{ м}^3/\text{с}$, а газової фази – $0,0002 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 1.3.2. Використовуючи критерій Фруда, визначити діаметр моделі, якщо витрата рідини у свердловині – $180 \text{ м}^3/\text{добу}$, витрата рідини в моделі 4 л/хв , внутрішній діаметр НКТ – 62 мм.

Задача 1.3.3. Розрахувати густину газоводонафтової суміші на вибої свердловини. Відомо: густина води і нафти 1060 і 890 кг/м^3 ; відносна густина газу за стандартних умов $0,7$; газовий фактор $65 \text{ м}^3/\text{м}^3$; коефіцієнт розчинності газу в нафті $3,4 \text{ м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{МПа})$; обводненість 60% ; тиск на вибої 15 МПа ; дебіт рідини $90 \text{ м}^3/\text{добу}$; умовний діаметр експлуатаційної колони 168 мм ; товщина стінки труб 8 мм ; температура на вибої 48°C .

Задача 1.3.4. Розрахувати втрати тиску на тертя під час руху однорідної нафти, а також визначити, у скільки разів збільшаться втрати тиску на тертя під час руху газонафтової суміші, коли витратний газовміст потоку складає 10% і 70% . Вхідні дані: витрата нафти в піднімальних трубах довжиною 1000 м з внутрішнім діаметром $50,3 \text{ мм}$ становить 60 т/добу . Густина і динамічний коефіцієнт в'язкості нафти відповідно рівні 860 кг/м^3 і $1,5 \text{ мПа} \cdot \text{с}$.

Задача 1.3.5. Визначити структуру водонафтової суміші та розрахувати її густину і динамічний коефіцієнт в'язкості. Вхідними параметрами задатися так, щоб одержати крапельну і емульсійну структури 2 типів: В/Н і Н/В.

Контрольні запитання

1. Що таке газорідинна суміш?
2. У чому різниця між дійсною і витратною об'ємною концентрацією?
3. Як визначити фізичні властивості газорідинної суміші?
4. Які існують структурні форми потоків газорідинних сумішей?
5. Як визначити наявність тієї чи іншої структури потоку?
6. Який алгоритм розрахунку низхідної течії газорідинної суміші?
7. Який алгоритм розрахунку висхідної течії газорідинної суміші?
8. Який підхід використовують для розрахунку втрат напору на місцевих опорах руху газорідинної суміші?
9. Як визначити об'ємну концентрацію фаз газорідинної суміші?
10. Що таке швидкість ковзання фаз?

2 МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

2.1 Мета розрахунково-графічної роботи

Мета виконання розрахунково-графічної роботи – закріплення та поглиблення теоретичних знань з гідравліки нафтогазових систем щодо гідравлічного розрахунку кільцевих трубопровідних мереж.

Завдання роботи – враховуючи теоретичні основи гідрогазодинаміки, використовуючи відповідні методики і довідкові дані для розв’язання задач із розрахунку гідравлічних і гідрогазодинамічних режимів роботи системи транспортування газу, виконати гідравлічний розрахунок двокільцевої трубопровідної мережі газопроводу.

Для виконання розрахунково-графічної роботи навчальним планом передбачено 30 годин самостійної роботи.

Розрахунково-графічної роботи оформляється відповідно до чинних вимог державних стандартів України і має містити: титульний аркуш, завдання, зміст, вступ, розрахункову частину, графічну частину, висновки, список використаних джерел, додатки та інші матеріали, що передбачені завданням.

Першим аркушем розрахунково-графічної роботи є титульний аркуш, другим – завдання, третім – зміст. Перший та другий аркуші не нумеруються. Титульний аркуш роботи оформляються відповідно до зразка (дод. А).

Завдання до розрахунково-графічної роботи видає індивідуально кожному студенту викладач. Завдання може містити, окрім переліку основних питань, індивідуальні завдання, що підлягають виконанню, додаткову спеціальну літературу, необхідну для виконання цих задач.

У вступі наводиться оцінка сучасного стану розглядуваної в роботі задачі та обґрунтування необхідності її розв’язання.

Графічна частина роботи повинна містити: розрахункову схему кільцевої трубопровідної системи та номограму гідравлічного розрахунку.

У висновках аналізуються досягнуті у роботі результати та повнота виконання задач, що сформульовані у завданні до роботи.

Захист роботи здійснюється прилюдно. Під час захисту студент робить коротку доповідь (5–8 хв), що має містити інформацію про тему роботи, обрані та реалізовані у роботі методи розв’язання задач за завданням до роботи, отримані результати і висновки. Після доповіді студенту можуть бути задані питання щодо обґрунтованості застосованих у роботі рішень та методів розрахунків.

Оцінка за роботу виставляється з урахуванням складності і досконалості виконаних задач, якості та правильності розрахунків, чіткості доповіді і продемонстрованих у процесі захисту знань у відповідях на запитання.

2.2 Методика гідравлічного розрахунку кільцевих трубопроводів

Кільцеві трубопроводи – це трубопроводи, у яких рідина в кожному пункті подається з декількох напрямків, що забезпечує підвищену надійність їхньої роботи порівняно з тупиковими. Прикладом їх є мікрорайонні мережі газопостачання. Ці трубопроводи складаються з певної кількості замкнутих кілець, а тому називаються замкнутими (рис. 2.2.1).

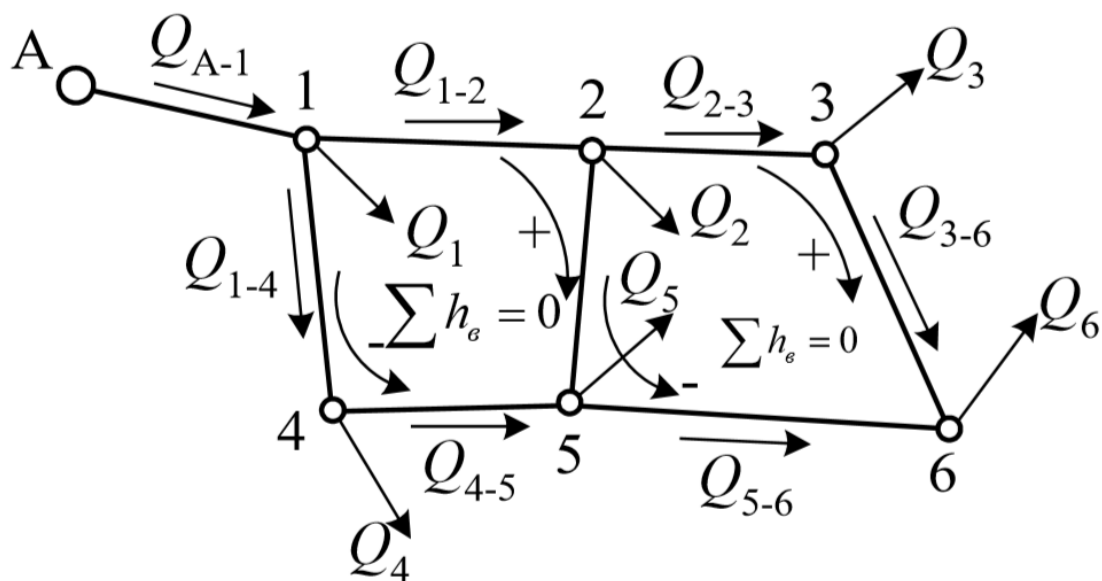


Рисунок 2.2.1 – Схема кільцевої трубопроводної системи

Гідравлічний розрахунок цих трубопроводів ведеться в такій послідовності:

1. Обчислюються розрахункові вузлові витрати рідини Q_i , які складаються із зосередженої вузлової витрати (якщо вона є) і з пів суми шляхових витрат на лініях, що сходяться у вузлі, тобто:

$$Q_i = Q_z + 0,5 \sum_{i=1}^n Q_{ш_i}, \quad (2.2.1)$$

де Q_z – зосереджена вузлова витрата; $Q_{ш_i}$ – шляхові витрати на лініях, що сходяться у вузлі.

2. Призначаються лінійні (розрахункові) витрати рідини в першому приближенні та їхній напрям (рис. 2.2.1, закруглені стрілки). При цьому сума

витрат рідини, які надходять до вузла, повинна дорівнювати сумі витрат, які виходять з вузла.

3. За номограмами визначаються діаметри труб на ділянках, які потім округлюються до більшого стандартного діаметра.

4. Обчислюються втрати напору на кожній ділянці кільцевої мережі, а потім виконується ув'язка кілець. Суть її полягає в тому, що алгебраїчна сума втрат напору в гілках кільця має бути близькою до нуля. Для цього в гілці з рухом рідини за годинниковою стрілкою втрати напору умовно приймають зі знаком плюс, а в протилежному напрямку – зі знаком мінус (рис. 2.2.1), наприклад, у першому кільці схеми мережі:

$$h_{B1-2} + h_{B2-5} - h_{B4-5} - h_{B1-4} \approx 0. \quad (2.2.2)$$

Якщо умова (2.2.2) не виконується, то необхідно або перерозподілити розрахункові витрати в гілках кільця, або змінити діаметр труб і повторити розрахунки. Досягти повного виконання умови (2.2.2) практично неможливо, а тому допускається неув'язка в кільці $\Delta h_B = 0,3 \dots 0,5$ м, а в усій мережі – $\Delta h_B = 1 \dots 1,5$ м.

Схему мережі газопостачання двох мікрорайонів міста показано на рисунку 2.2.2. За цією схемою визначають розрахункові ділянки газопроводів і їхню фактичну довжину l_ϕ , м. Потім визначають умови живлення і розрахункову довжину ділянок мережі. Розміщення будівель мікрорайону з одного боку газопроводу вказує на одностороннє живлення, розрахункова довжина ділянки при цьому $l_p = l_\phi/2$. Якщо ж будівлі розміщені з обох боків, то маємо справу з двостороннім живленням, тоді $l_p = l_\phi$.

Для визначення розрахунково-погодинних витрат газу на ділянці мережі знаходять питому, шляхову, еквівалентну і транзитну витрату газу. Питому витрату визначають за формулою, м³/год:

$$q_{um} = \frac{Q_{з.б.}}{\sum l_p}, \quad (2.2.3)$$

де $Q_{з.б.}$ – розрахункова втрата газу в мікрорайонах № 1 і № 2, м³/год; $\sum l_p$ – загальна розрахункова довжина ділянок мережі, від яких проводиться відбирання газу, м.

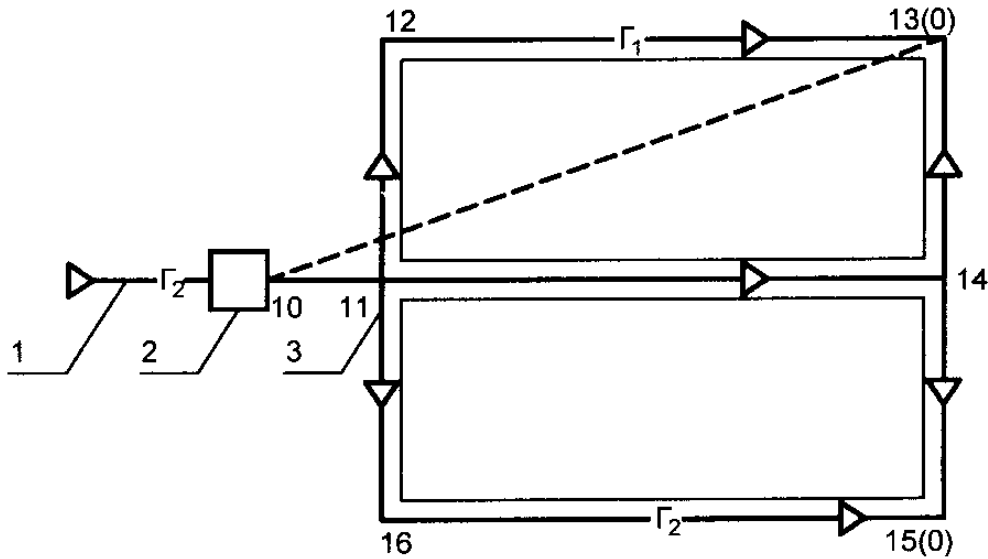


Рисунок 2.2.2 – Розрахункова схема газопроводів низького тиску:
1 – газопровід середнього або високого тиску, 2 – ГРП,
3 – розподільний газопровід

Шляхова витрата для кожної ділянки мережі, м³/год:

$$q_{ш} = q_{шт} \cdot l_p. \quad (2.2.4)$$

Сума шляхових витрат ділянок мережі має дорівнювати витраті газу в ГРП. Еквівалентна витрата, м³/год:

$$q_E = 0,5 \cdot q_{ш}. \quad (2.2.5)$$

Заміна шляхової витрати еквівалентною пояснюється тим, що на розрахункових ділянках не відомі місця відгалужень до споживачів газу.

Визначивши еквівалентні витрати на всіх ділянках мережі, приймають найбільш імовірний розподіл потоку газу від ГРП до найвіддаленішої (нульової) точки газової мережі. Місцем зустрічі потоків газу вважають точку, яка поділяє газову мережу на два півкілця, приблизно рівні між собою. Напрямок потоку газу від ГРП до нульової точки позначають на схемі стрілками.

До встановлення розрахункових витрат знаходять транзитні витрати. Наприклад, для ділянок мережі (рис. 2.2.2) 13-12; 13-14; 14-15; 15-16 транзитні витрати дорівнюють нулю, а

$$q_T(11-12) = q_{ш}(12-13)$$

$$q_T(11-14) = q_{ш}(13-14) + q_{ш}(14-15);$$

$$q_T(11-16) = q_{ш}(15-16) \quad .$$

Розрахунково-погодинні витрати газу на ділянках мережі знаходять за формулами, м³/год:

$$Q_p = q_T + 0.5q_{ui} \quad (2.2.6)$$

$$Q_p = q_T + q_E. \quad (2.2.7)$$

Отже,

$$Q_p(13-14) = q_E(13-14);$$

$$Q_p(14-15) = q_E(14-15);$$

$$Q_p(15-16) = q_E(15-16);$$

$$Q_p(12-13) = q_E(12-13);$$

$$Q_p(11-16) = q_T(11-16) + q_E(11-16);$$

$$Q_p(11-12) = q_T(11-12) + q_E(11-12);$$

$$Q_p(11-14) = q_T(11-14) + q_E(11-14).$$

Розрахункова витрата газу на ділянці 10-11 дорівнюватиме сумі шляхових витрат на всіх ділянках мережі мікрорайонів.

За знайденими значеннями розрахункових витрат і середньою втратою тиску, користуючись номограмою (дод. Б та В), визначають діаметри газопроводів і фактичний питомий опір на всіх ділянках мережі низького тиску. Ключ для користування номограмою наведений нижче (рис. 2.2.3).

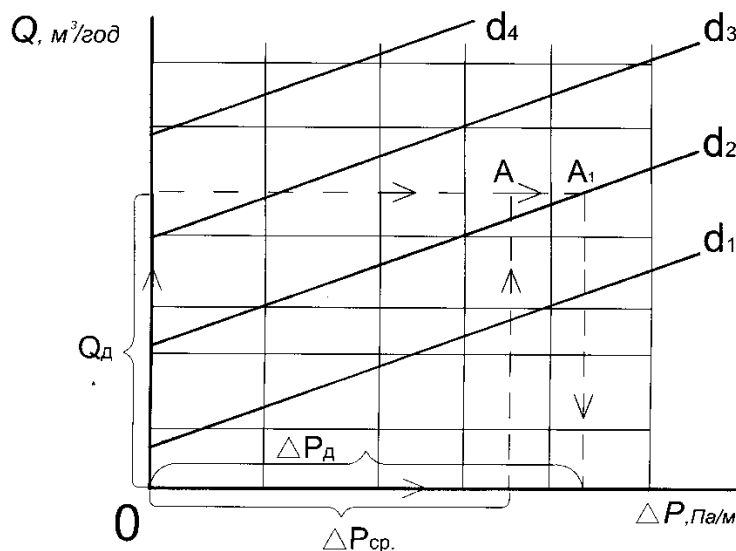


Рисунок 2.2.3 – Ключ до користування номограмою

Середні питомі втрати тиску на кожному півкільці від ГРП до нульової точки визначають за формулою, мм вод. ст.:

$$\Delta P_{cp} = \frac{\Delta P}{1.1 \sum l_{\phi}}, \quad (2.2.8)$$

де ΔP – втрати тиску в розподільних газопроводах від ГРП до нульової точки; приймаємо $\Delta P = 120$ мм вод. ст.; $\sum l_{\phi}$ – фактична довжина півкільця, м.

Методика визначення діаметрів газопроводів низького тиску d і фактичних питомих опорів на ділянках ΔP така сама, як і при розрахунку газопроводів середнього тиску, розрахунки виконують за допомогою номограм (дод. Б та В).

За відомими значеннями питомих опорів знаходять лінійні опори на кожній ділянці розглядуваного півкільця $\Delta P \cdot l_{\phi}$. Місцеві опори на ділянках Z , що виникають на поворотах мережі, в арматурі й при зміні діаметра труб, становлять 10 % від значення лінійних опорів.

Отже, загальний опір на кожному півкільці дорівнюватиме сумі лінійних і місцевих опорів ділянок, які входять до розглядуваного півкільця.

Якщо діаметри газопроводів на ділянках півкільця підбрано правильно, сума лінійних і місцевих опорів на півкільці повинна становити 120 мм вод. ст.

Допускається нев'язка, величина якої не повинна перевищувати 10 % суми втрат на півкільці. Крім того, потрібно мати рівні втрати тиску на півкільцях розглядуваного кільця. Тут також допускається нев'язка в розмірі 10 %.

Рівність опорів на півкільцях свідчить про те, що нульові точки вибрано правильно і в них зустрінуться потоки газу.

2.3 Гідравлічний розрахунок кільцевих газових мереж низького тиску

Виконати гідравлічний розрахунок кільцевих газових мереж низького тиску мікрорайонів № 1 і 2 (див. рис. 2.3.1). Мікрорайони мають рівномірно розподілені витрати. Природний газ з теплотою згоряння 8 500 ккал/м³ й густиною 0,73 кг/м³ використовується на побутові й комунально-побутові потреби. Розрахункова годинна витрата газу $Q_{\text{розр}} = 1\,400$ м³/год. Радіус дії ГРП $R = 800$ м. Фактична довжина ділянок мережі наведена на рисунку 2.3.1. Наявні діаметри труб: 76, 108, 121, 133, 159, 219, 273 мм.

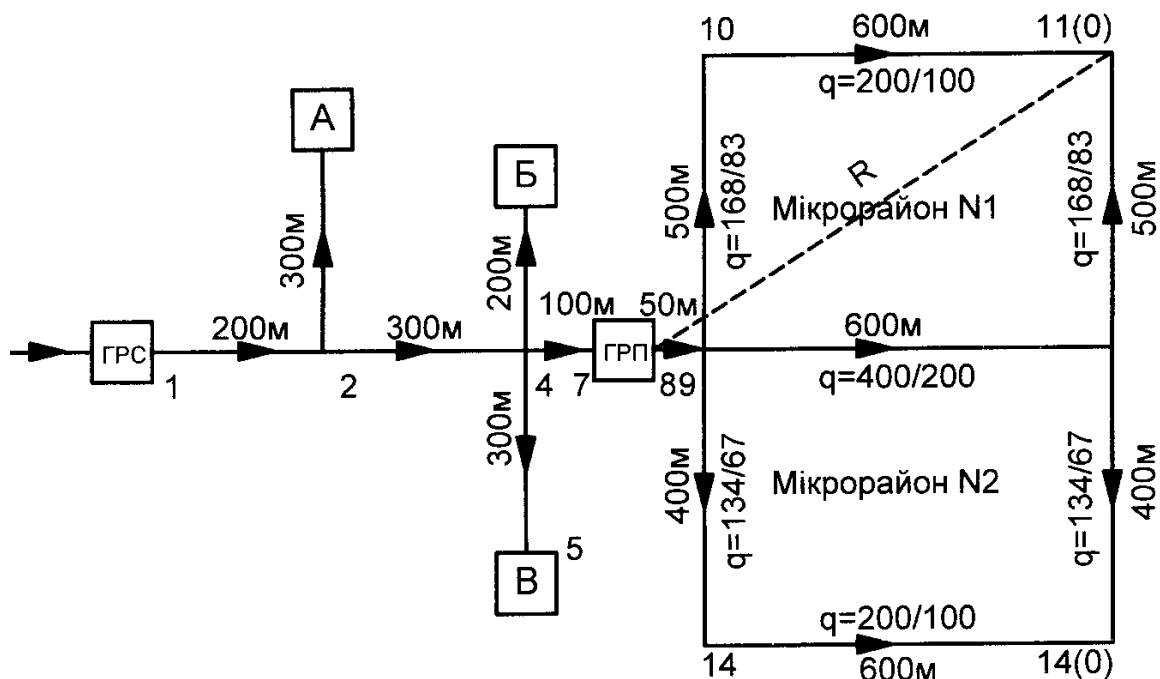


Рисунок 2.3.1 – Розрахункова схема мікрорайонних газопроводів низького і середнього тиску:

А – промислове підприємство; Б – механізована пральня; В – районна опалювальна котельня; R – радіус дії ГРП; q – витрата газу, м³/год (у чисельнику – супутня на ділянці, у знаменнику – еквівалентна)

Завданням гідравлічного розрахунку газових мереж є визначення діаметрів газопроводів залежно від обсягу розрахункових витрат і допустимих втрат тиску. Діаметр газопроводів і товщину їхніх стінок визначають розрахунком, однак незалежно від цього товщина стінок надземного газопроводу повинна бути не менше 2 мм, а підземного – 3; мінімальний діаметр підземних газопроводів: 50 мм – для розподільних мереж, 25 – для відгалужень до споживачів. На практиці застосовують сталеві безшовні труби зовнішнім діаметром 57...426 мм.

Міські кільцеві розподільні газопроводи розраховують у такій послідовності. На плані міста або населеного пункту визначають кількість і розміщення газорегуляторних пунктів залежно від радіуса їхньої дії та оптимальної витрати газу. Від місць розташування ГРП труби газопроводів прокладають у землі або по стінах будівель.

Визначаємо умови живлення газом розрахункових ділянок мережі й розрахункову довжину ділянок, окрім ділянки 8-9, на якій витрата газу є транзитною.

Питома витрата газу:

$$q_{\text{пит}} = Q_{\text{розр}} / \sum l_{\text{розр}} = 1\,400 / 2\,100 = 0,666 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Потім визначаємо супутні й еквівалентні витрати газу на кожній розрахунковій ділянці. Всі показники розрахунків заносимо до таблиці 2.3.1.

Таблиця 2.3.1 – Супутні й еквівалентні витрати до розрахунку мережі низького тиску мікрорайонів № 1 і 2

Розрахункова ділянка	Довжина ділянки, м		Витрата на ділянці, м ³ /год	
	l_{ϕ}	$l_{розр}$	q_c	$q_{екв}$
9-10	50	250	166	83
10-11	600	300	200	100
11-12	500	250	166	83
12-13	400	200	134	67
13-14	600	300	200	100
14-9	400	200	134	67
9-12	600	600	400	200
Примітка. На ділянці 9-12 двобічне живлення, на інших – однобічне.				

На розрахунковій схемі (рис. 2.3.1) приймають напрямок потоків газу від ГРП до нульових точок 11 і 13. На цій же схемі ставлять фактичну довжину ділянок і значення супутніх й еквівалентних витрат.

Далі визначають транзитні й розрахункові годинні витрати газу на кожній розрахунковій ділянці мережі. Розрахункова годинна витрата газу на ділянці 8–9 дорівнює 1 400 м³/год. Значення транзитних й розрахункових витрат заносять до таблиці 2.3.1.

За формулою $H_{сер} = \Delta H / \sum l_{розр}$ встановлюють середні питомі втрати тиску від ГРП до нульових точок. ΔH – втрати тиску в розподільних газопроводах від ГРП до нульової точки приймаємо 120 кгс/м²; $l_{розр}$ – фактична довжина півкільця, м.

На ділянках 8-9-10-11, 8-9-12-11:

$$H_{сер1} = H_{сер2} = 120 / (50 + 600 + 500) = 0,1 \text{ кгс/м}^2;$$

На ділянках 8-9-14-13 і 8-9-12-13:

$$H_{сер3} = H_{сер4} = 120 / (50 + 400 + 500) = 0,11 \text{ кгс/м}^2.$$

За $Q_{розр}$ на ділянці (табл. 2.3.2) і відповідному $H_{сер}$ по номограмі (додаток В) знаходять діаметр газопроводу і питому втрату тиску на ділянці. Наприклад, на ділянці 11–10, де $Q_{розр} = 100$ м³/год і $H_{сер} = 0,1$ кгс/м² на 1 м, на номограмі відображають точку А. Із точки А (витрата газу на ділянці не змінюється) пряма перетинається з прямою $d = 121$ мм. Із точки перетину Б опускають перпендикуляр на вісь абсцис і на ній знаходимо значення питомої втрати тиску на ділянці 11–10: $H_{11-10} = 0,07$ кгс/м² на 1 м.

Наступні ділянки мережі розраховуються аналогічно ділянці 11–10.

Таблиця 2.3.2 – Розрахунок мережі низького тиску

Розрахункова ділянка	l_{ϕ} , м	Витрата газу на ділянці, м ³ /год				d , мм	Втрати тиску, кгс/м ²		
		q_c	$q_{екв}$	q_m	$Q_{розр}$		H (на 1 м)	$H l_{\phi}$ (на всю ділянку)	$H l_{\phi} + z$
Кільце I (первинний розрахунок)									
11-10	600	200	100	–	100	121	0,07	42	46
10-9	500	166	83	200	283	159	0,1	50	55
9-8	50	–	–	1 400	1 400	273	0,16	8	9
Всього									110
11-12	500	166	83	–	83	108	0,09	45	50
12-9	600	400	200	300	500	219	0,07	42	46
9-8	50	–	–	1 400	1 400	273	0,16	8	9
Всього									105
Кільце II (первинний розрахунок)									
13-14	600	200	100	–	100	133	0,042	25	28
14-9	400	134	67	200	267	159	0,11	44	49
9-8	50	–	–	1 400	400	273	0,16	8	9
Всього									86
13-12	400	134	67	–	67	108	0,06	24	27
12-9	600	400	200	300	500	219	0,07	42	47
9-8	50	–	–	1 400	1 400	273	0,16	8	9
Всього									83
Кільце II (вторинний розрахунок)									
13-14	600	200	100	–	100	133	0,045	27	30
14-9 ¹	200	67	33,5	200	233,5	133	0,2	40	44
9 ¹ -9	200	67	33,5	267	300,5	159	0,12	24	27
9-8	50	–	–	1 400	1 400	273	0,16	8	9
Всього									110
13-12 ¹	200	67	33,5	–	33,5	76	0,095	19	21
12 ¹ -12	200	67	33,5	67	100,5	108	0,13	26	29
12-9	600	400	200	300	500	219	0,07	42	47
9-8	50	–	–	1 400	1 400	273	0,16	8	9
Всього									106

За знайденими значеннями розрахункових витрат і середньою втратою тиску, користуючись номограмою, визначають діаметри газопроводів і дійсні втрати тиску на всіх ділянках мережі низького тиску.

У кільці II сумарні втрати тиску в напівкільцях (первинний розрахунок) за таблицею 2.3.2 дорівнюють 86 і 83 кгс/м² при розрахунковій втраті тиску 120 кгс/м²; нев'язка – більше 15 %.

У зв'язку з цим у кільці II виконують вторинний розрахунок (табл. 2.3.2). При цьому сумарні втрати тиску в напівкільцях дорівнюють 110 і 106 кгс/м². Нев'язка в напівкільцях:

- у кільці I $((120-110)/120)100\% = 9\%$; $((120-105)/120)100\% = 12\%$;
- у кільці II $((120-110)/120)100\% = 9\%$; $((120-106)/120)100\% = 11\%$.

Нев'язка в напівкільцях – менше 10–15 %; діаметри на ділянках підібрані правильно.

Чим вище сумарні втрати тиску на півкільцях, тим менше діаметри газопроводів, тобто зменшується металомісткість і вартість газових мереж.

Далі визначають нев'язки втрат тиску в кільцях мережі:

- у кільці I $((110-105)/110)100\% = 4,5\%$;
- у кільці II $((110-106)/110)100\% = 3,6\%$.

Нев'язки у кільцях – менше 10 %; гідравлічний розрахунок кільцевих мереж виконаний правильно.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гідравліка : навч. посіб. / Л. В. Возняк, П. Р. Гімер, М. І. Мердух, О. В. Паневник. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2012. – 327 с.
2. Вамболь С. О. Технічна механіка рідини і газу : підручник / С. О. Вамболь, І. В. Міщенко, О. М. Кондратенко. – Харків : НУЦЗУ, 2016. – 300 с.
3. Возник Л. В. Гідравліка. Збірник задач і вправ : навч. посіб. / Л. В. Возняк, Р. Ф. Гімер. – Івано-Франківськ : Факел, 2004. – 242 с.
4. Гідравліка: Навчально-методичний комплекс : навч-метод. посіб. / В. І. Дуганець, І. М. Бендера, В. А. Дідур та ін. ; за ред. В. І. Дуганця, І. М. Бендери, В. А. Дідура. – Кам'янець-Подільський : ФОП Сисин О. В., 2013. – 566 с.
5. Завойко Б. М. Технічна механіка рідин і газів: основні теоретичні положення та задачі / Б. М. Завойко, Н. П. Лещій. – Львів : Магнолія, 2004. – 119 с.
6. Возняк М. П. Гідрогазодинаміка : навч. посіб. / М. П. Возняк, Л. В. Возняк. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2001. – 132 с.
7. Луценко В. В. Технічна механіка рідини і газу в тестах і задачах : навч. посіб. / В. В. Луценко. – Рівне : НУВГП, 2015. – 194 с.
8. Константинов Ю. М. Технічна механіка рідини і газу : підручник / Ю. М. Константинов, О. О. Гіжа. – Київ : Вища школа, 2002. – 277 с.
9. Райтер П. М. Контроль складу і витрати газорідинних потоків : конспект лекцій / П. М. Райтер, О. Є. Середюк. – Івано-Франківськ : Факел, 2004. – 124 с.
10. Рогалевич Ю. П. Гідравліка : підручник / Ю. П. Рогалевич ; за ред. П. І. Коваленка. – Київ : Вища школа, 2010. – 432 с.
11. Навроцький Б. І. Механіка рідин : підручник / Б. І. Навроцький, Є. І. Сухін. – Київ : ДІА, 2003. – 416 с.
12. Лаврівський З. В. Технічна механіка рідин та газів : навч. посіб. / З. В. Лаврівський, В. І. Мандрус. – Львів : СПОЛОМ, 2004. – 198 с.

ДОДАТОК А
Зразок титульного аркушу розрахунково-графічної роботи

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

Кафедра нафтогазової інженерії і технологій

РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА
з дисципліни «Гідравліка нафтогазових систем»
на тему «Гідравлічний розрахунок кільцевих трубопровідних систем»

Виконав: студент (-ка): _____

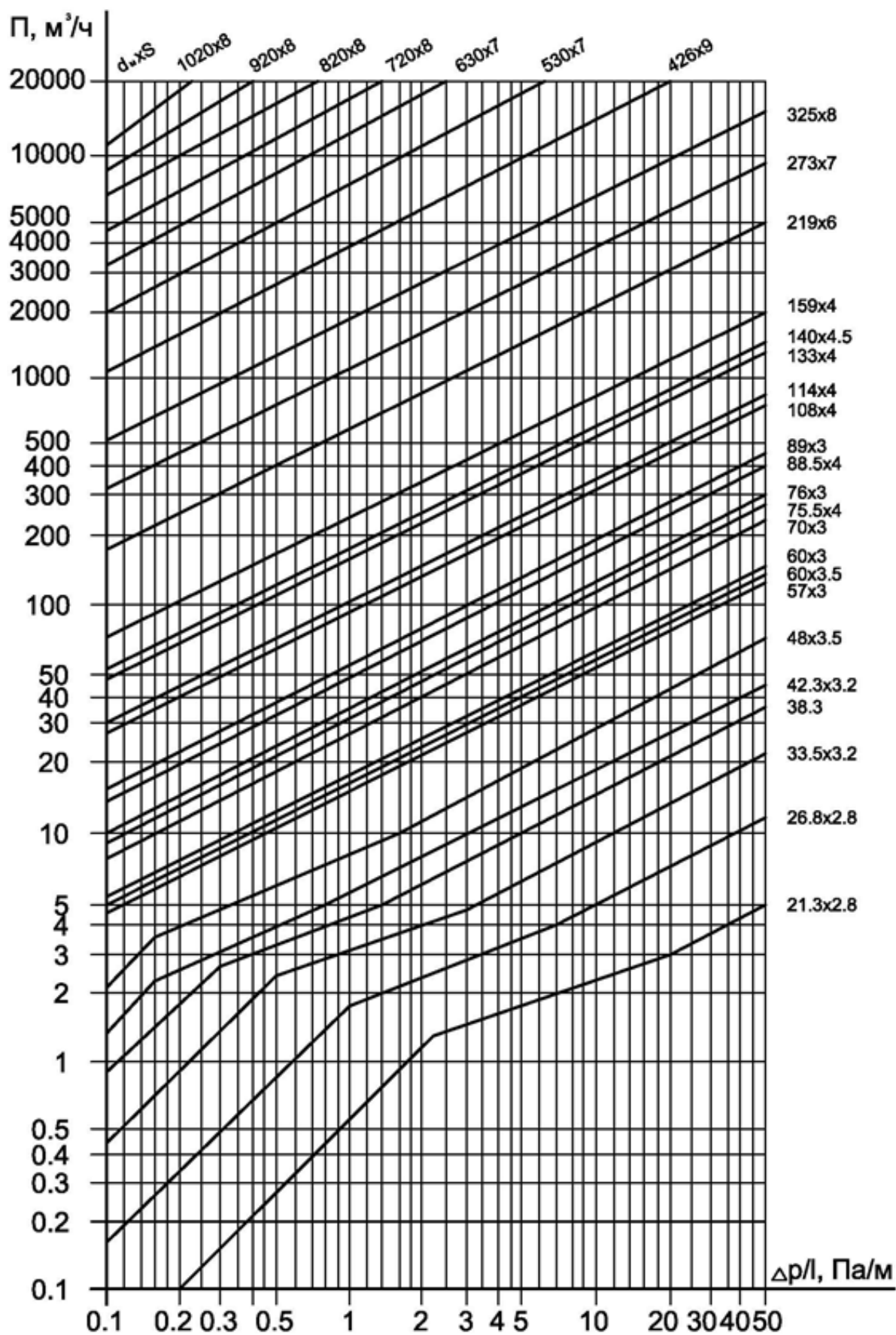
Група _____

Перевірів: асист. каф. НІіТ
Бобловський О. В.

Харків – 2025

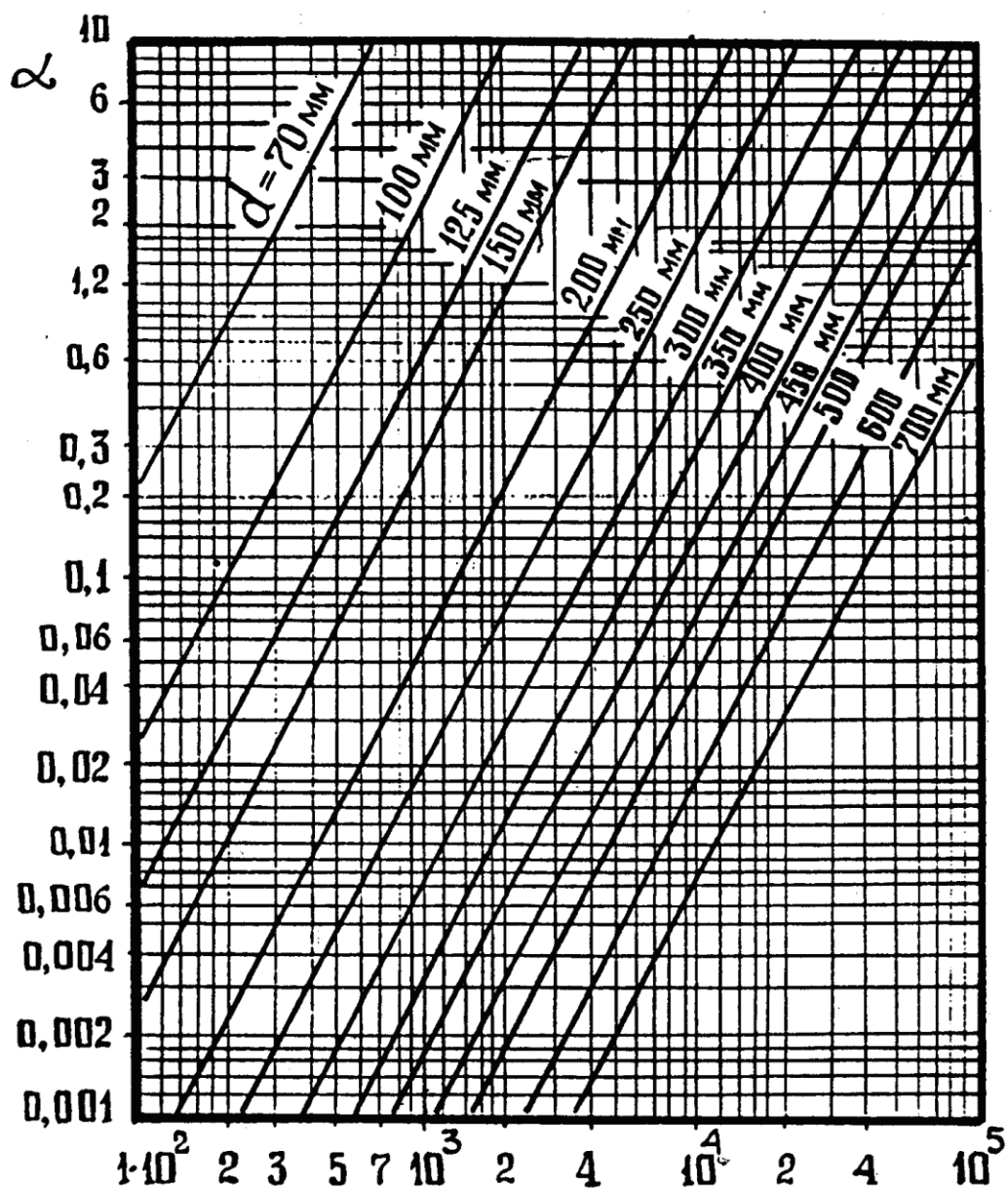
ДОДАТОК Б

Номограма гідралічного розрахунку газових мереж низького тиску

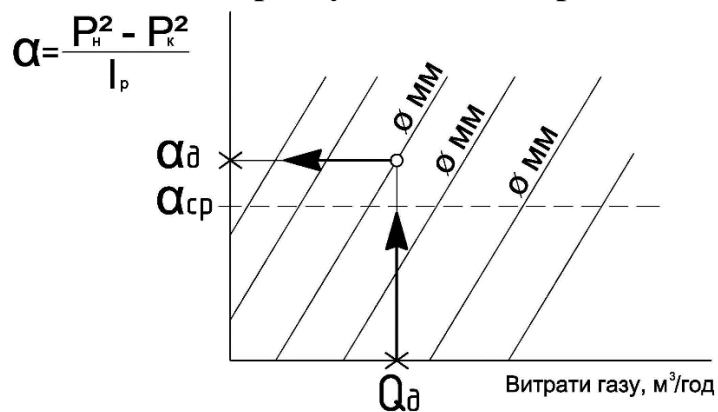


ДОДАТОК В

Номограма гідравлічного розрахунку газових мереж середнього і високого тиску



Ключ до користування номограмою



Електронне навчальне видання

Методичні рекомендації
до самостійної роботи та виконання розрахунково-графічної роботи
з навчальної дисципліни

«ГІДРАВЛІКА НАФТОГАЗОВИХ СИСТЕМ»

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
зі спеціальності 185 – Нафтогазова інженерія та технології,
освітня програма «Нафтогазова інженерія та технології»)*

Укладачі: **РОМАШКО** Олександр Васильович,
БОБЛОВСЬКИЙ Олександр Володимирович

Відповідальний за випуск *К. М. Палєєва*

Редактор *О. В. Михаленко*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2025, поз. 606М

Підп. до друку 19.12.2025. Формат 60 × 84/16.
Ум. друк. арк. 2,1.

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Чорноглазівська, 17, Харків, 61002.
Електронна адреса: office@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 8386 від 14.07.2025.