

**Стринада П.С.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Соломаха А.С.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ГІДРОДИНАМІКА ЗА ПРОТИТЕЧІЇ ПЛІВКИ РІДИНИ ТА ГАЗУ У ВЕРТИКАЛЬНІЙ ТРУБІ

*Авторів даної роботи цікавить тепло та масообмін для ламінарного режиму течії плівки в контактних теплообмінних апаратах з вертикальною трубою в якій відбувається протитечія плівки рідини до висхідної течії потоку газу. Результати цих досліджень будуть показані в наступних публікаціях.*

*У даній статті висвітлена саме гідродинамічна частина досліджень. Вона потрібна для того щоб бути певними, що отримані результати належить саме ламінарному режиму течії плівки. Для цього отримані результати були порівняні з результатами подібних досліджень і зроблено висновок про валідність наших даних.*

*Отже, тепер, коли ми точно визначили що результати досліджень належать ламінарному режиму можемо перейти до досліджень тепло та масообміну.*

*Експериментально визначено перепад тиску для різних витрат повітря та води. Дослідження проводилися на прозорій трубці довжиною 1,4 м та діаметром 34 мм.*

*Для забезпечення точних вимірювань, на вході та виході з труби були встановлені пристрої для вимірювання витрати повітря та води. Змочування поверхні трубки, перехід між режимами течії контролювалось візуально шляхом спостереження, а також за допомогою диференціального манометра. Для кожної комбінації витрат повітря та води було визначено значення перепаду тиску.*

*Отримані результати були порівняні з даними, опублікованими іншими авторами, що досліджували подібні режими течії. Була побудована мапа режимів течії для протитечійного режиму у вертикальній трубці. Ця карта відображає залежність між перепадом тиску та витратами повітря та води, що дозволяє зрозуміти, яким буде режим течії при певних умовах.*

*Додаткові отримані результати розширюють наше розуміння процесів течії двофазного потоку. Вони дозволяють виявити особливості та закономірності у двофазних режимах течії, які можуть бути корисними при проектуванні нових систем та вдосконаленні існуючих технологій.*

*Крім того, отримані дані можуть бути використані для верифікації та підтвердження результатів числових моделей течії двофазних потоків. Це сприяє покращенню точності та достовірності таких моделей, що є важливим у практичних застосуваннях.*

*Результати дослідження також можуть бути використані для розробки оптимальних стратегій контролю та регулювання двофазних систем. Враховуючи витрати повітря та води, можна досягти більш ефективного та енергоефективного управління процесами течії.*

*Отримані дані також можуть бути використані у галузі нафтової та газової промисловості, де двофазні потоки є поширеними. Розуміння режимів течії та їх характеристик дозволяє покращити видобуток, транспортування та обробку нафти та газу, зменшити втрати енергії та підвищити загальну ефективність систем.*

*Отже, результати цього дослідження мають важливе значення як для наукової спільноти, так і для промислових секторів, де працюють з двофазними потоками. Вони відкривають нові можливості для розробки та впровадження інноваційних рішень у цих галузях, сприяючи прогресу і підвищенню ефективності технологій.*

**Ключові слова:** *рідина, плівка, трубка, повітря, протитечія, режими.*

**Постановка проблеми.** Робота направлена на дослідження режиму кільцевого двофазного протитокового газорідинного потоку, який характеризується безперервним газовим ядром.

Газовий потік рухається вгору в середині труби, взаємодіючи з плівкою рідини, яка рухається в протилежному напрямку вниз по стінці труби. Така схема потоку спостерігається в багатьох

пристроях промислового обладнання: системи ядерних реакторів, випарники, газо-рідинні конденсатори, абсорбери, дефлегматори та в нафтогазовій промисловості [1]. Наприклад, в газових свердловинах з конденсатом існують конструкції свердловин для природного газу та газу з вугільних пластів (CSG або CBM для метану вугільних пластів) з кільцевими отворами між зовнішньою трубою (обсадною трубою) і внутрішньою, через яку рідину закачують на поверхню. Зовнішня труба перфорована, щоб дозволити рідинам надходити в стовбур свердловини з пласта [2].

Двофазний потік газ-рідина в трубі є в багато разів складнішим порівняно з гідродинамікою однофазного (лише пари або рідини) через ту саму трубу. Це пояснюється тим, що для двофазного потоку може існувати багато різних способів взаємодії між плівкою рідини та газом, відомих як моделі потоку або режими потоку. Будь-яке явище передачі енергії для двофазного потоку, а саме імпульс, тепло- або масопередача, сильно залежить від існуючого режиму потоку. Режим течії, в свою чергу, залежить від великої кількості параметрів, таких як швидкість і властивості окремих фаз, форма і розмір поперечного перерізу трубопроводу, напрямок потоку відносно сили тяжіння (вгору, вниз або під нахилом) і по відношенню до руху супутніх фаз (прямотечія або протитечія), впливу процесів тепло- та масообміну, тощо. Оскільки режим течії в трубопроводі має важливе значення для розуміння та аналізу двофазної течії, не дивно, що було проведено великий обсяг досліджень для експериментального виявлення режимів течії та їх теоретичного прогнозування.

Отже, теоретичні прогнози режимів потоку є важливими як для проектування, так і для безперебійної та безпечної роботи обладнання а також для прогнозування планових ремонтних та сервісних робіт. Тим не менш, такі прогнози важко зробити через складну природу явищ двофазної течії. Крім того, достовірність цих передбачень може бути перевірена лише шляхом ретельно проведених експериментів.

**Аналіз останніх публікацій.** У плівкових контактних теплообмінниках, з протитечією плівки рідини що стікає вниз по стінці та з висхідним потоком повітря у вертикальній трубі існує три режими двофазного ламінарного потоку плівки (рис. 2):

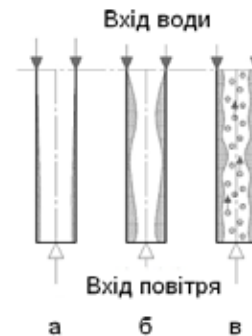
1) При низьких числах Рейнольдса плівка, рухається під дією сили тяжіння майже без хвиль (рис. 2, а).

2) При поступовому збільшенні швидкості повітря на поверхні плівки виникають хвилі (рис. 2, б).

3) При подальшому збільшенні швидкості руху газу з поверхні плівки починаються зриватися краплі рідини та рухатись в напрямку потоку повітря (рис. 2, в).

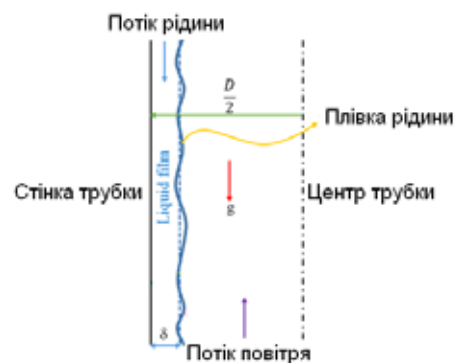
Якщо швидкість газу досить висока, вся рідина починає рухатися вгору. В такому режимі коректна робота гравітаційного плівкового теплообмінника неможлива.

Гідродинамічні характеристики всіх режимів детально досліджено в багатьох роботах, зокрема в [3–7].



**Рис. 1.** Режими течії водяної плівки та повітря у вертикальній трубі для випадку ламінарної низхідної течії: а – спадаючий плівковий потік без хвиль; б – хвилі на поверхні рідини; в – відрив крапель з поверхні плівки з подальшим переходом в режим захлинання

Межа розділу газ-рідина кільцевого потоку є нерегулярною через наявність хвиль, структур, які в літературі називаються хвилями збурення та бризками, як показано на рисунку 2.



**Рис. 2.** Зображення плівки рідини в кільцевій структурі потоку

Як видно на рисунку 2, для кільцевого двофазного потоку у вертикальній трубі поверхня плівки рідини часто складається з бризок, хвилювих збурень і служить тонкою стінкою для потоку газового ядра із захопленими краплями з хвилювих гребнів. Кілька термінів часто використовуються в промисловості для характеристики потоку,

включаючи миттєву товщину плівки, середню товщину плівки та локальну максимальну товщину [8]. Товщина плівки рідини визначається конструкцією системи труб і параметрами потоків рідин, які включають швидкості, напрямки руху та фізичні властивості рідини і газу. Середня товщина плівки була широко досліджена в минулому, і за останні 20 років удосконалені експериментальні методи та процедури дозволили отримати чітке уявлення про її поведінку

Межа розділу газ-рідина у вертикальному низхідному кільцевому потоці є неоднорідною по колу щодо хвильової активності. Форма межі розділу залежить від швидкостей потоку фаз, і в деяких роботах вона була пов'язана з шорсткістю труби [9].

Крім того, було помічено, що хвилі збурень залучають рідину в потік ядра через взаємодію між рідкою та газовою фазами. Захоплення рідини впливає на міжфазне тертя зсуву, яке в свою чергу впливає на падіння тиску та двофазну передачу імпульсу, маси та тепла [10–12]. Крім того, було помічено, що збурена хвиля за інерцією рухається разом із плівкою рідини з більшою швидкістю, ніж біля стінки.

В роботах [14, 15] було досліджено експериментальну характеристику рідкої плівки, щоб оптимізувати моделі та сприяти вдосконаленню процесів моніторингу, які гарантують забезпечення необхідного потоку в нафтогазовій промисловості.

Експерименти проводилися в установі Multilab у Центрі досліджень багатофазного потоку Федерального технологічного університету Парани. Розроблено установку для проведення вимірювань у вертикальному низхідному кільцевому потоці. Установка має внутрішній діаметр 26 мм і тестову секцію довжиною 14 м, виготовлену з прозорого плексигласу. Потік аналізується в тестовій секції, для вимірювання параметрів плівка використано подвійний кільцеподібний безконтактний датчик провідності (CS) і безконтактний датчик WMS 16 x 16 для контролю рівня води. Датчики можуть отримувати важливу інформацію з рідкої плівки та її розподілу. Частота збору даних становила 10 кГц і 2 кГц для CS і WMS відповідно з часом дискретизації 30 с. Вода з бака закачується в контурну лінію, де витратомір Коріоліса контролює масову витрату рідини, густину і температуру. Для отримання кінематичної в'язкості води в залежності від температури використовували емпіричну кореляцію [16].

Для введення фаз у основну секцію труби використовувався вхідний отвір із концентричними трубами. Експериментальна оцінка включає тридцять п'ять комбінацій поверхневих швидкостей

газу і рідини у діапазоні від 0 м/с до 20 м/с і від 0,05 м/с до 0,25 м/с відповідно. Для різних витрат було побудовано карту потоків (див. рис. 3). Усі параметри та збір даних реєструвалися та контролювалися диспетчерським управлінням, створеним як платформа LabVIEW.

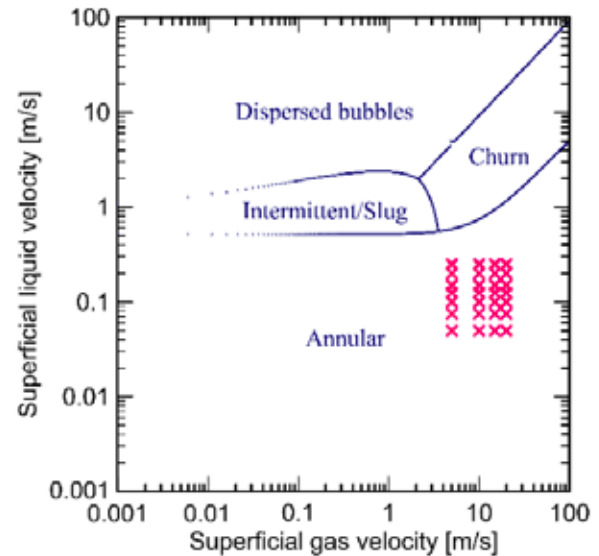


Рис. 3. Експериментальні комбінації поверхневих фазових швидкостей, нанесені на карту потоку [16]

Таким чином, основним методом дослідження поведінки двофазного потоку у вертикальній трубці залишається експериментальне дослідження. Тому в даній роботі було зібрано стенд для дослідження гідродинаміки двофазного потоку.

**Експериментальний стенд.** Принципова схема установки контактного теплообмінника плівкового типу з вертикальною трубкою наведена на рисунку 4.

Основним елементом експериментального стенду є вертикальна трубка 1 з внутрішнім діаметром 34 мм і довжиною 1,4 м. Зовнішня сторона трубки ізольована. Схема руху протіччійна: плівка рідини, яка взаємодіє з набігаючим потоком повітря, стікає по поверхні внутрішньої стінки трубки. Рідина з колектора 2 перекачується циркуляційним насосом 3 до нагрівача 4. рідина через розподільувач рідини (спринклер) 5 розподіляється у вигляді плівки по внутрішній поверхні трубки 1 і надходить у колектор 2. Вентилятор 8 нагнітає повітря в трубку 1. Утворена пароповітряна суміш надходить у поверхневий конденсатор 6, де знижується вологість повітря, а потім вентилятором 8 по ротаметру повітря 11 подається в колектор 2. Температура рідини на вході в розподільувач рідини 5 вимірюється хромель-копелевою термопарою.

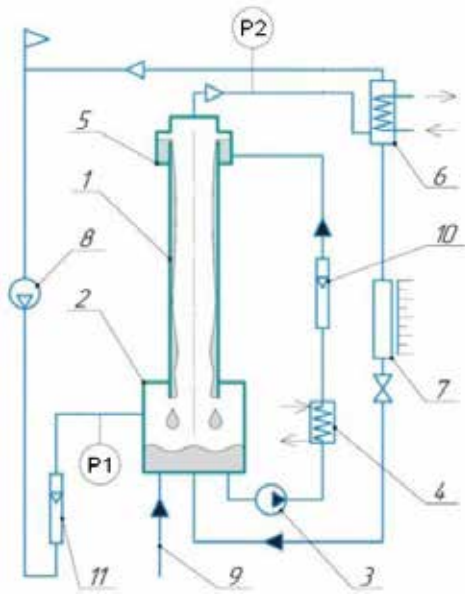


Рис. 4. Схема експериментального стану для дослідження тепломасообміну в контактному теплообміннику плівкового типу з вертикальною трубою: 1 – вертикальна трубка, 2 – колектор, 3 – циркуляційний насос, 4 – нагрівач, 5 – розподільувач рідини, 6 – конденсатор, 7 – мірний циліндр, 8 – вентилятор, 9 – лінія подачі, 10 – ротаметр рідини, 11 – ротаметр повітря

Втрата тиску вимірюється мікроманометром типу ММН-2400. Розподільник повітря та спосіб подачі води забезпечує осесиметричний розподіл швидкості повітря на вході до трубки. Похибка вимірювання втрат тиску  $\pm 4-6\%$  від зафіксованого значення.

**Результати дослідження.** Дослідження режимів течії в активній зоні апарату та умов їх виникнення має велике значення для визначення оптимальних режимів роботи, при яких буде вирішена задача контактної теплообміну за одночасного забезпечення мінімальних питомих енергетичних витрат.

Ці дослідження були проведені на моделі контактної теплообмінного апарату з прозорими корпусом та вертикальною трубою, що дозволило візуалізувати режими течії в трубі та фіксувати їх за допомогою фотоапарата. Внутрішній діаметр труби становить 34 мм, довжина 140 мм, витрата рідини:

1.  $m_b = 140$  кг/год
2.  $m_b = 90$  кг/год
3.  $m_b = 8$  кг/год

За результатами досліджень маємо графік залежності перепаду тиску у вертикальній труб від швидкості повітря, рисунок 5.

Зі збільшенням приведеної швидкості повітря в трубі поступово зростає втрата тиску в апараті. При досягненні певної критичної швидкості відбувається різке зростання втрат тиску (так зване захливання). При подальшому збільшенні витрати повітря відбувається розворот течії плівки. Оскільки подача води відбувається зверху трубки – робота нашого гравітаційного апарату в такому режимі неможлива.

Далі розглянуті наступні характерні режими течії двохфазного потоку:

**Кільцевий режим** ( $w_{пов} < 8$  м/с)

Характерний при малих швидкостях повітря. Також залежить від витрати води.

Зона кільцевого режиму течії показана на рисунку 5 суцільними тонкими лініями до червоних точок при:

1.  $m_b = 140$  кг/год при  $w_{пов} < 8,5$  м/с
2.  $m_b = 90$  кг/год при  $w_{пов} < 9$  м/с
3.  $m_b = 8$  кг/год при  $w_{пов} < 10$  м/с

Вода плавно стікає по трубці. Втрати тиску в апараті мінімальні. Зі збільшенням витрат повітря на поверхні води з'являються хвилі. Втрати тиску повільно зростають. Експериментальні дані добре співпадають (рис. 3, рис. 6).

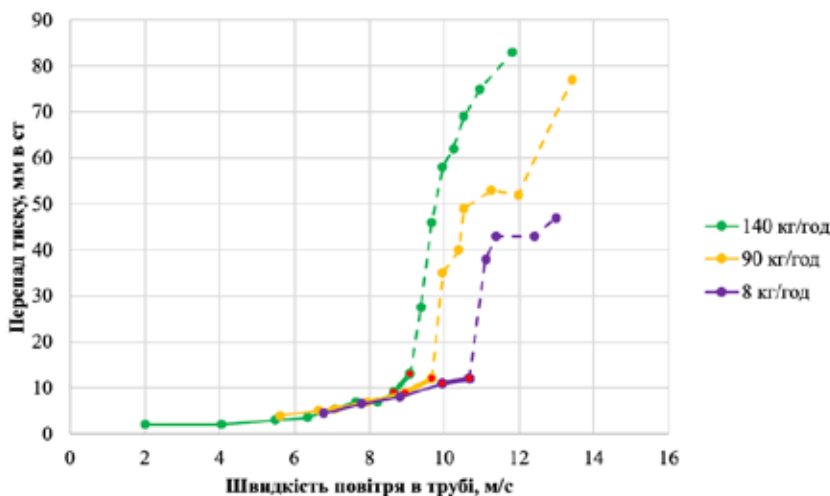


Рис. 5. Залежність перепаду тиску в трубці від швидкості повітря

**Кільцевий режим з відривом крапель**

При таких вхідних параметрах повітря починає захоплювати воду з гребенів хвиль у вигляді струменів і окремих крапель, які здебільшого сепаруються на стінках труби і стікають вниз у резервуар. Окремі краплі виносяться з потоком повітря. Спостерігається несуттєве збільшення гідравлічних витрат у порівнянні з першим режимом.

Зона кільцевого режиму течії з відривом крапель показана на рисунку 5 жирними суцільними лініями між червоними точками при:

1.  $m_b = 140$  кг/год при  $w_{пов} 8,5...9$  м/с
2.  $m_b = 90$  кг/год при  $w_{пов} 9...9,7$  м/с
3.  $m_b = 8$  кг/год при  $w_{пов} 10...10,7$  м/с

**Режим захлинання**

В результаті формується шар води, через який барботує повітря, також місцями спостерігається пересихання плівки рідини на стінці труби. Втрати тиску, при цьому, стрибкоподібно зростають (рис. 5). Виникає захлинання потоку. Для цього режиму характерні пульсації тому точні виміри ускладненні. Цю зону треба сприймати як таку, в якій немає лінійної залежності. Через пульсації для певної області визначення швидкості повітря  $D(y)$  може бути будь-яка область значень перепаду тиску  $E(y)$ , але в межах не менше за втрати тиску в точці переходу з кільцевого режиму з відривом крапель до режиму захлинання та не більше за втрати тиску в точці переходу з режиму захлинання до режиму з розворотом потоку.

Зона режиму захлинання течії показана на рисунку 5 штриховими лініями після червоних точок при:

1.  $m_b = 140$  кг/год при  $w_{пов} > 9$  м/с
2.  $m_b = 90$  кг/год при  $w_{пов} > 10,7$  м/с
3.  $m_b = 8$  кг/год при  $w_{пов} > 10,7$  м/с

**Руйнування розворот потоку течії**

При зростанні приведеної швидкості повітря в трубі до значень  $> 12$  м/с, потік повітря прориває водяний шар. Вода взагалі не потрапляє в трубку. Якби вода в трубку подавалася не з її верхнього кінця, а посередині то можна було б спостерігати розворот плівки вгору і її рух в кільцевому режимі. Тому на рисунку 5 немає зони з режимом розвороту течії. Точна швидкість повітря при якій настає цей режим також не визначалась.

**Порівняння з іншими роботами.** Основною причиною різкого стрибка тиску на (рис. 5) є «захлинання» («flooding») потоку, коли швидкість газу досягає значення, при якому починається зміна напрямку руху плівки рідини. Поєднання режимних та геометричних параметрів контактного апарату, при яких реалізується

режим «захлинання», залежить від витрат рідкої та газоподібної фаз, геометрії та орієнтації робочої ділянки. Явище «захлинання» досліджувалося багатьма авторами [5–16].

Отримані результати було порівняно з результатами інших авторів. Зокрема на слайді показано гідродинамічну карту режимів з класичної роботи Hewitt [1] а також вона є в монографії [17].

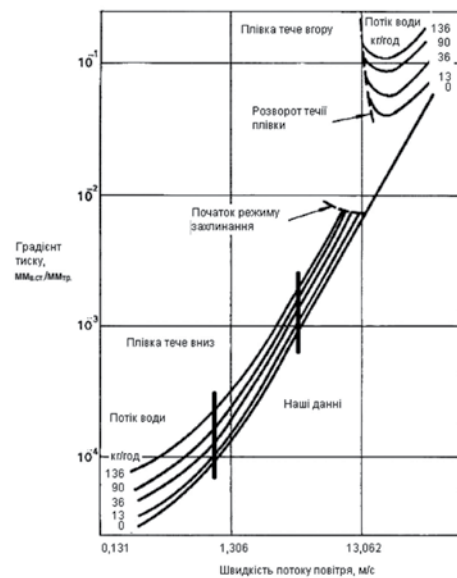
На рисунку 6 зображено графік залежності режиму течії плівки рідини від:

1. Витрати води в кг/год. Показано жирними кривими
2. Швидкості повітря в м/с. Горизонтальна вісь
3. Градієнту тиску мм водяного водяного стовпчика до мм довжини трубки. Вертикальна вісь. Для конкретного графіка довжина трубки 90 см, діаметр 32 мм.

На графіку чітко видно три режими течії плівки:

1. Ламінарний (Плівка тече вниз)
2. Режим захлинання (З частковим пересиханням)
3. Розворот плівки (Плівка тече вгору, характер течії схожий з ламінарним)

Вертикальними жирними лініями на графіку показано межі нашого дослідження, як видно з графіку всі результати потрапляють у діапазон ламінарної течії плівки.



**Рис. 6. Режими течії водяної плівки у вертикальній трубі**

**Висновки.** Були проведені дослідження гідродинаміки для трубки з діаметром 34 мм та довжиною 1,4 м, визначено основні режими течії плівки для ламінарного режиму.

Отримані результати в діапазоні наступних режимів течії:

1. Кільцевий режим
2. Кільцевий режим з відривом крапель
3. Режим захлинання

Виконано порівняння отриманих експериментальних даних з іншими авторами. Наші

результати мають достатню збіжність з результатами інших авторів в подібних експериментах. Отже можемо стверджувати що наші данні є валідними.

Отримані результати дозволяють перейти до дослідження процесу тепло та масо обміну, які будуть висвітлені в наступних публікаціях.

### Скорочення:

- $J_L$  – швидкість рідини  
 $J_G$  – швидкість газу  
 $DW$  – амплітуда хвиль  
 $D(y)$  – область визначень  
 $D(x)$  – область значень

### Список літератури:

1. N. S. Hewitt, G F and Hall-Taylor, *Annular Two-Phase Flow*. Oxford: Pergamon Press, 1970.
2. B. Towler, M. Firouzi, J. Unterschultz, W. Rifkin, A. Garnett, H. Schultz, J. Esterle, S. Tyson, K. Witt, An overview of the coal seam gas developments in Queensland, *J. Natural Gas Sci. Eng.* 31 (2016) 249–271.
3. Jie Wan, Wan Sun, Jian Deng, Liang-ming Pan, Shu-hua Ding (2021) Experimental study on air-water countercurrent flow limitation in a vertical tube based on measurement of film thickness behavior. *Nuclear Engineering and Technology* 53 (6): 1821-1833. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.12.019>
4. P. A. Barabash, A. S. Solomakha, A. I. Gurov, O. A. Panchenko (2020) Regimes of motion of water-air flow in a short vertical tube with the underfeed of phases. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics* 93 (2): 443-451. <http://dx.doi.org/10.1007/s10891-020-02139-y>
5. Benjamin Wu, Mahshid Firouzi, Thomas E. Rufford, Brian Towler (2019) Characteristics of counter-current gas-liquid two-phase flow and its limitations in vertical annuli. *Experimental Thermal and Fluid Science* 109 109899. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.109899>
6. S. Ghosh, D.K. Pratihar, B. Maiti, P.K. Das (2012) Identification of flow regimes using conductivity probe signals and neural networks for counter-current gas-liquid two-phase flow. *Chemical Engineering Science* 84 417-436. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2012.08.042>
7. S. Ghosh, D.K. Pratihar, B. Maiti, P.K. Das (2013) Automatic classification of vertical counter-current two-phase flow by capturing hydrodynamic characteristics through objective descriptions. *International Journal of Multiphase Flow* 52 102-120. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2012.12.007>
8. Xue Y, Stewart C, Kelly D, Campbell D, Gormley M. Two-phase annular flow in vertical pipes: a critical review of current research techniques and progress. *Water* 2022;14:3496.
9. R. J. Belt, J. M. C. Van't Westende, and L. M. Portela, "Prediction of the interfacial shear-stress in vertical annular flow," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 35, no. 7, pp. 689–697, 2009, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2008.12.003.
10. G. B. Wallis, "Annular Two-Phase Flow Part 1 : A Simple Theory," no. 25, pp. 59– 72, 1970.
11. M. Ishii and M. A. Grolmes, "Inception Criteria for Droplet Entrainment in Two Phase Concurrent Film Flow," vol. 21, no. (MARCH, 1975), 1975.
12. B. J. Azzopardi, "Drops in annular two- phase flow," *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 23, no. 97, pp. 1–53, 1997.
13. I. N. Alves, E. F. Caetano, K. Minami, and O. Shoham, "Modeling Annular Flow Behavior for Gas Wells," 1991.
14. J.-M. le Corre, "Phenomenological model of disturbance waves in annular two-phase flow," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 151, p. 104057, Jun. 2022, doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2022.104057
15. P. J. Pritchard, *Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics*, 8th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 2011.
16. Yehuda. Barnea, Dvora; Shoham, Ovadia and Taitel, "Flow Pattern Transition for Vertical Downward Two-Phase Flow," 1982.
17. Bezrodny M., "Гідродинаміка і тепломасообмін в контактних газо-крапельних утилізаторах теплоти." 2017, <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/29387>

**Solomakha A.S., Strynada P.S. HYDRODYNAMICS FOR ANTI-FLOW FILMS OF LIQUID AND GAS IN A VERTICAL PIPE**

*The authors of this work are interested in heat and mass transfer in the laminar flow regime of a film in contact heat exchangers with a vertical tube, where there is countercurrent flow of the liquid film to the upward flow of gas. The results of these investigations will be presented in upcoming publications.*

*This article specifically focuses on the hydrodynamic part of the research. It is necessary to ensure that the obtained results belong to the laminar flow regime of the film. To achieve this, the obtained results were compared with the results of similar studies, and a conclusion was drawn regarding the validity of our data.*

*Now that we have precisely determined that the research results correspond to the laminar flow regime, we can proceed with the investigation of heat and mass transfer.*

*The pressure drop was experimentally determined for various air and water flow rates. The experiments were conducted on a transparent pipe with a length of 1.4 m and a diameter of 34 mm.*

*To ensure accurate measurements, devices for measuring the air and water flow rates were installed at the inlet and outlet of the pipe. The wetting of the pipe surface and the transition between flow regimes were visually controlled through observation and by using a differential manometer. The pressure drop values were determined for each combination of air and water flow rates.*

*The obtained results were compared with data published by other authors who investigated similar flow regimes. A flow regime map was constructed for the countercurrent flow regime in the vertical pipe. This map illustrates the relationship between pressure drop and air and water flow rates, providing insights into the flow regime under specific conditions.*

*The additional results obtained expand our understanding of the two-phase flow processes. They reveal characteristics and regularities in two-phase flow regimes that can be valuable for designing new systems and improving existing technologies.*

*Furthermore, the obtained data can be used for verification and validation of numerical models for two-phase flow. This contributes to enhancing the accuracy and reliability of such models, which is crucial for practical applications.*

*The research findings can also be applied in the development of optimal control and regulation strategies for two-phase systems. By considering air and water flow rates, more efficient and energy-effective management of flow processes can be achieved.*

*The data obtained can be particularly useful in the oil and gas industry, where two-phase flows are prevalent. Understanding flow regimes and their characteristics can improve oil and gas extraction, transportation, and processing, reduce energy losses, and enhance overall system efficiency.*

*Therefore, the results of this study have significant implications for both the scientific community and industrial sectors working with two-phase flows. They open up new opportunities for developing and implementing innovative solutions in these fields, promoting progress and improving technological efficiency.*

**Key words:** liquid, film, tube, air, counterflow, modes.