

ОЦІНКА ВПЛИВУ ДОТИЧНИХ НАПРУЖЕНЬ ТА ЇХ ПУЛЬСАЦІЙ НА ПРОПУСКНУ ЗДАТНІСТЬ ГАЗОПРОВОДУ

С.М. Стецюк

УкрНДІгаз, 61010, м. Харків, Красношкільна наб. 20, тел. (057) 7304685;
e-mail: ukrniigaz@ukrpost.net, sstetsuk@gmail.com

Знання основних закономірностей руху газорідних сумішей по трубах і уміння правильно розрахувати гідравлічні втрати й теплообмін є необхідними як для спорудження, так і для експлуатації промислових та міжпромислових газопроводів. Тому дослідження гідродинаміки і теплообміну двофазних потоків у газопроводах і розроблення методів їх розрахунку представляє актуальну для інженерної практики задачу. Відомо, що при різних товщинах плівки відхилення дослідних даних від розрахункових можуть досягати 100%. У роботі проведені дослідження дотичного напруження та пульсації на стінці газопроводу при кільцевому русі газорідної суміші, встановлено їх вплив на гідравлічний опір. Отримало подальший розвиток і експериментальне підтвердження фізичне явище обмеження пропускної здатності промислових та міжпромислових газопроводів за наявності рідинної фази.

Ключові слова: промисловий газопровід, двофазний потік, гідравлічний опір, дотичне напруження, транспортування.

Знание основных закономерностей движения газожидкостных смесей по трубам и умение правильно рассчитать гидравлические потери и теплообмен являются необходимыми как для сооружения, так и для эксплуатации промышленных и межпромышленных газопроводов. Поэтому исследования гидродинамики и теплообмена двухфазных потоков в газопроводах и разработка методов их расчета представляет актуальную для инженерной практики задачу. Известно, что при различных толщинах пленки отклонения опытных данных от расчетных могут достигать 100%. В работе проведены исследования касательного напряжения и пульсации на стенке газопровода при кольцевом движении газожидкостной смеси, установлено их влияние на гидравлическое сопротивление. Получило дальнейшее развитие и экспериментальное подтверждение физическое явление ограничения пропускной способности промышленных и межпромышленных газопроводов при наличии жидкости.

Ключевые слова: промышленный газопровод, двухфазный поток, гидравлическое сопротивление, касательное напряжение, транспортировка.

The knowledge of the basic laws of gas-liquid mixtures motion and the ability to calculate the hydraulic losses of and heat transfer are necessary for construction and operation of industrial gas pipelines. Therefore, the study of hydrodynamics and heat transfer of two-phase flow in pipelines and the development of methods for their calculation is relevant for the task of engineering practice. It is known that, in different film thickness the deviation of the experimental data from the calculated data can reach 100%. Performed are in the paper the researches the shearing strength and surging on the pipe wall during the gas-liquid mixture circular movement and found is their influence on the hydraulic resistance. Further developed are the physical phenomenon of constraint on through capacity in industrial pipelines in the presence of liquid phase.

Key words: industrial pipeline, biphasic flow, hydraulic resistance, shearing strength, gas transport

У сучасних системах транспортування нафти, газу і конденсату, в установках регазифікації зрідженого природного газу, у технологічних апаратах, застосовуваних у хімічній і нафтопереробній промисловості, енергетиці та інших галузях все більшу роль відіграють двофазні потоки.

Із запровадженням трубопроводів, які транспортують газорідні суміші, перед сучасною гідродинамікою постали нові завдання, пов'язані з вивченням механізму руху двофазних потоків.

Знання основних закономірностей руху газорідних сумішей по трубах і уміння правильно розрахувати гідравлічні втрати і теплообмін є необхідними як для спорудження, так і для експлуатації двофазних технологічних систем.

Тому дослідження гідродинаміки і теплообміну двофазних потоків у газопроводах і розробка методів їх розрахунку представляє актуальну для інженерної практики задачу.

Серед відомих і найчастіше застосовуваних на практиці методів підвищення ефективності роботи газопроводів є вибір оптимальних режимів роботи системи і методи очистки внутрішньої порожнини газопроводів із застосуванням очисних пристроїв. Але практика експлуатації і обслуговування промислових і міжпромислових газопроводів свідчить, що в умовах роботи наших газотранспортних систем такі методи дають можливість підвищити ефективність не більше, ніж на 3-5 %, що не може задовольняти умови їх ефективної експлуатації і використання таких пристроїв не завжди можливе. Збільшення періодичності проведення процесу очистки призведе до додаткових затрат і в кінцевому випадку не дасть змоги вирішити проблему.

Скорочення втрат на транспортування газу є одним з перспективних напрямків енергозбереження в газопровідному транспорті, яке сьогодні набуло особливої актуальності. Це зумовлено такими причинами:

- зростання ціни на газ;
- значний обсяг старих основних фондів, який постійно зростає;
- переважна більшість вітчизняних родовищ перейшли в стадію падаючого видобутку;
- розробка нових родовищ потребує значних інвестицій.

Таким чином, ще більше загострилась проблема досліджень властивостей газорідних сумішей і їх вплив на пропускну здатність промислових і міжпромислових газопроводів. Працюючи над даною проблемою, проведено дослідження [1-5], з яких зроблено висновок, що при різних товщинах плівки відхилення дослідних даних від розрахункових можуть досягати 100 %. Це вказує на необхідність накопичення експериментальних даних з гідравлічного опору в кільцевому потоці. Корисну інформацію в цьому напрямі дає вивчення дотичних напружень на стінці трубопроводу і його пульсації.

Основною особливістю суцільних моделей руху газорідних сумішей в трубах є визначення дотичного напруження на стінці труби за такою самою формулою, що і для однофазного потоку [6]:

$$\tau_{\text{см}} = \frac{\Delta PR}{\Delta z 2}, \quad (1)$$

де ΔP – перепад тиску по довжині експериментальної ділянки трубопроводу;

R – радіус трубопроводу;

Δz – осьова координата трубопроводу.

Для однофазних потоків прийнята гіпотеза про прямолінійну залежність дотичних напружень по перерізі потоку. Справедливість цієї гіпотези неодноразово перевірялась експериментально, і використання її для однофазного потоку не викликає сумніву.

Перевірити цю гіпотезу для кільцевого двофазного потоку дуже важко. Тому будь-які відомості про зміну дотичних напружень на стінці труби мають інтерес, оскільки дають змогу виявити деякі фізичні особливості, характерні для руху двофазних сумішей.

Інтерес до безпосередніх замірів дотичного напруження особливо збільшився після публікації роботи Брауера [7], який свідчить, що при ламінарному хвильовому режимі стікання рідини в наявності є значні відмінності дотичних напружень, знайдених дослідним і розрахунковим шляхом.

Вимірювання дотичного напруження на стінці здійснювалось на повітряно-масляних сумішах у вертикальних і горизонтальних трубах із внутрішнім діаметром 15,2 мм за різних швидкостей суміші і витратного вмісту рідини (рис. 1). Давач встановлювався на відстані більше 150 діаметрів від входу суміші в трубу, тобто потік в місці вимірювання дотичного напруження можна вважати незмінним. Вимірювання дотичного напруження у вертикальній трубі, в якій плівка рідини розподіляється рівномірно по периметру труби, проводились в одній точці, а в горизонтальній трубі вимірювання проводили за різних положень давача по периметру.

В наших дослідах заміри локального дотичного напруження на стінці здійснювались за допомогою теплового плівкового давача 5532 в комплекті з термоанемометром фірми “Діза”. Робіт з використанням термоанемометра для подібних вимірювань в літературі знайти не вдалось, відомі лише дані з вимірювання локального дотичного напруження на стінці у двофазному потоці електродифузійним методом.

На рис. 2, 3 відображено результати вимірювань локального дотичного напруження на стінці в горизонтальній трубі при різних швидкостях суміші, витратних вмістах рідини і в'язкості рідини. Як видно з рисунків епюри локального дотичного напруження не симетричні відносно осі труби. Із зменшенням $1-\beta$ асиметрія збільшується.

Розглянемо вплив витрати рідини на дотичне напруження. Із збільшенням витрати рідини при постійній швидкості суміші, коли $1-\beta$ збільшується, здійснюється розвиток кільцевого режиму руху суміші.

При $1-\beta=0,0003$ візуально спостерігався роздільний режим руху з виносом рідини. Цьому режиму відповідає епюра з найбільш яскраво вираженою асиметрією і найменшою величиною дотичного напруження на стінці. При цьому режимі давач був у вертикальному положенні і локальне дотичне напруження точки рівнялось нулю. Збільшення $1-\beta$ сприяє збільшенню товщини плівки на верхній утворюючій труби. При цьому плівка і локальне дотичне напруження спрямовуються до більш рівномірного розподілу по периметру труби.

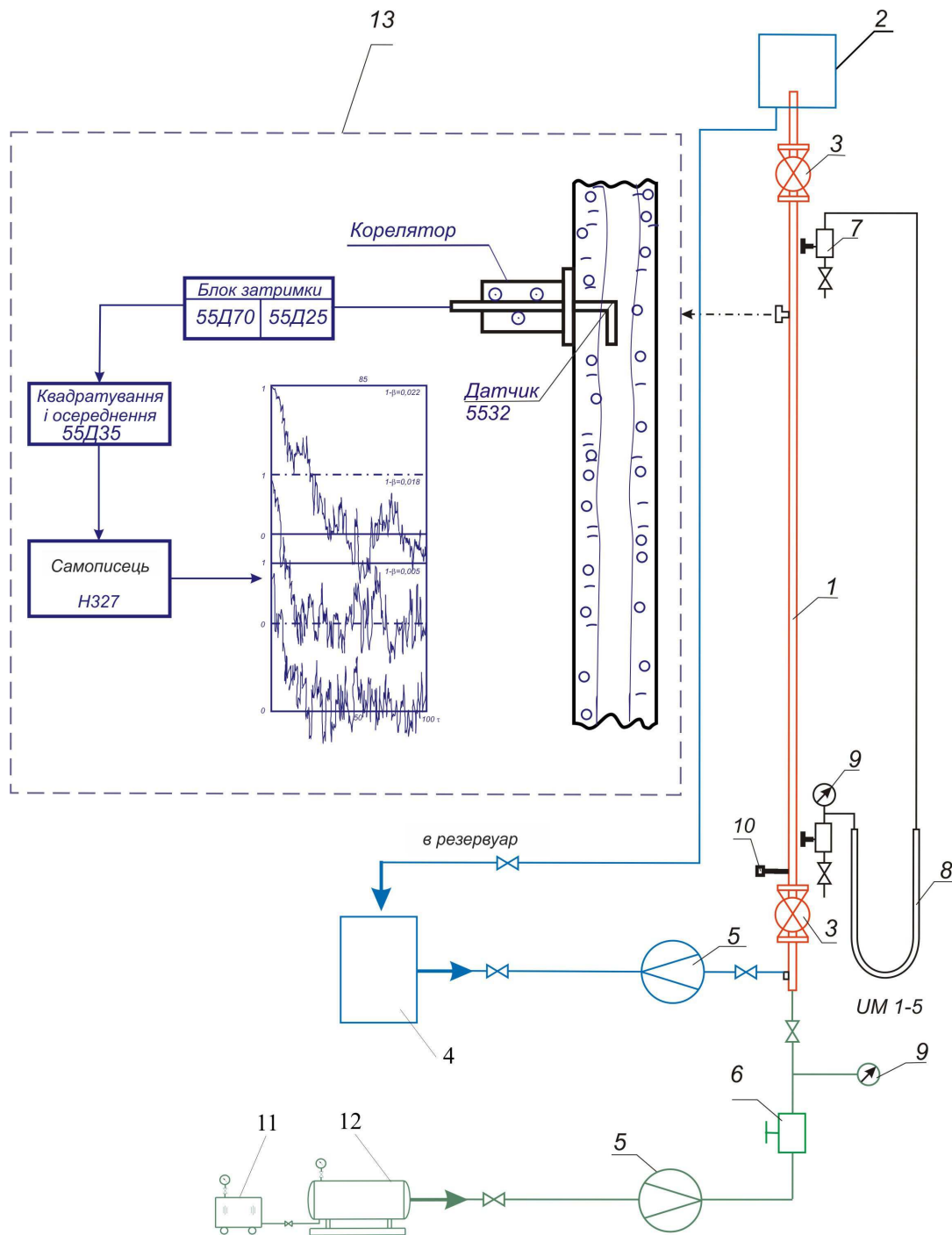
При $1-\beta=0,012$ спостерігається кільцевий режим з рівномірно розподіленою по периметру труби плівкою, сильно насичену повітрям. Аналогічні явища спостерігаються і для режимів, епюри яких зображено на рис. 2. Збільшення швидкості у кожному випадку сприяло утворенню вісесиметричного руху плівки по периметру труби.

Слід зазначити, що максимальне значення локального напруження має місце при в'язкості

рідини $\mu_1 = 0,104 \frac{H \cdot c}{m^2}$, відповідає датчику,

розташованому під кутом 45° . Рідина розподілялась у нижній утворюючій труби місяцеподібно. В тій області потоку датчик знаходився під дією пульсації хвиль на поверхню розподілу. Як видно з рис. 2, із зменшенням в'язкості рідини дотичне напруження на стінці зменшується, а його максимальне значення зміщується в сторону більшого кута.

Дослідні дані (рис. 3) свідчать, що найбільш задовільний збіг величин дотичного напруження, отриманих різними методами, має місце при невеликій амплітуді хвиль поверхні плівки. Із збільшенням швидкості суміші і витратного вмісту рідини швидкість плівки рідини зростає і плівка насичується маленькими бульбашками повітря. В таких випадках $\tau_{\text{розр}}$ перевищує 30%. Це можна пояснити тим, що умови роботи датчика відрізняються від тарованих. Тому при вимірюванні дотичного напру-



1 – експериментальна труба; 2 – сепаратор; 3 – відсікаючий кран; 4 – бак для масла (конденсат); 5 – ротаметр; 6 – редуктор; 7 – роздільна посудина; 8 – U-подібний манометр; 9 – взірцевий манометр; 10 – термометр; 11 – компресор; 12 – ресивер, 13 – прилади для вимірювання дотичного напруження та його пульсацій на стінці трубопроводу

Рисунок 1 – Схема експериментальної установки

ження плівковим датчиком і термоанемометром дуже важливим є проведення тарування давача за умов, наближених до робочих.

На рис. 4 відображено порівняння середнього дотичного напруження на стінці, що вимірюється термоанемометром і визначається за

формулою $\tau = \frac{\Delta P R}{\Delta z \cdot 2}$, і вимірювань перепаду тиску по довжині труби. Середнє дотичне на-

пруження на стінці в горизонтальній трубі визначалось інтегруванням по периметру труби його локальних значень.

Як видно з рис. 4, в більшості випадків збігів заміряного дотичного напруження з розрахунковим є задовільним, що вказує на можливість використання формули (1) при розрахунку дотичного напруження в кільцевому режимі руху суміші.

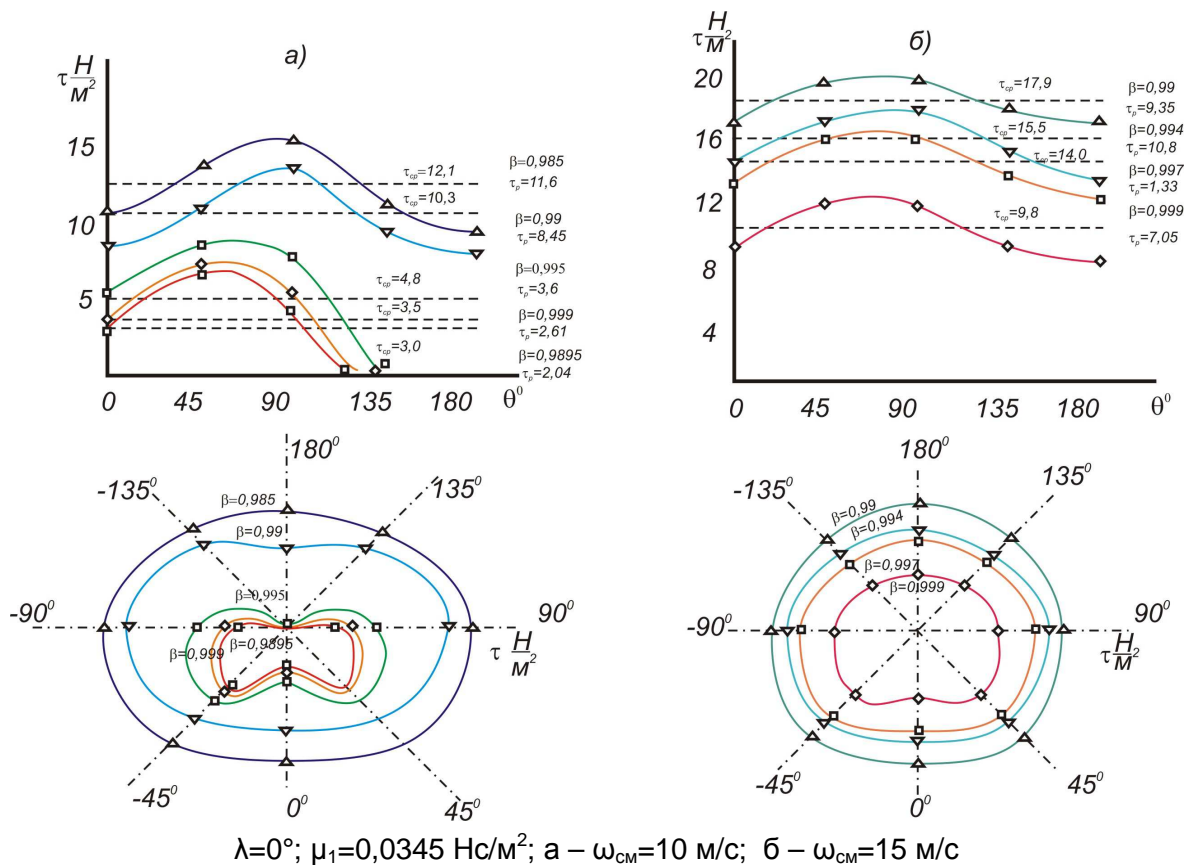


Рисунок 2 – Розподіл дотичного напруження на стінці труби при кільцевому потоці

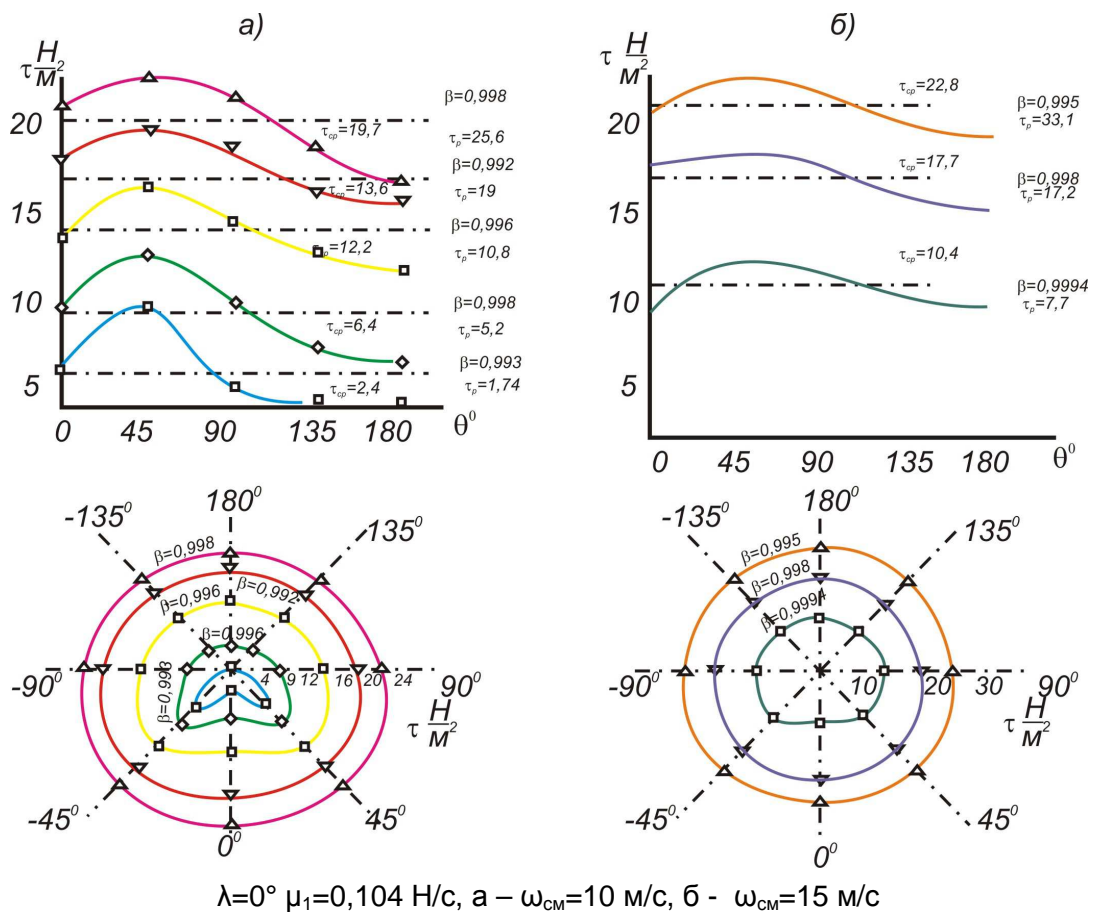


Рисунок 3 – Розподіл дотичного напруження по стінці труби при кільцевому потоці

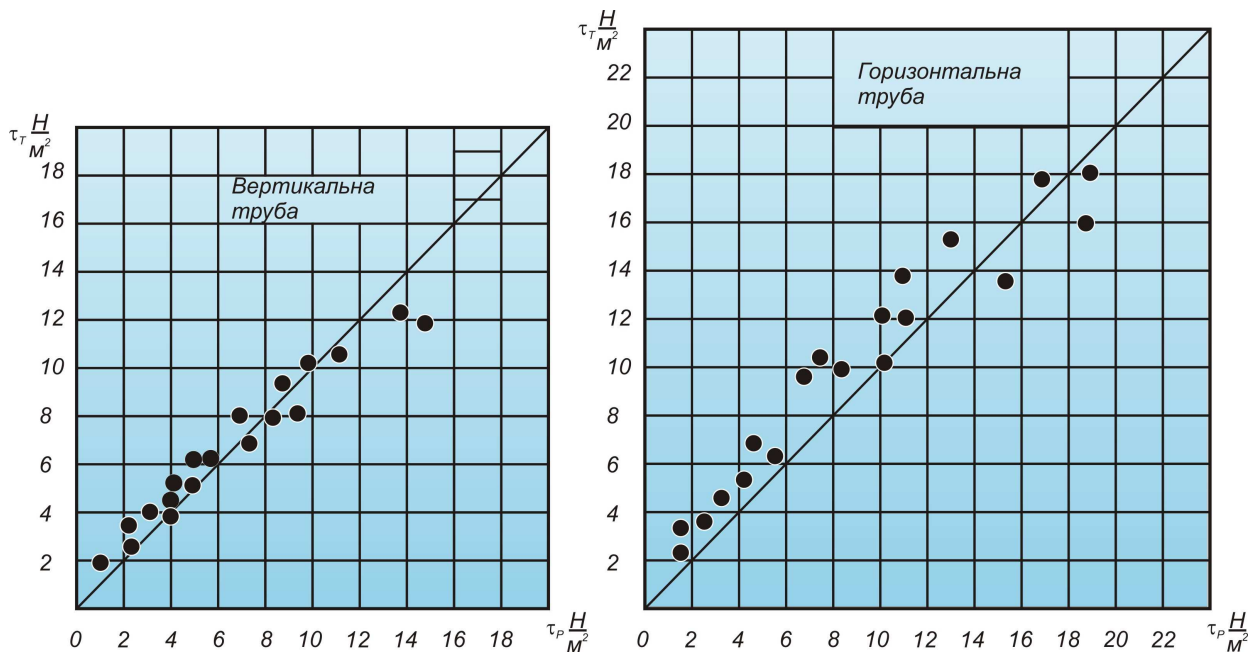


Рисунок 4 – Порівняння дотичних напружень на стінці, виміряних термоанемометром за перепадом тиску по довжині експериментальної ділянки

Наявність на поверхні плівки хвиль різної довжини й амплітуди призводить до суттєвої залежності миттєвого тертя на стінці від просторових змінних і часових. У зв'язку з цим дослідження статистичних властивостей пульсацій дотичних напружень на стінці при кільцевій структурі руху суміші виражає певний інтерес. Частиною таких досліджень є вивчення просторових і часових кореляцій пульсацій дотичного напруження.

Кореляційні і спектральні функції дають змогу визначити частоту пульсацій, оцінити зв'язок між пульсаціями в різні моменти часу в різних точках перерізу труби. За ними можна визначити розміри турбулентних “обурень”, що несуть велику частину енергії потоку. Часові автокореляційні функції, що описують статичний лінійний зв'язок між пульсаціями дотичного напруження в різні моменти часу, мають вигляд:

$$R(t) = \tau(t) \cdot \bar{\tau}(t + \tau), \quad (2)$$

де t – час дії дотичного напруження;
 τ – зсув за часом.

Вигляд автокореляційних функцій залежить від частотного складу випадкової функції, від того, які частоти переважають у ній. Робочий діапазон частот датчика 5532 становить 0÷120 кГц. Це дало можливість фіксувати практично всі флюктуації, що мають місце в кільцевих режимах руху, що розглядаються.

Блок-схему апаратури для автокореляційних функцій пульсацій тертя зображено на рис. 1.

Сигнал від датчика, підсилений і лінеаризований, одночасно поступає на корелятор і блок затримки, на якому можна задати необхідний час зсуву автокореляційної функції. Затриманий сигнал поступає на другий вхід

55D70, який працює в режимі вимірювання коефіцієнта кореляції. Операція зведення до квадрату і осереднення в часі прямого і затриманого сигналів виконується спеціальними електронними блоками, змонтованими в кореляторі. Зібрана за даною схемою вимірювальна апаратура дає можливість отримати на вході корелятора сигнал пропорційний автокореляційній функції пульсацій тертя на стінці труби. Крім того, корелятор 55D70 дає змогу отримати нор-

мований коефіцієнт автокореляції $\delta = \frac{R(t)}{R(0)}$ і спільно з самописцем типу Н327 записати його в будь-якому масштабі часу і довжини.

Форма запису коефіцієнта автокореляції залежить від того, якому виду опрацювання в подальшому буде підлягати вимірювана функція. В тому випадку, якщо кінцевою метою аналізу є внутрішні масштаби турбулентних обурень, запис ведеться при великих швидкостях стрічкопротяжного механізму, малих часових зсувах досліджуваної функції і невеликих величинах часу осереднення. При визначенні радіусів кореляції запис здійснюється при невеликих швидкостях протягання і відчутними межами квантування часу.

Із зростанням зсуву τ коефіцієнт автокореляції зменшується і при великих τ наближається до нуля, що дає можливість визначити тимчасовий радіус кореляції:

$$\hat{r} = \int_0^{\infty} \rho(\tau) d\tau, \quad (3)$$

де ρ – густина рідинної фази.

Форма нормування автокореляційних кривих закономірно змінюється із зменшенням витратного вмісту рідини (рис. 5). Криві стають більш крутими, що свідчить про зменшення

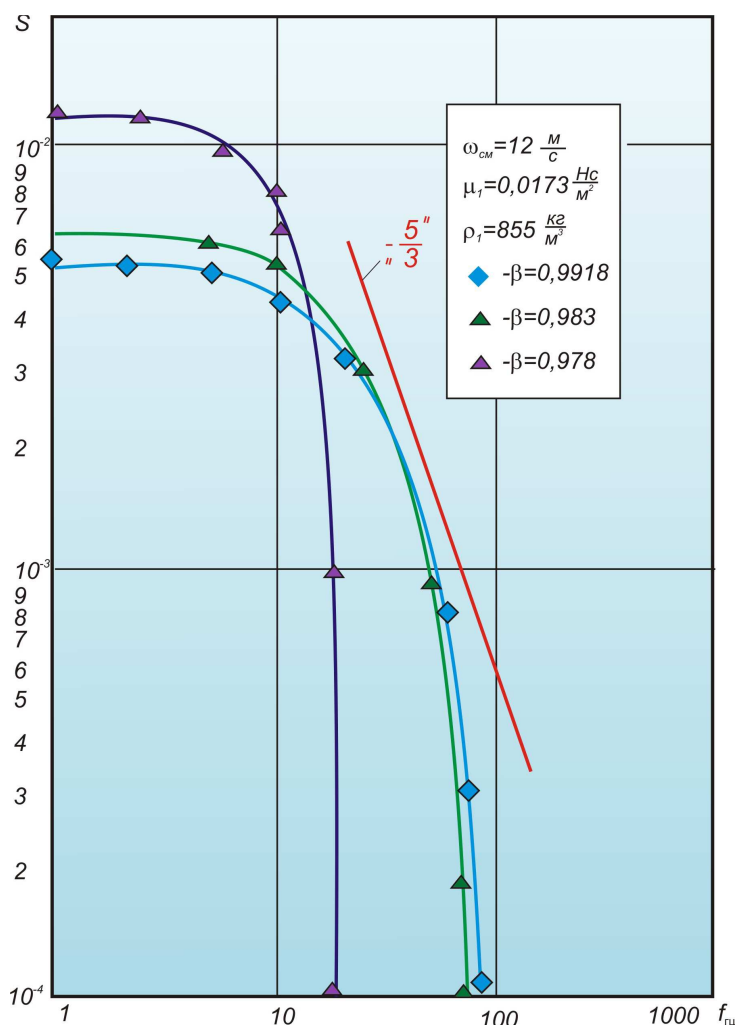


Рисунок 5 – Спектральна густина розподілу пульсацій дотичного напруження на стінці при кільцевому режимі потоку суміші у вертикальній трубі

часового радіусу кореляції. В області великих значень зсуву часу в кривих все більш чітко проявляється великого масштабу синусоїдальна складова, викликана ймовірно, хвилями на поверхні рідкої плівки.

Це підтверджує припущення Мамаєва В.А. [8] про те, що механізм виникнення великого масштабу пульсацій тиску і швидкості в двофазному потоці пов'язаний з пульсацією локального газовмісту. При відсутності хвиль на поверхні плівки, а відповідно при відсутності пульсацій локального газовмісту, автокореляційні функції згасають більш спокійно, залишаючись в більшій своїй частині додатними. При переході в пробковий режим руху, автокореляційні криві дуже швидко переходять у від'ємну область і коливаються відносно нульового значення коефіцієнта кореляції, практично не згасаючи. Це свідчить про явну періодичність випадкового процесу, яким є пульсація дотичного напруження на стінці труби при пробковому режимі руху суміші.

Криві автокореляції пульсації дотичного напруження на стінці за допомогою перетворення Фур'є дають спектральний розподіл пульсацій тиску:

$$S = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \rho(\tau) \cos \omega \tau d\tau, \quad (4)$$

де ω – швидкість газорідної суміші.

Спектральну густина розподілу пульсацій дотичного напруження на стінці було отримано за допомогою ЕОМ і відображено на рис. 5. З рисунку видно, що залежність спектральної густини дотичного напруження на стінці від частоти дещо відрізняється від залежності спектральної густини для однофазного потоку.

Безпосереднє вимірювання дотичного напруження та пульсації дотичних напружень на стінці в вертикальних та горизонтальних трубопроводах при кільцевому русі суміші дало змогу зробити деякі висновки:

- при постійному критерії Рейнольдса зменшення критерія Фруда призводить до збільшення товщини плівки рідини і появу хвиль на поверхні розподілу;
- хвилі турбулізують плівку, внаслідок чого відбувається зменшення дотичного напруження на стінці;
- підтверджена можливість застосування для розрахунків дотичного напруження тієї ж формули, що і для однофазного потоку;

- встановлена періодичність випадкового процесу, яким є пульсація дотичного напруження на стінці труби при пробковому режимі руху суміші;

- із зростанням β спектральна густина розподілу наближається до закону " $\frac{5}{3}$ " Обухова-Колмогорова, отриманого для однофазних потоків [9].

Проведені дослідження дали можливість оцінити вплив дотичних напружень на стінці та їх пульсацій на гідравлічний опір трубопроводу. Отримало подальший розвиток і експериментальне підтвердження фізичне явище обмеження пропускної здатності промислових та між промислових газопроводів за наявності рідинної фази.

Література

1 Брилл Дж.П. Многофазный поток в скважинах [Текст]: пер. с англ. Х. Мукерджи – М.: Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2006. – 384 с.

2 Сахаров В.А. Гидродинамика газожидкостных смесей в вертикальных трубах и промышленных подъемниках [Текст]: монографія / В.А. Сахаров, М.А. Мохов. – М.: Нефть и газ, 2004. – 391 с.

3 Капцов І.І. Визначення та аналіз основних характеристик двофазних потоків в газопроводах [Текст] / І.І. Капцов, М.В. Гордійчук, С.М. Стецюк // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2006. – № 1(18). – С. 63-66.

4 Стецюк С.М. Нова інженерна методика гідравлічного розрахунку газорідинних потоків у газопроводах [Текст] / С.М. Стецюк // Нафтова і газова промисловість. – 2009. – №2. – С. 62-64.

5 Стецюк С.М. Дослідження локального газомісту в промислових газопроводах під час транспортування газорідинних сумішей. [Текст] / С.М. Стецюк // Проблеми нафтогазової промисловості: зб. наук праць. – 2012. – Вип. 2. – С. 227-233.

6 Толасов Ю.А. Исследование характеристик двухфазного потока и разработка методов гидравлических расчетов при трубопроводном транспорте газо-жидкостных смесей. автореф. на получение научн. степени канд. техн. наук.: специальность 05.15.07 «Сооружение и эксплуатация нефтегазопроводов, нефтебаз и газохранилищ» / Ю.А. Толасов. – Москва. 1975. – 21 с.

7 Brauer H. Stromungund Warmellfergang bei Rieschfilm // V.D.J. – Forshungsheft. – 1956. – Н. 457.

8 Мамаев В.А. Прикладные аспекты механики газожидкостных смесей: Докторская дис. – М.: ВНИИГАЗ, 1969. – С. 2-30.

9 Развитая вихревая турбулентность. Спектр Колмогорова-Обухова [Электронный ресурс] / Статьи Соросовского Образовательного журнала в текстовом формате – Режим доступа <http://www.pereplet.ru/obrazovanie/stsoros/475.html>.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
28.01.13*

*Рекомендована до друку
професором Грудзом В.Я.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором Редьком О.Ф.
(Харківський національний університет
будівництва та архітектури, м. Харків)*