

УДК 681.121.4

**ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ РУХУ  
ДВОФАЗОВИХ ПОТОКІВ В СИСТЕМАХ ОБЛІКУ ВИТРАТИ ГАЗУ**

© Райтер П.М., Кісіль І.С., Стівенко О.Б., 2001  
Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу

*Ефективність експериментального дослідження процесу руху газорідних сумішей у трубах багато в чому залежить від вибору методики постановки й обробки самого експерименту, а також від конструкції дослідного стенду. Ряд властивостей газорідних потоків у різній формі проявляються в залежності від конструктивного виконання гідравлічного контуру експериментальної установки. Тому для отримання надійних експериментальних даних необхідно виключити подібні впливи.*

Специфічні особливості процесу руху газорідних сумішей у трубах — сильна анізотропність досліджуваного середовища, складність і різноманіття форм потоку, велика різниця у фізичних властивостях компонентів суміші — накладають обмеження на конструктивне виконання експериментальної установки.

Стенди для дослідження руху газорідних сумішей, що існують на даний час, і, зокрема, дослідна установка авторів, складаються з наступних основних систем:

1) системи подачі газу, що складається з ємності та дросельних пристроїв для гасіння пульсацій тиску, які виникають при роботі компресора, при дослідженнях газорідних сумішей; вузла виміру витрати газу (роторні лічильники витрати газу, діафрагменні, ротаметричні чи інші вимірювачі витрати);

2) системи подачі рідини і пристрої для виміру витрат рідини;

3) експериментальні трубопроводи (чи трубопровід), орієнтовані в потрібному для досліду напрямку й оснащені апаратурою для виміру статичного тиску, перепаду тиску і температури, пульсацій тиску, істинного газовмісту й інших необхідних величин.

Автори при проведенні дослідів використовували металеві і скляні труби діаметром до 100 мм і максимальною довжиною 0,3 м. Для виміру перепаду тиску застосовували батарейні й одиночні диференціальні манометри.

Газ і рідину змішують у змішувачі, вводять через ґратчасту перегородку газ у рідину чи струмінь рідини в газовий струмінь. Змішувач встановлюють на початку ділянки стабілізації двофазового потоку. Ця ділянка має довжину 10—

20 D. При такого роду змішуванні забезпечується рівномірне перемішування фаз і вирівнювання їх температур.

З експериментального трубопроводу газорідна суміш надходить в об'ємний сепаратор.

Температуру потоку заміряють на початку і в кінці трубопроводу термометрами.

В даний час для виміру істинного газовмісту знаходять застосування різні методи.

**Метод “відсікання”.** Суть його полягає в миттєвому перекритті швидкодіючими клапанами ділянки експериментального трубопроводу, по якому рухається газорідна суміш, і у вимірюванні кількості рідини в загальному об'ємі потоку “відсіченої” частини трубопроводу. Метод “відсікання” одним з перших застосовувався для виміру істинного газовмісту [1, 2].

Пристрій для виміру істинного газовмісту складається з відсікачів, встановлених на початковій і кінцевій ділянках експериментального трубопроводу, і мірного бачка, куди зливається рідинка, що знаходиться в “відсіченій” частині труби між першим і другим відсікачами.

Пристрій, що відтинає, є по суті запірною арматурою і складається з електромагнітного приводу і засувки, за допомогою яких приводиться в рух клинове з'єднання засувки і безпосередньо засувки. Загальна тривалість перекриття труби не перевищує 0,02 с, а запізнення одного з клапанів становить 0,005 с. Пристрої, що відтинають, встановлювалися за 5 м від початку і кінця експериментального трубопроводу, довжина ділянки труби, що перекривається, складає 25 м.

**Метод просвічування** газорідної суміші плоским пучком гамма-випромінювання. В основу даного методу покладений принцип ослаблення

інтенсивності гамма-випромінювання при його проходженні через досліджувану двофазну рідину. Для вимірів інтенсивності гамма-випромінювання можуть бути використані радіометри Б-2, ПП-8 тощо.

**Ємнісний метод**, застосований у роботі [3], оснований на зміні ємності конденсатора в залежності від діелектричних властивостей середовищ, що знаходяться між пластинами конденсатора, розмірів цих пластин, і, особливо, від структури потоку. Даний метод у практиці використовується мало із-за суттєвого впливу концентрації солей в потоці на результати вимірювань витрати.

**Метод виміру істинного газовмісту**, оснований на вимірі динамічного напору, що виникає в момент набігання газорідної суміші на пластину динамометра, встановленого в безпосередній близькості від вихідного перетину експериментального трубопроводу. Цей метод був використаний А. Армандом [4].

Істинний газовміст визначається за допомогою такого виразу:

$$f_{\text{дин}} = \frac{1}{2} (\varphi_1 \rho_1 \omega_1^2 + \varphi_2 \rho_2 \omega_2^2) = \frac{G_c^2}{2g} \left( \frac{\eta_1^2}{\varphi_1 \rho_1} + \frac{\rho_2^2}{\varphi_2 \rho_2} \right), \quad (1)$$

де  $G_c$  - витрата суміші,  $w_1$  і  $w_2$  - масові концентрації компонентів і  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  - їхні густини, які вважаються відомими, тобто на виході суміші вони такі ж, як в експериментальній трубі.

**Зважування** експериментального горизонтального трубопроводу, закріпленого на гнучких шлангах, до початку експерименту і при русі по ньому газорідної суміші має такі ж недоліки, що і зазначений вище метод. Зважування трубопроводу також було застосовано А. Армандом [4].

**Метод інжекції** речовини, що маркірується, полягає в тому, що рідина, яка рухається, зафарбовується якою-небудь мало дифундуючою в ній речовиною і по швидкості руху цієї мітки визначають середню істинну швидкість рідини. Потім по формулі  $f(\varphi_1 w_1) = Q_1$  можна визначити істинний газовміст.

Методом інжекції міткових речовин можна одержати переконливі експериментальні дані по істинному газовмісту тільки на великих довжинах. Г. Корнілов і В. Чернікин [5] одержали такі результати на трубопроводі довжиною близько 200 м.

Тому нами на експериментальній установці як вірцевий засіб для дослідження пристроїв контролю витрати було використано ротаційні лічильники газу, поведінку одного з яких і досліджували при різних газовмістах потоку суміші газу і рідини.

Експериментальні дослідження руху газорід-

них сумішей у трубах ведуться на установках відносно невеликих розмірів. Тому одна з головних задач, розв'язуваних при конструктивному виконанні установок, — повне виключення впливу зовнішніх факторів (місцевих опорів, умов сумішотворення, умов входу і виходу суміші з експериментальної ділянки) на розподіл фаз по січенню труби, на істинний газовміст і величину гідравлічного опору.

Необхідно відзначити, що звичні для потоків однофазного середовища розміри, за межами яких не відчувається впливу джерела збурювання, недостатні для дослідження двофазних потоків. Установити межі впливу місцевих опорів на параметри, що характеризують рух газорідних сумішей у трубах, досить складно, тому що в окремих випадках місцеві опори (дроселювання суміші) не тільки спотворюють результати вимірів, але навіть змінюють структуру потоку, у результаті чого змінюється вид функціонального зв'язку шуканих величин з визначальними критеріями.

Простежити за впливом місцевих опорів, зокрема, умов виходу суміші з експериментальної ділянки трубопроводу на істинний газовміст можна шляхом співставлення сімейства кривих  $\varphi = \varphi(\beta, Fr_c)$ , отриманих на одній установці але при різному виконанні вихідної ділянки. У першому випадку залежність  $\varphi(\beta)$  отримана, коли вихідний переріз експериментального трубопроводу довжиною 35 м і діаметром 56 мм було задіафрагмовано шайбою меншого перерізу (45 мм), а в другому – діафрагма була відсутня і газорідна суміш надходила безпосередньо в сепаратор, де відбувався поділ суміші.

Співставляючи ці криві, можна зробити висновок, що дифагування вихідного перерізу трубопроводу приводить до передчасного переходу розшарованої структури потоку суміші (пунктирна лінія) у пробкову, внаслідок чого змінюється загальний вид кривої, яка відтворює залежність істинного газовмісту від витратного.

У такий же спосіб виявляється наявність нерівнопрохідної арматури на експериментальному трубопроводі, наприклад, вентилів, що спотворюють усю картину руху газорідної суміші.

Місцевий опір у вихідному перерізі трубопроводу приводить до штучної затримки рідини на експериментальній ділянці, створює додаткові пульсації, що, природно, позначається на величині і закономірності зміни істинного газовмісту і гідравлічних опорів.

Ефект штучної затримки рідини по різному виявляється в зонах розшарованого і пробкового режимів потоку суміші.

У зоні існування пробкового режиму потоку суміші вплив ефекту дроселювання майже не

відчувається. Це пояснюється тим, що частка рідини від ефекту затримки незначна в порівнянні з її загальною масою, що знаходиться в експериментальному трубопроводі. Однак дроселювання при пробковій структурі потоку впливає на появу наведених пульсацій.

Зазначений ефект найбільш сильно виявляється при розшарованій структурі потоку суміші з великим газовмістом ( $\beta > 0,8$ ), коли незначна затримка рідини приводить до різкого зменшення істинного газовмісту.

Нерівномірне збільшення істинного газовмісту через штучну затримку рідини приводить до злиття експериментальних кривих, які при правильній постановці досліду розташовуються роздільно, за відповідним значенням критерію Фруда.

Отже, якісна постановка експериментальних досліджень можлива лише за умови виключення всіляких джерел збурень в експериментальному трубопроводі. Для цього необхідно всю запірно-регулюючу арматуру розташувати на підведених до змішувача і відведених від сепаратора

трубопроводах, по яких рухається однорідна рідина.

Якщо виключити зовнішні джерела збурень в експериментальному трубопроводі, то все-таки його довжина повинна бути досить великою для одержання надійних даних. Так, наприклад, тонкодисперсна на вході у вертикальну трубу повітряноводяна суміш стабілізується і стає грубодисперсною з пробковою формою потоку на відстані більш 200 калібрів ( $l/D > 200$ ) від входу. На рис.1 показана залежність істинного газовмісту від витратного і критерію  $Fr_c$ , отримана при вивченні газорідинного руху в трубі  $D = 56$  мм и  $l = 1,6$  м. Невелика довжина труби не дозволила одержати чітку перехідну зону від пробкової до розшарованої структури, як це було зроблено на стенді вдвічі більшої довжини, тому що довжина газорідинної пробки складає майже половину довжини труби. У результаті важко одержати не тільки середнє значення істинного газовмісту в перехідній зоні, але і крайні точки максимуму та мінімуму.

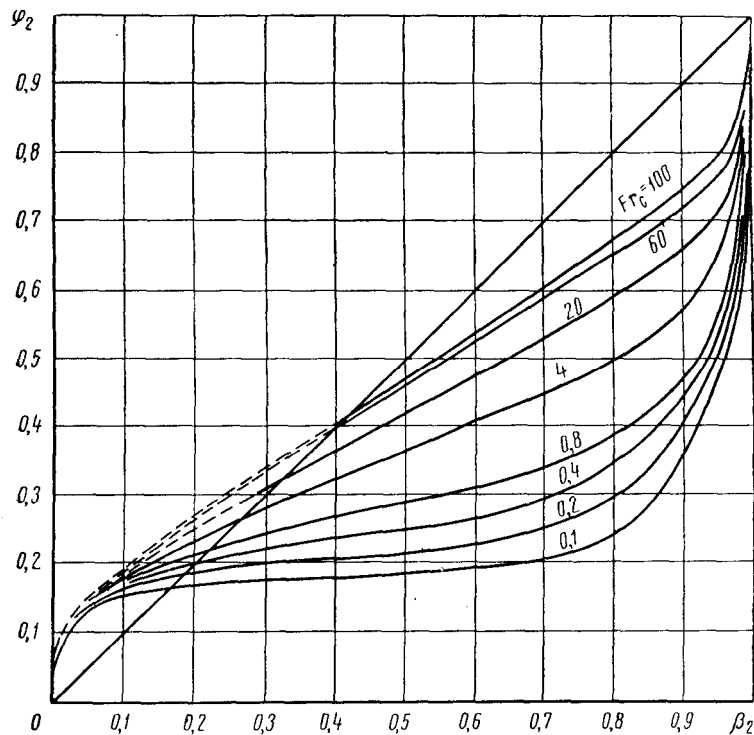


Рис.1 Залежність істинного газовмісту від витратного і  $Fr_c$  при "петлеподібному" гідравлічному контурі ( $D = 56$  мм,  $L = 1,6$  м).

Експериментальна установка, на якій отримані дослідні дані, які показані на рис.1, мала наступну конструктивну особливість. Експериментальна ділянка труби закінчувалася не вільним виходом у сепаратор, а поворотним коліном, з якого газорідинна суміш по поворотній трубі надходила в

сепаратор, встановлений в кінці експериментальної ділянки.

Природно, така конструкція створює додаткові умови для затримки рідини не тільки при малих швидкостях. Зокрема, при малих газовмістах і швидкостях суміші зазначений поворот гальмує рух

газу, що означає більш сильне зростання від'ємної відносної швидкості ( $\varphi > \beta$  при  $\beta < 0,1$ ).

Дослідження показують, що експериментальна ділянка трубопроводу між змішувачем і сепаратором повинна бути ретельно прорівельована, щоб виключити вплив нахилу труби на результати вимірювання.

Виявлено, що навіть при невеликих кутах нахилу труби до горизонту сильно спотворюються кількісні результати по істинному газовмісту і змінюється якісна сторона. Результати вимірювання істинного газовмісту на трубі, нахилений до горизонту під кутом  $0,25^\circ$  (спадний потік), приведені на рис.2, а результати, отримані на тому ж стенді, але при горизонтальному розташуванні труби — на рис.1. Якщо порівняти ці результати, то

видно, що для труби з нахилом  $0,25^\circ$  криві  $\varphi(\beta)$  при  $Fr_c = 0,1; 0,2; 0,4$  і  $0,8$  практично злилися в одну криву (рис. 2).

Природно, такий невеликий нахил труби при збільшенні швидкості суміші (для  $Fr_c > 0,8$ ) перестає впливати на істинний газовміст і криві  $\varphi(\beta)$  при  $Fr_c = 4; 20; 60$  і  $100$  майже збігаються з аналогічними кривими для горизонтальної труби.

Однак дія такого невеликого нахилу виразилась вже в тім, що криві  $\varphi(\beta)$  з невеликими значеннями  $Fr_c$  перемістилися вгору, а криві із значеннями  $Fr_c = 4; 20; 60$  і  $100$  — вниз. В околиці точок  $\varphi = 0$  і  $\varphi = 1$  криві  $\varphi(\beta)$  при  $Fr_c = \text{idem}$  майже не змістилися в порівнянні з такими для горизонтальної труби.

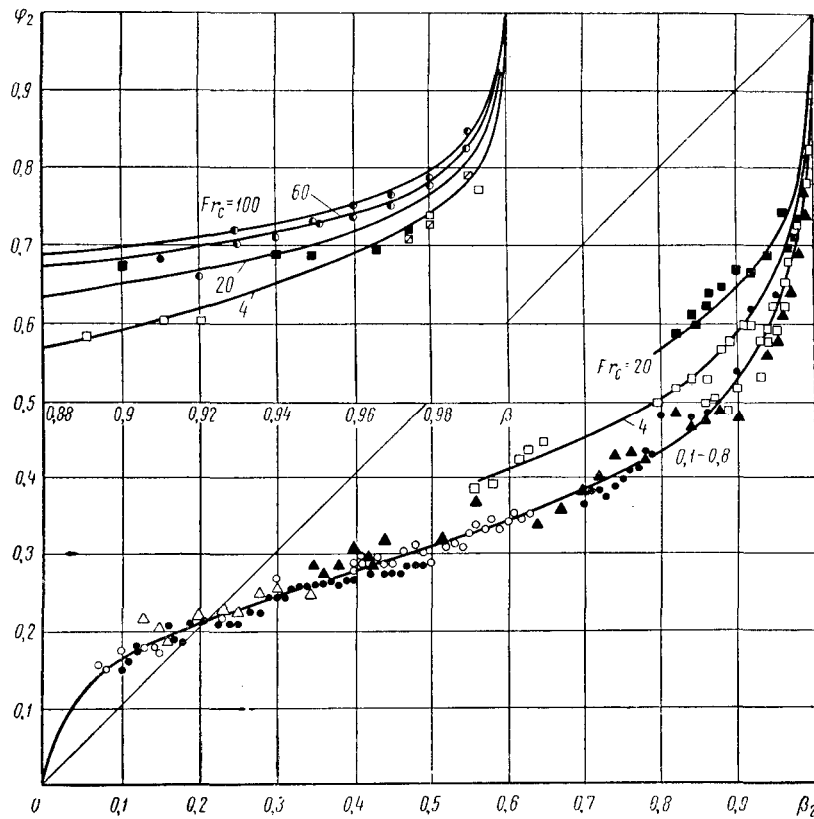


Рис. 2. Залежність  $\varphi(\beta, Fr_c)$  для спадного потоку з кутом нахилу  $0,25^\circ$  до горизонту ( $D = 56$  мм,  $L = 1,6$  м).

Подібне перебудовування кривих  $\varphi(\beta)$  навіть при невеликих кутах нахилу труби до горизонту пояснюється тим, що характер впливу критерію Фруда суміші на істинний газовміст для спадного потоку стає іншим, ніж у горизонтальному потоці. Якщо в горизонтальному потоці збільшення  $Fr_c$  означало збільшення істинного газовмісту і, отже, зменшення області позитивної відносної швидкості та наближення істинного газовмісту до витратного,

то в похилій трубі воно приводить до істотного зменшення істинного газовмісту і, отже, до збільшення області позитивної відносної швидкості.

Таким чином, збільшення кута нахилу труби для спадного потоку приводить до збільшення істинного газовмісту, а збільшення числа  $Fr_c$  — до його зменшення.

Така тенденція, як буде показано далі, спостерігається тільки до визначеного значення

швидкості чи критерію Фруда суміші, починаючи з яких істинний газовміст від нього не залежить.

Отже, експериментальну установку проектувати і споруджувати треба у відповідності з наступними вимогами:

1) усунути місцеві опори і пристрої, що затримують рух рідини;

2) експериментальна ділянка трубопроводу повинна бути достатньо довгою, щоб забезпечувати стабілізацію потоку і давати можливість з необхідною точністю вимірювати середні значення параметрів (істинний газовміст і перепад тиску);

3) точно орієнтувати експериментальний трубопровід.

Природно, вплив усіх цих факторів на параметри газорідного потоку — предмет спеціальних досліджень, які повинні бути поставлені диференційовано, тобто вплив кожного фактора (звуження, затримка, поворот, підпор, кут нахилу) повинен вивчатися окремо.

В даний час результати дослідження стосовно місцевих опорів обмежуються тими прикладами, що приведені вище. Вплив же кутів потоку на різні характеристики освітлено досить повно.

Є в наявності значна кількість експериментальних робіт, у яких розглядалися закономірності зміни істинного газовмісту і гідравлічних опорів від параметрів, що якоюсь мірою визначають рух газорідних сумішей у трубах. Однак більшість досліджень не відрізняються повнотою і закінченістю, а закономірності, встановлені в деяких з них, носять частковий характер, що ускладнює використання їх в умовах, що відрізняються чим-небудь від умов проведення експериментальних досліджень.

Самим істотним характерним недоліком в методиці постановки й обробки експериментів по газо-рідних сумішах можна вважати відсутність критеріального методу постановки експерименту й обробки його результатів.

Програма експериментів повинна бути такою, щоб критерії, що визначають процес, змінювалися один від одного незалежно і вплив одного критерію по можливості визначався при постійних інших. При дослідженні складних процесів, таких, як рух сумішей, обходити цей принцип не можна.

Визначена сукупність визначальних критеріїв, у результаті чого істинний газовміст і коефіцієнт опору можуть бути представлені у такому вигляді

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi \left[ \beta, Fr_c, We, \mu, \rho, \cos(g, z) \right] \\ \lambda &= \lambda \left[ \beta, Fr_c, We, \mu, \rho, \cos(g, z) \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

На підставі точних рішень рівнянь гідродинаміки для випадку ламінарного руху ці загальні функції подаються у такому вигляді:

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi \left[ \beta, Fr_c, We, \mu, \rho, \cos(g, z) \right] \\ \lambda &= \lambda [Re_c, \varepsilon] \mu \left[ \beta, Fr_c, We, \mu, \rho, \cos(g, z) \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Для турбулентного потоку газорідної суміші можливість такого подання істинного газовмісту і коефіцієнта опору необхідно показати експериментально.

Оскільки мета експериментальних досліджень — встановити емпіричні залежності для істинного газовмісту і коефіцієнта гідравлічного опору суміші, що є многопараметричними функціями, то для виявлення впливу кожного з визначених параметрів необхідна постановка великого числа дослідів у визначеній послідовності.

Один із шляхів вирішення поставленої задачі полягає в проведенні серії дослідів, що відповідають загальному числу визначальних критеріїв із зміною в межах серії одного з параметрів при фіксованих значеннях всіх інших.

В принципі постановка експериментальних досліджень у такій послідовності можлива. Однак це пов'язано з винятковими незручностями, тому що досліди необхідно проводити на трубах різних діаметрів з використанням великої кількості різноманітних по фізичних властивостях рідин і газів.

Крім цього, результати досліджень, очевидно, будуть трохи обмежені внаслідок складності зміни в широких межах усіх критеріїв при такій постановці експерименту.

Тому простіше проводити серії дослідів із зміною не одного, а декількох параметрів одночасно, групуючи їх певним чином. Так, наприклад, якщо зафіксувати значення  $We, \rho, \mu, \cos(g, z)$  і провести серію дослідів за фіксованим значенням числа  $Fr_c$ , змінюючи витратний газовміст в межах  $0 < \beta < 1$  і не приймаючи до уваги зміни, що відбувається при цьому у значенні критерію  $Re_c$ , то можна побудувати сімейство кривих, які будуть відображати функціональну залежність істинного газовмісту чи коефіцієнта опору від сукупності критеріїв  $(\beta, Fr_c, Re_c)$ .

Потім, провівши аналогічну серію дослідів при зміні значення наступного критерію, наприклад,  $We$ , у тій же послідовності, що і попередні досліди, можна визначити вплив даного критерію на досліджувану величину.

Після проведення вказаних вище серій дослідів

нез'ясованою залишається лише ступінь впливу критеріїв окремо:  $\beta$ ,  $Fr_c$  і  $Re_c$ .

Визначити вплив кожного з них буде досить просто, якщо в процесі дослідження виявиться, наприклад, що критерій  $Re_c$  не впливає на шукану величину. Для цього буде досить, якщо зміна хоча б одного з параметрів  $\rho$  чи  $\mu$  у кілька разів не впливатиме на досліджуваний параметр ( $\varphi$  чи  $\lambda_c$ ), тому що при зміні  $\rho$  чи  $\mu$ , змінюється значення критерію  $Re_c$ .

У цьому випадку можна відібрати і співставити між собою визначену кількість дослідів, у яких були б закріплені усі визначальні критерії, крім  $Re_c$ , і в такий спосіб з'ясувати вплив критерію  $Re_c$ .

Аналогічно можна довести відсутність впливу критерію  $Re_c$  на шукані величини ( $\varphi$  чи  $\lambda_c$ ) у випадку автоточності останніх щодо якого-небудь з наступних трьох критеріїв:  $Fr_c$ ,  $\varphi$ ,  $\rho$ .

Якщо в процесі експериментальних досліджень жодна з перерахованих вище умов виконаною не буде, то для вивчення впливу кожного з критеріїв  $Fr_c$ ,  $Re_c$ ,  $\beta$  окремо на істинний газовміст і коефіцієнт опору буде потрібно додаткове проведення дослідів на трубах різних діаметрів.

Зазначений поділ усіх визначальних критеріїв на подібні групи не є випадковим. По-перше, виходячи з фізичної суті руху двофазних потоків у трубах варто очікувати, що основними визначальними критеріями є  $\beta$ ,  $Fr_c$ ,  $Re_c$ . Тому представлення їх в одній групі дозволяє легко визначити вплив

інших чотирьох:  $We$ ,  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $\cos(g, z)$ .

По-друге, експериментальні дослідження дають підставу думати, що критерії  $\rho$ ,  $\mu$  і частково  $We$  не роблять істотного впливу на істинний газовміст і коефіцієнт гідравлічного опору.

Звичайно, викладена концепція не є єдиною. Подальші результати експериментальних досліджень оброблятимуться за цією методикою. Але, природно, можна застосовувати різні модифікації загального критеріального способу, проводячи відповідні обґрунтування для кожного конкретного випадку.

1. Дейч М. Е., Фролов Г. А. Гидродинамика двухфазных сред. М.: Энергия. 1968. 423с.
2. Исследование турбулентных течений двухфазных сред / В. Е. Накоряков, А. П. Бурдуков., Б. Г. Покусаев и др. Новосибирск, 1973.
3. Механика многофазных сред / А. Н. Крайко, Р. И. Нигматулин, В. Е. Старков, Л. Е. Стернин // Итоги науки и техники. Сер. гидромеханика.
4. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987.
5. Теплопередача в двухфазном потоке / Под ред. Д. Баттерворса и Г. Хьюитта. М.: Энергия, 1980.
6. Фисенко В. В. Критические двухфазные потоки. М.: Атомиздат, 1978.

УДК 389.14:543.544

## МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ХРОМАТОГРАФА КОНТРОЛЮ СКЛАДУ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

© Теплюх З.М., Ділай І.В., 2001

Національний університет "Львівська політехніка"

**Показано важливість і необхідність контролю якості природного газу, а також доцільність застосування хроматографічного методу аналізу складу для визначення теплотворної здатності та інших параметрів споживаного природного газу. Запропоновано схему газодинамічного синтезатора взірцевих газових сумішей, який можна застосовувати для метрологічної атестації хроматографа природного газу.**

Тривале використання дешевих паливно-енергетичних ресурсів призвело до надмірного енергоспоживання в промисловості та побуті, що в значній мірі спричинило теперішній стан економіки держави в цілому. Одним із основних енергоносіїв в Україні є природний газ, причому більша частина його імпортується з Росії і Туркменістану. На сьогодні ціна природного газу для українських

споживачів є досить високою, тому це мало би спонукати їх до економного і раціонального використання "блакитного палива". Значної економії природного газу в Україні можна досягнути завдяки налагодженню його належного та постійного обліку.

Протягом десятиліть природний газ в колишньому СРСР практично не обліковувався. Однак тепер, в умовах складної ситуації в паливно-