

Я.С. Білецький, М.В. Сенюшкович, І.Я. Білецька, Т.Я. Шимко

Термодинаміка неньютонівських рідин (бурових розчинів)

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 76019, м. Івано-Франківськ,
вул. Карпатська 15, e-mail: drill@nung.edu.ua*

З використанням методу балансу тисків разом з балансом форм енергій, виконані гідротермодинамічні розрахунки рухомих у свердловині гідравлічних потоків бурових розчинів на водній основі, які акумулюють та передають енергію іншим елементам. Розглянуті випадки руху потоку рідини вверх (проти сил гравітації) та течії потоку під дією сил гравітації вниз, до вибою свердловини. Отримане комплексне рівняння з питомих величин, що не залежать від масштабу процесів термодинаміки та гідромеханіки, які протікають у свердловині. Комбінуючи різні критерії подібності можна оцінити ступінь впливу цих процесів на виконання будь-якої операції у свердловині під час її спорудження.

Отримані залежності можуть бути використані для уточнення методик, що регламентують розрахунок режимно-технологічних параметрів процесу спорудження глибоких свердловин.

Ключові слова: свердловина, буровий розчин, гідродинамічний процес.

Стаття постуила до редакції; прийнята до друку 15.03.2016.

Вступ

Нарощування обсягів видобутку нафти і газу можливе за рахунок буріння глибоких свердловин де температури і тиски досягають великих значень. Буріння таких свердловин супроводжується комплексом складних проблем, серед яких важливе значення має врахування гідравлічних та теплових процесів що відбуваються у стволі свердловини і є змінними як по її довжині так і у часі. Гідравлічні процеси пов'язані з циркуляцією промивальних рідин, гідродинамічними втратами, загальним балансом тисків у свердловині та масиві гірських порід. Теплові процеси пов'язані зі зміною температури по довжині свердловини і вони формують теплове поле у якому протікають усі решта процесів.

Буровий розчин, що циркулює у свердловині виконує роль теплоносія унаслідок чого у масиві гірських порід виникають термічні напруги які змінюють умови їх руйнування та можуть призвести до появи ускладнень. Температура також впливає на вибір типу бурового та цементного розчинів, оброблення їх хімічними реагентами, час прокачування цементного розчину, зміну гідравлічних втрат, стійкість цементного каменю. Інтенсивність теплових процесів залежить від стадії розробки родовища, конструкції свердловини, виду операції у ній, типу бурового розчину та швидкості

руху рідини які визначають величину масотеплопереносу.

I. Експериментальні результати дослідження та їх обговорення

Елементарна кількість теплової енергії, яка надходить у термодинамічну систему від зовнішнього джерела теплоти, у загальному випадку визначається диференціалом добутку

$$d(S \cdot T) = SdT + TdS, \quad (1)$$

де T – температура; S – ентропія.

З правої частини формули (1) випливає, що елементарна кількість теплової енергії складається з двох різних за змістом величин:

$$\delta Q_s = S dT; \quad (2)$$

$$\delta Q_t = T dS, \quad (3)$$

де δ – символ неповного диференціалу.

Розглянемо діаграму зміни ентропії води і водяної пари при підведенні тепла від зовнішнього джерела (рис. 1).

Рівняння (2) характеризує процес, а рівняння (3) стан системи. Звідси випливає, що теплообмін між термодинамічною системою і зовнішнім джерелом теплоти практично відбувається двома способами:

1. Рівняння (2) загальновідоме [1-5] і характеризує процес теплообміну між точками 2 – 3 – 4 – 5 (рис. 1). Цей процес відбувається внаслідок

S , Дж/К.

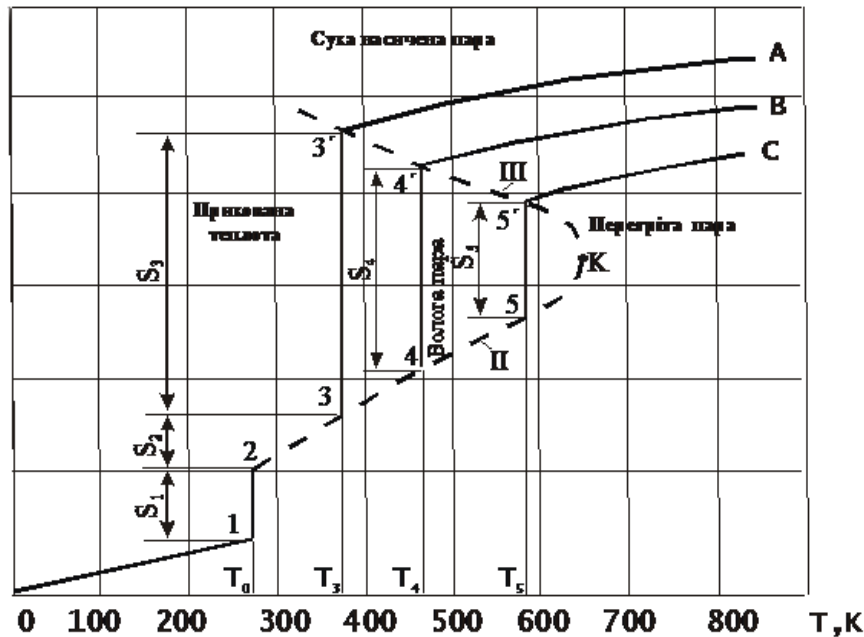


Fig. 1. Entropy diagram of water and steam depending on the temperature for the open thermodynamic system [3].

зміни величини температури.

2. Рівняння (3) вперше подано Клаузіусом [1-5]. Дане рівняння характеризує на рис. 1 зміну стану речовини в системі при ізотермах T_0 , T_3 , T_4 , T_5 , відповідно. Цей прихований від спостереження процес фазових переходів при вказаних ізотермах характеризується вертикальними стрибками величин ентропії S на вертикальних відрізках 3 – 3'; 4 – 4'; 5 – 5'; паралельних до осі ординат (рис. 1).

Зауважимо, що диференціал макроскопічного визначення ентропії за Клаузіусом (5) прийнято записувати так:

$$dS \geq \frac{\delta Q_t}{T} \quad (4)$$

Поєднавши аналітичні вирази для першого ($dQ = dU + pdV$) та другого $\left(dS \geq \frac{dQ}{T} \right)$

законів термодинаміки, дістанемо основне рівняння термодинаміки для рівноважних процесів в простій однорідній термодинамічній системі[6]

$$TdS = dU + pdV. \quad (5)$$

Для нерівноважних процесів

$$TdS > dU + pdV. \quad (6)$$

Рівняння (5) пов'язує п'ять функцій стану: T , S , U , p , V . На практиці стан системи зручно визначати двома параметрами. Тому, вибираючи із п'яти вище названих величин дві, як незалежні змінні, можна побудувати такі функції стану, на основі яких і їхніх похідних можна виразити термодинамічні властивості системи. Характеристичною функцією за таких умов буде ентальпія, яку визначають за допомогою рівняння

$$H(S, p) = U + pV \text{ або } dH = TdS + Vdp \quad (7)$$

Вільна енергія (потенціал Гельмгольца) зв'язує внутрішню енергію з температурою й ентропією у вигляді.

$$F = U - TS \quad (8)$$

Зменшення вільної енергії системи при ізотермічному процесі визначає виконану нею в цьому процесі роботу. А термодинамічний потенціал Гіббса пов'язує ентальпію з температурою й ентропією у вигляді

$$G = H - TS \quad (9)$$

Таким чином, ентальпія (7) з урахуванням (8) і (9) може бути подана рівняннями

$$H = F + TS + pV \quad (10)$$

$$H = G + TS$$

Співвідношення (7), (8), (9), (10) відображені графічно на рис. 2.

Усі наведені вище термодинамічні потенціали показані також графічно на рис. 3 відповідними площинами поверхні діаграми зміни стану рідкої речовини.

Аналітичний апарат термодинаміки побудований на встановленні певних математичних залежностей для параметрів термодинамічної системи і базується на використанні основного рівняння термодинаміки [1-5].

$$dU = TdS - pdV \quad (11)$$

Рівняння (11) у термодинаміці вважається основним, тому що відбиває перший і другий закони термодинаміки.

Тепер необхідно дослідити термодинаміку неньютонівських рідин, до яких також належать

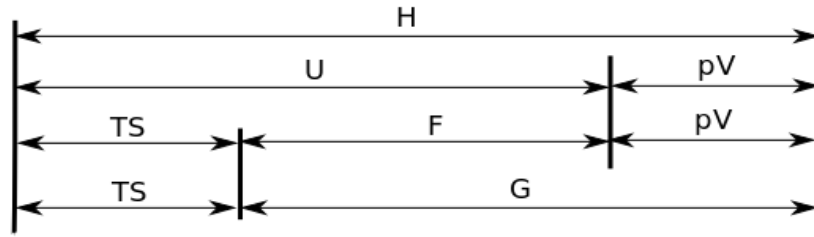


Fig. 2. Graphic representation of the interdependence between thermodynamic functions.

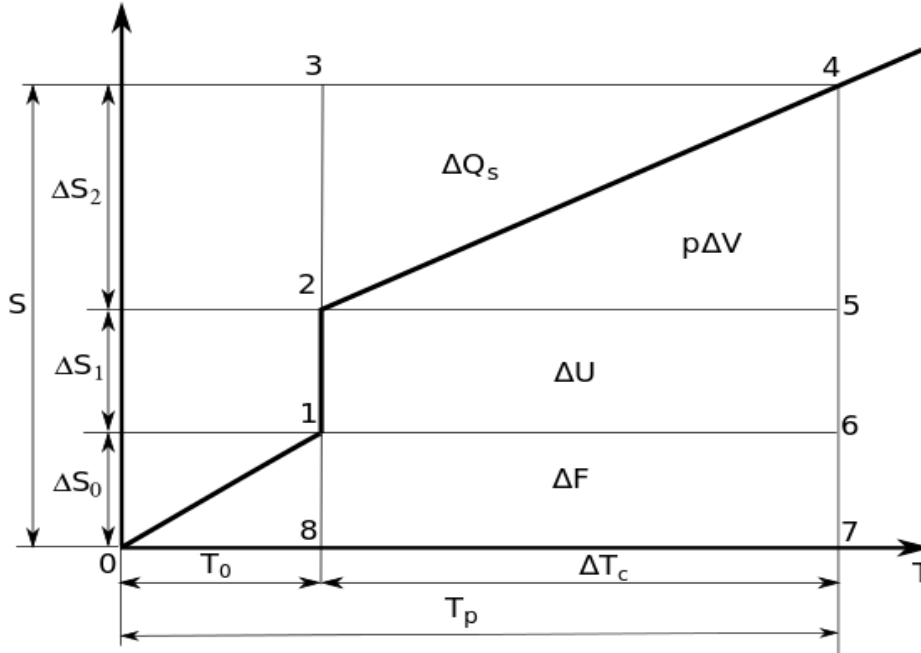


Fig. 3. State transition diagram of liquid substance.

бурові розчини.

Бурові розчини класифікуються за складом дисперсійного середовища. Поняття буровий розчин охоплює всі промивальні рідини, що застосовуються у процесах руйнування гірських порід і видалення частинок зруйнованої гірської породи з свердловини.

За основу прийнятий тільки той буровий розчин, у якого як дисперсійне середовище використовується вода тому, що такі розчини найчастіше використовуються для буріння свердловин.

Оскільки вода є основою розчину, то розглянемо експериментальну діаграму зміни ентропії води і водяної пари у залежності від температури для відкритої термодинамічної системи (рис. 1).

Нафтогазова свердловина є відкритою термодинамічною системою у якій існує великий діапазон перепаду гідростатичного і гідродинамічного тисків, при одночасному перепаді температур. На гирлі свердловини температура рідини має приблизно температуру довкілля, а на вибої свердловини, в залежності від геотермічного градієнта, може досягати понад 200 °С.

Величини гідростатичних тисків у свердловині залежать від глибини і можуть досягати значних величин. Наприклад, якщо 5000 м, то величина гідростатичного тиску може перевищувати 1000 ат = 100 МПа.

Критична температура є однією з фізико-

хімічних констант і визначається як температура, при якій зникають різниці фізичних властивостей між рідиною і паром, що перебувають у рівновазі. При $T = T_{кр}$ густини насиченої пари і рідини стають однаковими, тому границя між ними зникає і теплота пароутворення перетворюється в нуль.

Критична точка тиску $P_{кр} = 22,13 \text{ МПа} = 225,65 \text{ ат}$ і $T_{кр} = 647,3\text{К} = 374,15 \text{ }^\circ\text{С}$. Ця точка відображає критичний стан системи, коли різниця густини між рідкою і газовою фазами зникає.

Таким чином приходимо до висновку, що у глибокій свердловині немає ніякої загрози закипання бурового розчину, бо різниця густини між рідиною і газовою фазами зникає. Це треба мати на увазі під час розкриття продуктивного пласта, коли треба обережно обходитися з нафтогазопроявами, які практично приховані внаслідок відсутності різниці між густинами речовин.

Використовуючи експериментальну діаграму (рис. 1), зміни ентропії води і водяної пари в координатах T, S розглянемо термодинамічну діаграму для бурового розчину на водній основі (рис. 3).

На підставі діаграми на рис. 3 бачимо, що в межах температури $0 \leq T \leq T_0$ на шляху від точки 0 до точки 1 вода перебуває у стані модифікації льоду. Згодом, під впливом температури $T = T_0 = \text{const.}$ на

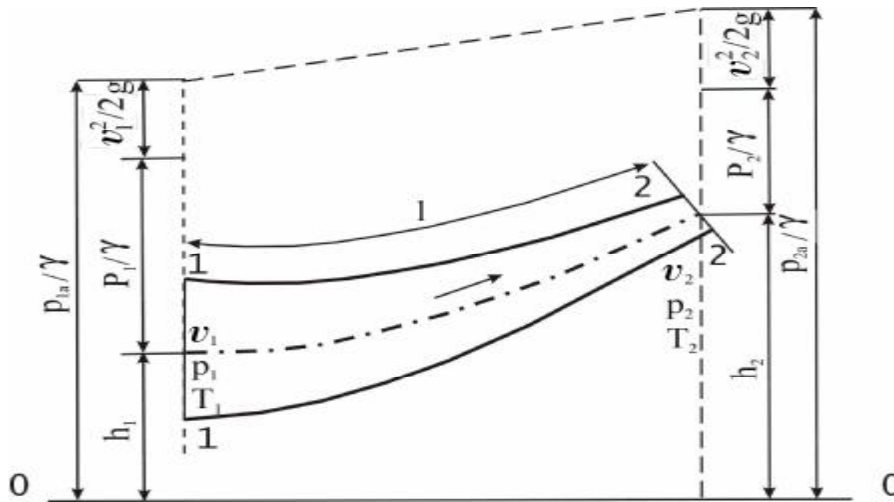


Fig. 4. Illustration of pressure balance for the open thermodynamic system.

шляху 1–2, внаслідок приросту ентропії S модифікація льоду змінюється (фазовий перехід від одної фази в іншу). У точці 2 настає рівноважний стан (потрійна точка води), коли спостерігається одночасне існування трьох фаз - води, льоду і пари. У подальшому, від точки 2 до точки 4 в межах температури $T_0 \leq T \leq T_p$, вода лінійно змінює свій стан за рахунок підведення (відведення) теплової енергії.

Самочинний процес охолодження води до потрійної точки 2 йде по шляху 4–3–2, а не по зворотному шляху примусового нагрівання 4–2. Кількість теплоти ΔQ_s за рахунок необоротності процесу розсіюється в оточуюче середовище і не може бути використана у вигляді корисної роботи. Ця величина необоротної кількості теплоти визначається площею трикутника 2–3–4 (рис. 3) і дорівнює

$$\Delta Q_s = \frac{1}{2} \Delta S_2 \Delta T_c \quad (12)$$

Ентальпія системи за час циклу циркуляції бурового розчину через канал свердловини складається з такого балансу теплової форми енергії

$$\Delta H = \Delta U + \Delta F + p \Delta V + \Delta Q_s \quad (13)$$

де $\Delta F = \Delta S_0 \Delta T_c$ – частина внутрішньої енергії, яка характеризує рівноважний стан початку переходу твердої фази у рідку, або, навпаки (горизонтальна пряма 1–6 на рис. 3) $\Delta U = \Delta S_1 \Delta T_c$ зміна внутрішньої енергії води при переході по шляху від точки 5 до точки 2 (потрійної точки); $p \cdot \Delta V$ – частина внутрішньої енергії, яка витрачається на зміну об'єму води за рахунок термічного розширення або стиснення (площа 2–4–5); ΔQ_s – частина необоротної теплової форми енергії, яка спричинює термічне розширення води при нагріванні, а при охолодженні розсіюється в оточуюче середовище.

Вираз (13) відображає перший закон термодинаміки, який можна переписати у

традиційному вигляді

$$\Delta Q = \Delta U + p \Delta V + \Delta Q_s \quad (14)$$

де $\Delta Q = (\Delta S_1 + \Delta S_2) \Delta T_c$ – кількість теплоти, акумульованої за умов градієнта температури циклу циркуляції бурового розчину, яка визначається площею прямокутника 1–3–4–6–1 на рис. 3.

Слід зауважити, що у класичній термодинаміці гіпотетично вважається, що всі термодинамічні процеси оборотні, тобто припускається, що $\Delta Q_s = 0$, тому рівняння першого закону термодинаміки (14) записується у класичному вигляді

$$\Delta Q = \Delta U + p \Delta V \quad (15)$$

Отже, буровий розчин здатний акумулювати і повертати певну кількість теплової форми енергії. Теплова енергія відбирається буровим розчином від стінок пробуреної свердловини та передається іншим елементам системи циркуляції.

Таким чином, на підставі зазначеного вище, можна приступити до гідротермодинамічних розрахунків рухомих гідравлічних потоків бурових розчинів на водній основі.

Циркуляційний канал свердловини розділимо на дві частини: а) випадок руху потоку рідини вгору (проти сил гравітації) і б) випадок течії потоку під дією сил гравітації вниз, до вибою свердловини.

Розглянемо стаціонарний потік в'язкопластичної нестисливої рідини у круглій конусоподібній трубі (рис. 4), яка між контрольними перерізами 1–1 і 2–2 має довжину l і зазнає нагрівання від стінок свердловини (зовнішнього джерела теплоти). Центри ваги поперечних перерізів труби розташовані на висотах h_1 і h_2 , відрахованих від умовного рівня 0–0, прийнятого за початок відліку. Припускається, що у контрольних перерізах 1-1 і 2-2 діють статичні тиски p_1 і p_2 , а також температури T_1 і T_2 .

Для розв'язування задачі застосуємо метод балансу тисків, разом з балансом форм енергій (першим законом термодинаміки).

Оскільки рух потоку рідини (масообмін) може

відбуватися з теплообміном або в адиабатичному режимі як під дією поля сил тяжіння, так і проти поля гравітації (вверх), то баланси тисків для цих двох випадків запишуться по різному.

1. Випадок руху потоку рідини вгору (проти поля сил тяжіння).

У першому наближенні розглянемо рух потоку рідини в адиабатичному режимі. Тобто припускається, що у системі відбувається лише масообмін, а обмін тепловою формою енергії з оточуючим середовищем відсутній.

Рівняння балансу тисків рідини у контрольних перерізах 1-1 і 2-2 для випадку, що розглядається, запишуться у вигляді

$$p_{1a} = p_1 + rgh_1 + r \frac{v_1^2}{2}, \tag{16}$$

$$p_{2a} = p_2 + rgh_2 + r \frac{v_2^2}{2}(1+x), \tag{17}$$

де p_{1a} і p_{2a} - абсолютні значення гідродинамічних тисків у контрольних перерізах (рис. 4); p_1 і p_2 - статичні тиски у тих же перерізах; rgh_1 та rgh_2 - геодезичні тиски, $\frac{rv_1^2}{2}$ та $\frac{rv_2^2}{2}(1+x)$ - динамічні тиски на відповідних перерізах труби; v_1 і v_2 - лінійні швидкості потоку у відповідних перерізах; r - густина рідини; g - прискорення сили тяжіння; x - сумарний коефіцієнт гідравлічного опору, який визначається виразом:

$$x = l \frac{I}{D}, \tag{18}$$

Через I у (18) позначено безрозмірне співвідношення, яке характеризує коефіцієнт гідравлічного тертя:

$$I = \frac{64}{Re}, \tag{19}$$

Цей коефіцієнт залежить від режиму течії потоку (для турбулентного режиму визначається на підставі емпіричних формул [8]).

Величина Re в (19) має назву «критерій Рейнольдса», який записується безрозмірним комплексом величин:

$$Re = \frac{rv_c D_c}{h_0} \tag{20}$$

Тут h_0 - коефіцієнт в'язкості рідини; D_c - середній діаметр труби; v_c - середня швидкість потоку між контрольними перерізами на довжині каналу l .

Різниця тисків (17) і (16) у контрольних перерізах запишеться у вигляді

$$p_{2a} - p_{1a} = p_2 - p_1 + rg(h_2 - h_1) + \frac{r}{2} [v_2^2(1+x) - v_1^2] \tag{21}$$

Це рівняння придатне для визначення різниці абсолютних величин гідродинамічних тисків на вході

і на виході відкритої термодинамічної системи в адиабатичному режимі, коли температура потоку залишається весь час сталою величиною.

2. Рівняння Бернуллі.

Частина задач класичної гідравліки розв'язана на підставі припущення, що механічна система ізолювана від оточуючого середовища і вважається консервативною. Тобто вважається, що система позбавлена всякого енергообміну, а дисипативні сили відсутні, і тому повна механічна енергія в процесі руху потоку законсервована і зберігається у часі без змін. У термодинаміці такий процес називається адиабатичним [1-5]

Якщо зробити припущення, що система ізолювана, тобто, коли $p_{2a} - p_{1a} = 0$, $x = 0$, тоді рівняння (21) можна переписати у класичному вигляді формули Бернуллі:

$$p_2 + rgh_2 + \frac{rv_2^2}{2} = p_1 + rgh_1 + \frac{rv_1^2}{2} \tag{22}$$

Якщо прийняти, що $rg = g$ - питома вага рідини, то рівняння (22) може бути подане у стандартному вигляді [1-5]:

$$\frac{p_2}{g} + h_2 + \frac{v_2^2}{2g} = \frac{p_1}{g} + h_1 + \frac{v_1^2}{2g} \tag{23}$$

Графічно рівняння (23) представлене на рис. 4, з якого видно, що повна питома енергія, яка переноситься ідеальною рідиною поздовж труби, є сталою величиною.

Таким чином бачимо, що формула Бернуллі (22) для практичних потреб застосовується рідко, бо таких ізолюваних систем у природі майже не існує, за винятком термоса (посудини Дьюара).

3. Формула Дарсі Вейсбаха.

Якщо зробити припущення, що система відкрита, а труба циліндрична і швидкості у контрольних перерізах однакові, тобто $D_1 = D_2 = D$; $v_1 = v_2 = v = const$, а також прийняти, що $p_{2a} = p_{1a}$, $h_2 - h_1 = \Delta h$, тоді рівняння (21) набуває вигляду класичної формули Дарсі-Вейсбаха [8]:

$$\frac{p_1 - p_2}{g} = \Delta h + l \frac{lv^2}{D2g} \tag{24}$$

або

$$\Delta p = g\Delta h + l \frac{lgv^2}{D2g} \tag{24}$$

Ця формула застосовується для визначення градієнтів тиску між контрольними перерізами круглих труб. Числові значення коефіцієнта λ залежать від режиму течії потоку (ламінарного або турбулентного).

4. Випадок течії потоку під дією поля сил гравітації.

Рівняння балансу тисків для розглянутого випадку, коли потік рідини рухається в адиабатичному режимі самопливом вниз під дією поля сил тяжіння (рис. 5), запишеться так:

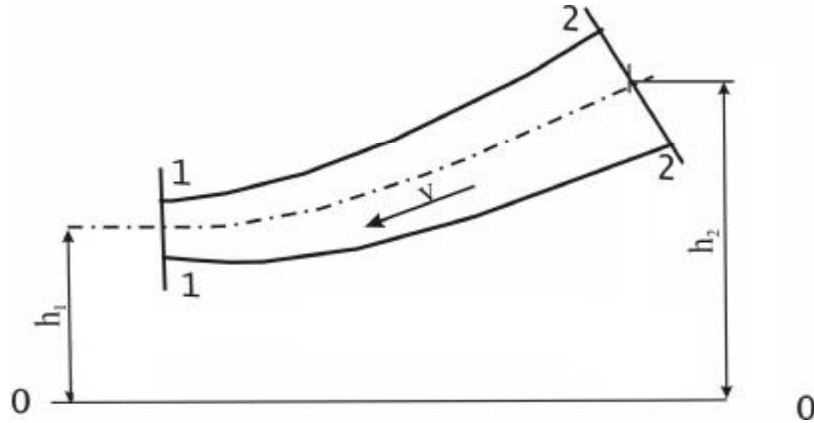


Fig. 5. Hydraulic flow subject to the attraction field.

$$p_{2a} = rgh_2 + p_2 + \frac{rv_2^2}{2} \quad (25)$$

$$p_{1a} = rgh_1 + p_1 + \frac{rv_1^2}{2}(1+x) \quad (26)$$

Різниця статичних тисків у контрольних перерізах дорівнює

$$p_1 - p_2 = rg(h_2 - h_1) - \frac{r}{2} [v_1^2(1+x) - v_2^2] \quad (27)$$

Якщо помножити рівняння (27) на величину секундної витрати рідини Q_p , тоді одержимо величину потужності гідравлічного сопла турбіни будь-якого призначення у вигляді

$$\Delta N = Q_p r \left\{ g(h_2 - h_1) - \left[\frac{v_1^2}{2}(1+x) - \frac{v_2^2}{2} \right] \right\} \quad (28)$$

Якщо у (27) зробити припущення, що $D_1 = D_2 = D$; $v_1 = v_2 = v$; $h_2 - h_1 = \Delta h$, тоді одержимо формулу Дарсі-Вейсбаха

$$\Delta p = g\Delta h - l \frac{lgv^2}{D2g} \quad (29)$$

з якої видно, що енергія гідравлічного потоку, який рухається самопливом під дією поля сил тяжіння, може дещо регулюватися шляхом конструктивних співвідношень каналу по якому підводиться потік до гідротурбіни.

5. Об'єднане рівняння термодинаміки і гідравліки

Для об'єднання форм енергій у відкритій термодинамічній системі застосуємо перший закон термодинаміки у вигляді термодинамічного потенціалу

$$H = U + pV \quad (30)$$

Застосовуючи це універсальне рівняння, запишемо баланси форм енергій у контрольних

перерізах 1-1 і 2-2 у вигляді

$$H_1 = U_1 + p_1V \quad (31)$$

$$H_2 = U_2 + p_2V \quad (32)$$

Підставляючи сюди записані виразами (16) і (17) значення для тисків p_{1a} і p_{2a} (для руху потоку рідини ввєрх), одержимо

$$H_1 = U_1 + \frac{m}{r} \left(p_1 + rgh_1 + r \frac{v_1^2}{2} \right) \quad (33)$$

$$H_2 = U_2 + \frac{m}{r} \left(p_2 + rgh_2 + r \frac{v_2^2}{2}(1+x) \right) \quad (34)$$

де $m/\rho = V$ - об'єм системи; m - маса і ρ - густина речовини у системі.

Якщо поділити обидві частини рівнянь (33) і (34) на час t і врахувати секундну витрату маси речовини $G = m/t$, тоді ці рівняння набувають вигляду

$$I_1 = E_1 + \frac{1}{r} \left(p_1 + rgh_1 + r \frac{v_1^2}{2} \right) \quad (35)$$

$$I_2 = E_2 + \frac{1}{r} \left(p_2 + rgh_2 + r \frac{v_2^2}{2}(1+x) \right) \quad (36)$$

де $I_1 = H_1/Gt$ і $I_2 = H_2/Gt$ - питомі швидкості наростання ентальпії у контрольних перерізах системи; $E_1 = U_1/Gt$ і $E_2 = U_2/Gt$ - питомі швидкості зміни внутрішньої енергії речовини у контрольних перерізах.

Різниця питомих термодинамічних потенціалів з урахуванням їхньої швидкості зміни у часі записується виразом:

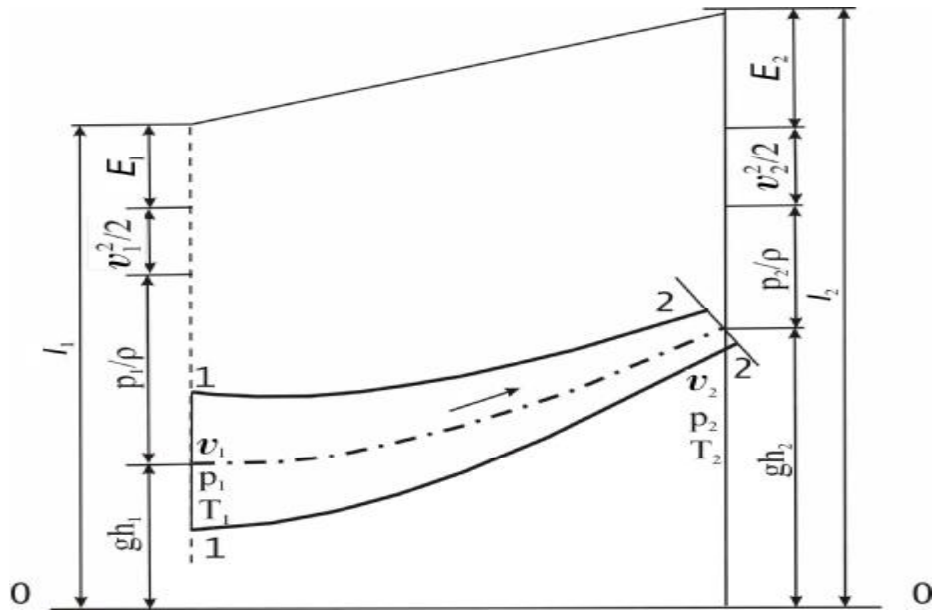


Fig. 6. Illustration of the balance of specific energies in control sections of the open thermodynamic system.

$$I_2 - I_1 = (E_2 - E_1) + \left(\frac{p_2 - p_1}{r} \right) + g(h_2 - h_1) + \left[\frac{v_2^2}{2}(1+x) - \frac{v_1^2}{2} \right] \quad (37)$$

і відображається на рис. 6. Це рівняння об'єднує теплову і механічну форми енергії, які переносяться гідравлічним потоком крізь відкриту термодинамічну систему свердловини, яка є прикладом теплообмінника.

6. Фізичне моделювання процесів руху гідравлічних потоків крізь відкриту термодинамічну систему.

Фізичне моделювання полягає у пошуках наукового обґрунтування способів зменшення числа змінних фізичних величин, з яких складаються функціональні рівняння, що описують різноманітні інженерні процеси. Зменшення числа змінних фізичних величин, які фігурують у робочих рівняннях, можна добитися шляхом утворення безрозмірних комплексів і сімплексів. Перші утворюються з декількох величин, а другі з двох. Такі безрозмірні комплекси і сімплекси мають назву критеріїв подібності, яким привласнені імена видатних науковців: Ньютона, Ейлера, Фруда, Рейнольдса, Прандтля, Грасгофа, тощо.

Оскільки рівняння термодинаміки і гідромеханіки можуть бути складені з питомих величин, які від масштабу процесів не залежать, тому що, стосуються лише одиниці виміру (об'єму, маси, моля), то комплексне рівняння (37) може бути подане у безрозмірному вигляді так:

$$\frac{1}{Q_H} - \frac{1}{Q_U} + Sh = E_u + \frac{1}{F_r} + (1+x) \quad (38)$$

де $Q_H = \frac{v_2^2}{2(I_2 - I_1)}$ - температурний критерій для

$q_U = \frac{v_2^2}{2(E_2 - E_1)}$ - температурний критерій для внутрішньої енергії;

$E_U = \frac{2(p_2 - p_1)}{r v_2^2}$ - критерій Ейлера;

$F_r = \frac{v_2^2}{2g(h_2 - h_1)}$ - критерій Фруда;

$S_h = \frac{v_1^2}{v_2^2}$ - критерій Струхаля.

Комбінуючи різні величини критеріїв подібності, можна дослідити рівняння (38) і оцінити ступінь впливу термодинамічних процесів у свердловині на ту чи іншу операцію під час її спорудження. Наближеним прикладом важливості зазначеного вище, можуть слугувати результати досліджень подані в роботі [9], де оцінено вплив температури на втрати напору при русі рідини у трубі. Так, при збільшенні температури на 70°C втрати напору при ламінарному режимі зменшуються майже втричі, а при турбулентному тільки в 1,29 разів.

Висновки

У загальному випадку кінетичні закономірності будь-яких процесів можуть бути сформульовані у вигляді такої залежності: швидкість процесу прямо пропорційна рушійній силі і обернено пропорційна спротиву, який необхідно подолати у міру здійснення

процесу (рух рідини чи газу, передача тепла, механічний рух і т.п.). Оскільки теплові процеси у свердловині протікають досить інтенсивно і мають безпосередній вплив на всі решта процесів у ній, ігнорувати цей вплив недопустимо. Підвищення температури бурового розчину призводить до зменшення його реологічних параметрів і як наслідок до зміни балансу тисків у свердловині як у статичних так і динамічних умовах. Перевищення пластового тиску над сумарним тиском у свердловині вище допустимого значення може викликати флюїдопроявлення у процесі буріння, тоді як зворотна ситуація може призвести до поглинання, гідророзриву пласта чи втрати стійкості стінок свердловини. Зменшення тиску на вибій має і позитивні наслідки, оскільки зменшується тиск пригнічення, унаслідок чого можна збільшити механічну швидкість буріння без збільшення навантаження на долото чи швидкості його

обертання. Зміна тиску та температури також впливає на напружено-деформований стан гірських порід з чим пов'язана конфігурація ствола свердловини та імовірність виникнення різного роду ускладнень. Тому необхідно коригувати традиційні методики розрахунку режимно-технологічних параметрів буріння з урахуванням зміни термодинамічного стану системи, яка включає в себе масив гірських порід, елементи конструкції свердловини, буровий розчин чи іншу рідину, що циркулює у свердловині та буровий інструмент.

Білецький Я.С. – кандидат технічних наук, доцент;
Сенюшкович М.В. - кандидат технічних наук, доцент;
Білецька І.Я. – аспірант;
Шимко Т.Я. - Новоуренгойська бурова компанія, РФ, директор компанії.

- [1] G.N. Alekseev, *Obshhaja teplotehnika (Vysshaja shkola, Moskva, 1980).*
- [2] A.I. Andrijshhenko, *Osnovy tehnichekoj termodinamiki (Vysshaja shkola, Moskva, 1975).*
- [3] M.P. Vukalovich, *Tablicy termodinamicheskikh svojstv vody vodjanogo para (Jenergija, Moskva-Leningrad, 1965).*
- [4] V.L. Kirillin, V.V. Sychev, A.E. Shejndlin, *Tehnicheeskaja termodinamika (Nauka, Moskva, 1979).*
- [5] R. Kubo, *Termodinamika (Mir, Moskva, 1970).*
- [6] D.Ju. Mochernjuk, *Visnik L'viv's'kogo politehničnogo universitetu. Teploenergetični sistemi ta pristroi 256, 50 (1991).*
- [7] I.M. Kucheruk, I.T. Gorbachuk, P.P. Lucik, *Zagal'nij kurs fiziki (Tehnika, Kyjiv, 1999).*
- [8] R.R. Chugaev, *Gidravlika (Jenergoizdat, Leningrad, 1982).*
- [9] B.I. Es'man, *Termogidravlika pri burenii skvazhin (Nedra, Moskva, 1982).*

J.S. Beletsky, M.V. Senyushkovych, I.J. Beletsky, T.J. Shymko

Thermodynamics of non-Newtonian fluids (drilling mud)

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 76019, m. Ivano-Frankivsk, st. Carpathian 15
 e-mail: drill@nung.edu.ua*

Using the method of pressure balance with balance energy forms, calculations are made hidrotermodinamichni mobile hydraulic flow in the well drilling fluids, water-based, which accumulate and transmit energy to other elements. The cases of the flow of liquid upwards (against gravity) and the current flow under gravity down to the bottom hole. The resulting complex equation with specific values that do not depend on the scale of thermodynamics and fluid mechanics processes that occur in the borehole. By combining different similarity criteria can assess the impact of these processes on the performance of any operation in the well during its construction.

The dependences can be used dlyautochnennya procedures governing the calculation of regime and technological parameters of the construction of deep wells.

Keywords: well, mud, hydrodynamic process.