

М. Є. Чернова

ФІЗИКА АСПЕКТІВ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ЯВИЩ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

Івано-Франківській Національний технічний університет нафти і газу

Стаття присвячена проблемам технологічного процесу, що описується фізичними законами, зокрема явищами перенесення та енергією потоку неньютонівської рідини. Проводиться спроба опису руху рідини в обмеженому просторі з можливістю її транспортуючої здатності, на основі ефекту Чоломея, тобто здатності певних часток у рідині піддаватися явищу спливання. До прикладу, таке явище спричинює краще очищення забою свердловини (нафто-газової чи іншої), що будується. Метою є забезпечення опису потоку рідини, здатної у достатньо замкнутому просторі, за рахунок певних явищ та процесів, створювати турбулентний потік технічної рідини, котра використовується, й тим самим здатна забезпечувати реалізацію відповідних технологічних процесів, котрі є необхідні у технічному виконанні. Одним з таких напрямків є забезпечення стійкого обертово-поступальний рух течії потоку, що досягається за певних значень числа Фруда (Fr), котрі є різними для рідин з різними реологічними властивостями. Так до прикладу, число Рейнольдса (Re) неньютонівської рідини мусить володіти значенням, що є удвічі більшим ніж у аналогічній, за молекулярним складом неньютонівської. Між такими рідинами існує функціональний зв'язок, що описується параболічною залежністю. Інтуїтивно, за накопиченим досвідом, створено певні пристрої, котрі здатні вирішувати проблему, зазначену вище, але в науці експеримент мусить бути підтвердженням теорії, а теорія – експериментом. На сьогодні, на превеликий жаль є відсутніми методичні рекомендації, що враховували б, з точки зору фізики, для технологів специфіку гідродинамічних процесів, до прикладу, у часі будівництва похило-скерованих і горизонтальних свердловин, відповідними засобами та пристроями. А то є важливе обґрунтування задля створення задуманих основних засад у цьому напрямку, результатом котрих є відповідність та теоретичне підтвердження аксіомних технологічних напрацювань, котрими у значній кількості володіють роботодавці на нафтогазових підприємствах. У першому наближенні поставлена мета досягнута шляхом застосування співвідношень для неперервного потоку, котрі враховують кінематичні характеристики рідини.

Ключові слова: фізика явищ перенесення, коливання, турбулентність, струмина, нестационарний потік, енергія потоку, неньютонівська рідина.

M.Je. Chernova

PHYSICS OF ASPECTS IN HYDRODYNAMIC PHENOMENA IN TECHNOLOGICAL PROCESSES

The article is devoted to the problems of the technological process described by physical laws, in particular, the phenomena of transfer yet energy of the flow of a non-stationary fluid. An attempt is made to describe the movement of a liquid in a confined space with the possibility of its transporting capacity, based on the Cholomew effect, i.e. the ability of certain particles in a liquid to undergo the phenomenon of surfacing. For example, such a phenomenon causes better cleaning of the bottom of a well (oil and gas or other) being constructed. The goal is to provide a description of the flow of a fluid capable, in a sufficiently closed space, due to certain phenomena and processes, of creating a turbulent flow of the technical fluid used, and thereby capable of ensuring the implementation of the corresponding technological processes necessary for technical fulfillment. One of these directions is to ensure stable rotational-transitional flow motion, which is achieved at certain values of the Froude number (Fr), which are different for liquids with different rheological properties. For example, the Reynolds number (Re) of a Newtonian fluid must have a value that is twice that of a non-Newtonian fluid with similar molecular composition. There is a functional relationship between such fluids, described by a parabolic relationship. Intuitively, based on accumulated experience, certain devices have been created that are capable of solving the problem mentioned above, but in science, an experiment must be confirmed by theory, and theory by experiment. Today, unfortunately, there are no methodological recommendations that would take into account, from the point of view of physics, the specifics of hydrodynamic processes for technologists, for example, during the construction of inclined and horizontal wells, with appropriate means and devices. And this is an important justification for creating the intended basic principles in this direction, the result of which is the correspondence and theoretical confirmation of axiomatic technological developments, which are possessed in significant quantities by employers in the oil and gas fields. In a first approximation, the goal is achieved by applying relations for continuous flow, which take into account the kinematic characteristics of the fluid.

Keywords: physics of transport phenomena, oscillations, turbulence, jet, unsteady flow, flow energy, non-Newtonian fluid.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науково-практичними завданнями. У часі повоєнної відбудови України, а на сам перед стосовно відновлення нафто-газового комплексу, котрий здатний забезпечити нашу державу власними вуглеводневими енергоносіями більше ніж на 60%, ефективність та швидкість буріння похило-скерованих (ПС) і горизонтальних свердловин (ГС) залежить від якісного очищення забою та швидкого винесення розбуреної породи на денну поверхню. Це забезпечить відсутність явища повторного перемелювання породи, що руйнується буровим інструментом, а разом пришвидшить час будівництва свердловини, практично на 30%. Якщо врахувати основні показники, що складають собівартість будівництва свердловини, зокрема, ціна орендованого обладнання, оплата праці

співробітникам компанії, витратні ресурси, то набігає значна сума у кошторисі. Кожна з нафтогазових компаній володіє власними засобами та пристроями, котрі здатні забезпечити ці відсоткові показники й технологічно представляють собою патенти на винахід, що належать державі-агресору або ж патенти на корисну модель, котрі видає Україна, але їх напрацювання є інтуїтивно-технічними аніж науково обґрунтованими.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як відомо, намагання теоретично розглянути умови формування стійкого обертово-поступального руху промивальної рідини в позатрубному просторі свердловини, що будується, за рахунок енергії потоку рідини з можливістю регулювання її гідродинамічними параметрами й структурою самого потоку, практично не розглядалося. Врахування гірничо-геологічних характеристик нафто-газового родовища також є не останньою справою. У багатьох авторських патентах, починаючи від минулого століття й до тепер, [1, 2] зазначається, що розроблені пристрої й технічно-технологічні засоби створюють турбулентний потік рідини значної потужності для якісного очищення забою та винесення розбуреної породи, як такої, на денну поверхню. Але усі напрацювання є швидше інтуїтивно – практичними. Теоретичного дослідження у цьому плані, практично не проводилось.

Формулювання цілей статті полягає у намаганні підібрати певні математичні залежності задля можливості описати енергетичні характеристики турбулентного потоку промивальної рідини, до прикладу, в кільцевому просторі свердловини. Бо є відомо про те, що турбулентний потік, володіючи певними енергетичними характеристиками, мусить утворюватися у просторі між стінками стовбура свердловини та стінками бурової колони.

Пропоновані обчислення, що проводились, були із застосуванням комп'ютерної програми «МАТКАД». За допомогою неї проводились розрахунки енергетичних параметрів стійкого обертово-поступального потоку, до прикладу для сучасної біополімерної промивальної рідини, склад котрої кожна компанія тримає у секреті, але мета в усіх технологів є однаковою, а саме, забезпечити зниження водовіддачі, бо то є водний розчин високомолекулярного полімеру, розчин мусить запобігати диспергуванню порід, що буряться, покращувати реологічні властивості цього самого бурового розчину, забезпечити підвищення його транспортуючої здатності а разом, той розчин мусить забезпечити охолодження інструменту з одночасним підтриманням гідростатичного тиску у свердловині, як такий. Але ці характеристики рідини, у даному контексті нас не цікавлять, бо не про них мова, хоча мусимо наявність завдань рідини враховувати.

На превеликий жаль, ті що залишилися уцілілими в часі війни, нафтові й газові родовища нашої держави мають значно виснажені основні запаси. Тому, у повоєнний час відбудови нафто-газового комплексу нашої держави, надзвичайно актуальним і важливим є впровадження вітчизняних технологій і технічних засобів задля підвищення ефективності бурових робіт, спрямованих на збільшення видобутку нафти і газу. За аналізом останніх літературних джерел [3, 4] засвідчено, що найефективнішим методом підвищення дебіту виснажених свердловин, та таких родовищ, що перебувають в надрах певних територіальних громад, є будівництво похило-скерованих (ПС) та горизонтально-скерованих (ГС) свердловин. Фахівцями нафтогазовидобувних компаній світу, як до прикладу, США, Канади, Туркменістану, Казахстану, Франції, ОАЕ та інших, напрацьовано багато сучасних технологій для успішного буріння такого типу свердловин. Однак, як засвідчили раніше наведені промислові дослідження [5], відомі напрацювання не є придатними до буріння ПС і ГС свердловин на родовищах України, позаяк тут існують на певних глибинах, зокрема в діапазоні 2÷3 км горизонти нестійких порід. Тому, власне, в часі розроблення технології будівництва тих чи інших ПС й ГС свердловин, щоразу потрібно враховувати гірничо-геологічні особливості тих чи інших наших родовищ. Разом з тим важливим напрямком робіт, у часі будівництва ПС і ГС свердловин є створення технічних засобів і технологій, що враховують також і специфіку гідродинамічних процесів, котрі наявні у свердловині в часі її будівництва. Промислові дані засвідчують, що через неефективне очищення похило-скерованого і горизонтального стовбура свердловини, що будується, стаються різного роду ускладнення та аварії, що спричинює додаткові матеріальні затрати й не лише. Таким чином, вдосконалення гідродинамічних явищ, що супроводжують будівництво ПС і ГС свердловин є одним із нагальних завдань сьогодення. А надто важливим є формування стійкого обертово-поступального руху промивальної рідини у кільцевому просторі ГС і ПС свердловин безпосередньо енергією потоку [1, 2] та можливість регулювання гідродинамічними параметрами й структурою потоку з урахуванням конкретних геологічних та технічно-технологічних умов будівництва певної свердловини на родовищах України, особливо мусять бути враховані ті фактори, що здатні викликати ускладнення в часі буріння свердловин ПС і ГС, умови формування стійкого обертово-поступального потоку неньютонівської рідин, якою є

технологічна рідина, що використовується. Зауважимо, що важливими є усі фактори, що впливають на транспортувальну здатність рідини за різних її реологічних властивостей в часі обертово-поступального руху течії в кільцевому просторі. Отже, є необхідними теоретичні дослідження, що пов'язані з проектуванням та розрахунками спеціальних гідродинамічних елементів у комплексі з компонуванням низу бурильної колони, котрі, власне, й дадуть можливість забезпечити керування технологічними процесами в часі будівництва ПС та ГС свердловин.

Викладення основного матеріалу. За промисловими дослідженнями є відомо, що потоки, котрі володіють стійким обертово-поступальним рухом здатні забезпечити їм високі транспортуючі властивості [6, 7]. Це стосується як ньютоновських так і неньютоновських рідин. Для цього число Фруда (Fr), яке є однією з основних реологічних характеристик рідин, і за своїм порядком визначає відношення кінетичної енергії рідини до приросту енергії зумовленої роботою сил тяжіння на шляху, що дорівнює характерній довжині, повинно бути не меншим від 1, для неньютоновської рідини, якою, власне, є бурова промивальна рідина. За такого значення сили в'язкості відіграють стабілізуючу роль і для ньютоновської рідини мінімальне значення критерію Рейнольдса (Re) складає 45, оскільки він пов'язаний пропорційно з обертовою швидкістю потоку в обмеженому просторі. Для неньютоновської рідини мінімальне значення критерію Рейнольдса є $Re > 20$, але тут функціональний зв'язок між ньютоновською і неньютоновською рідинами є параболічним [8]. Потік рідини з поступально-обертовим рухом, у структурі котрої є, до прикладу, подрібнена порода, може розглядатися з деяким наближенням як «тверде тіло», а тому й може описуватися, у деяких випадках, з погляду властивостей твердого тіла.

Такі умови можуть досягатися у випадку, якщо розподіл осьової швидкості потоку під час входу у гідродинамічний генератор відбувається за параболічним законом, тоді на виході створюються такі умови, що обертова складова швидкості є більшою від осьової за степеневим законом розподілу [9]. У такому випадку інерційні сили переважають над силами в'язкості, а масові сили консервативно впливають на потік. Зокрема, структура біополімерних промивальних рідин, які останнім часом широко застосовуються при бурінні ПС і ГС, включає в себе органічні та неорганічні компоненти, тому і може з певним наближенням, під час розроблення наукових основ динаміки промивальних рідин у затоплених потоках розглядатися з погляду властивостей квазітвердого тіла [9].

Характеристики коливань, що збуджуються у потоці, із застосуванням гідродинамічних пристроїв, котрі конструюють, до прикладу, у компонуванні низу бурильної колони, найбільш повно здатні описуватися амплітудно-частотними (АЧХ) та фазово-частотними характеристиками (ФЧХ) [6].

Зокрема, пропонується, що безрозмірні рівняння руху та неперервності потоку можуть мати вигляд:

$$\frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial \bar{t}} = \left(\frac{L}{\bar{r} R^2 a} \right) \partial \left\{ \bar{r} \left[\left(\frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial \bar{r}} \right) \nu - \left(\frac{R}{g_0} \right) \langle u' v' \rangle \right] \right\} \partial \bar{r} - \left(\frac{1}{\alpha} \right) \frac{\partial \langle \bar{p} \rangle}{\partial \bar{x}}, \quad (1)$$

$$\left(\frac{1}{\alpha} \right) \frac{\partial \langle \bar{p} \rangle}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial \langle \bar{v} \rangle}{\partial \bar{r}} + \left(\frac{\bar{v}}{\bar{r}} \right) + \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial \bar{x}} = 0, \quad (2)$$

тут $\langle \bar{u} \rangle = \frac{\langle u \rangle}{U_0}$, $\langle \bar{v} \rangle = \frac{\langle v \rangle}{U_0}$ – безрозмірні усереднені складові осьової та радіальної

швидкості відповідно (вони включають як турбулентні, достатньо високочастотні, так і вимушені низькочастотні коливання); U_0 – середнє значення швидкості потоку в трубі; u', v' – турбулентні

пульсації швидкості вздовж вісі та по радіусу; ν – кінематична в'язкість рідини; $\langle \bar{p} \rangle = \frac{\langle p \rangle}{p_0}$ –

безрозмірний тиск; p_0 – середній тиск в трубі; $\bar{t} = \frac{ta}{L}$ – безрозмірний час; $\bar{r} = \frac{r}{R}$, $\bar{x} = \frac{x}{L}$ –

безрозмірні координати по радіусу і вздовж вісі труби; $\alpha = \frac{\rho U_0 a}{p_0}$ – приведений опір рідини в трубі;

ρ – густина рідини.

Для виключення з рівності (1) пульсаційних складових швидкості u' та v' застосовуємо гіпотезу Буссінеска, про зв'язок дотичного турбулентного напруження τ_r з градієнтом швидкості вздовж радіусу, зокрема:

$$\tau_T = -\rho \langle u'v' \rangle = \rho \nu_T \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial r}, \quad (3)$$

з урахуванням котрого рівняння (1) буде мати вигляд:

$$\frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial t} = \left(\frac{L}{\bar{r} R^2 a} \right) \frac{\partial \left[\bar{r} (v + v_T) \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial \bar{r}} \right]}{\partial \bar{r}}, \quad (4)$$

тут ν_T – коефіцієнт турбулентної в'язкості.

Зручно розділити усі змінні на дві складові: на середні значення параметрів, що встановилися й малі періодичні збурення (варіації). Тоді можемо записати:

$$\langle \bar{u} \rangle = \bar{u} + \delta \bar{u}, \quad \langle \bar{v} \rangle = \bar{v} + \delta \bar{v}, \quad \langle \bar{p} \rangle = 1 + \delta \bar{p}, \quad (5)$$

тут $\bar{u} = \frac{u}{U_0}$ – безрозмірне стаціонарне значення поздовжніх складових швидкості;

$\bar{v} = \frac{v}{U_0}$ – безрозмірне стаціонарне значення радіальної складової швидкості; $\delta \bar{u} = \frac{\delta u}{U_0}$ –

безрозмірна варіація поздовжньої складової швидкості; $\delta \bar{v} = \frac{\delta v}{U_0}$ – безрозмірна варіація радіальної

складової швидкості; $\delta \bar{p} = \frac{\delta p}{p_0}$ – безрозмірна варіація тиску.

Задля отримання рівнянь, що описують розподіл коливань у тракті, шукаємо часткові періодичні розв'язки системи рівнянь (2) і (4) у такому вигляді:

$$\delta \bar{u} = \delta \bar{u}_a e^{(i\bar{\omega}t)}; \quad \delta \bar{v} = \delta \bar{v}_a e^{(i\bar{\omega}t)}; \quad \delta \bar{p} = \delta \bar{p}_a e^{(i\bar{\omega}t)}, \quad (6)$$

тут $\bar{\omega} = \frac{\omega L}{a}$ – безрозмірна частота; $\delta \bar{u}_a$, $\delta \bar{v}_a$, $\delta \bar{p}_a$ – безрозмірні амплітуди варіацій

відповідних параметрів, які залежать від $\bar{x}$, $\bar{r}$, $\bar{\omega}$.

Лінеаризувавши рівняння (2) і (4), та підставивши в них співвідношення (5) і розв'язки (6), знаходимо диференціальні рівняння, що пов'язують амплітуди коливань, тиску й складові швидкості вздовж вісі труби відносно радіусу:

$$i\bar{\omega} \delta \bar{u}_a = -\left(\frac{1}{\alpha} \right) \frac{\partial \delta \bar{p}_a}{\partial \bar{x}} + \left(\frac{\bar{L}}{r R^2 a} \right) \frac{\partial \left[\bar{r} (v + v_T) \frac{\partial \delta \bar{u}_a}{\partial \bar{r}} \right]}{\partial \bar{r}}, \quad (7)$$

$$i\bar{\omega} \delta \bar{p}_a + \frac{\partial \delta \bar{v}_a}{\partial \bar{r}} + \frac{\delta \bar{v}_a}{\bar{r}} + \frac{\partial \delta \bar{u}_a}{\partial \bar{x}} = 0. \quad (8)$$

Задля оцінки відносного вкладу кінематичної в'язкості рідини ν та коефіцієнта турбулентної в'язкості ν_T співставляється товщина в'язкого пристінкового шару [1.2,8] $\xi = \frac{30\nu}{u_*}$ та глибина проникнення збурень у потік за коливань в'язкого середовища (в ламінарному пристінковому шарі):

$$\delta = \left(\frac{2\nu}{\omega} \right)^{0.5} \quad (9)$$

тут $u_* = \left(\frac{|\tau_w|}{\rho} \right)^{0.5}$ – динамічна швидкість; τ_w – дотичне напруження на стінці.

Задля оцінки величини τ_w використовуємо зв'язок цього параметру з коефіцієнтом опору λ :

$$\tau_w = \frac{\lambda \rho U^2}{8}, \quad (10)$$

і рівнянням Блязіуса типу:

$$\lambda = \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}}, \quad (11)$$

тут U – середня швидкість у перерізі; Re – число Рейнольдса.

Перетворення рівнянь (7), (8) проводиться введенням змінної:

$$\delta \bar{z}_a = \delta \bar{u}_a + \left(\frac{1}{i \bar{\omega} \alpha} \right) \frac{\partial \delta \bar{p}_a}{\partial \bar{x}}, \quad (12)$$

ураховуючи, що за умови $R \ll L$, $\frac{\partial \delta \bar{p}}{\partial \bar{r}} = 0$, визначається:

$$\frac{\partial^2 \delta \bar{z}_a}{\partial \bar{r}^2} + \left(\frac{1}{\bar{r}} \right) \frac{\partial \delta \bar{z}_a}{\partial \bar{r}} - i s^2 \delta \bar{z}_a = 0, \quad (13)$$

тут $s = R \sqrt{\frac{\omega}{\nu}}$ – безрозмірний параметр, який називають числом Стокса.

Розв'язок рівняння (13) має вигляд:

$$\delta \bar{z}_a = E(\bar{x}, \bar{\omega}) J_0(i^{\frac{3}{2}} \bar{r} s) + F(\bar{x}, \bar{\omega}) Y_0(i^{\frac{3}{2}} \bar{r} s), \quad (14)$$

тут J_0, Y_0 – функції Бесселя; $E(\bar{x}, \bar{\omega})$, $F(\bar{x}, \bar{\omega})$ – невідомі функції.

Ураховуючи, що під час прямування аргументу до нуля, функція Бесселя Y_0 прямує у нескінченність, а амплітуда варіації швидкості $\delta \bar{u}_a$, а отже й $\delta \bar{z}_a$ є обмеженими, тож функція $F(\bar{x}, \bar{\omega}) = 0$.

Враховуючи граничну умову залипання пристінкового шару $\delta \bar{u} = 0$ за умови $\bar{r} = 1$, знаходимо співвідношення для функції $E(\bar{x}, \bar{\omega})$, а відповідно для амплітуд варіації $\delta \bar{z}_a$:

$$\delta \bar{z}_a = \left(\frac{1}{i \omega \alpha} \right) \left[\frac{J_0(i^{\frac{3}{2}} s \bar{r})}{J_0(i^{\frac{3}{2}} s)} \right] \frac{\partial \delta \bar{p}_a}{\partial \bar{x}}, \quad (15)$$

та варіації швидкості:

$$\delta \bar{u}_a(\bar{x}, \bar{r}, \omega) = - \left(\frac{1}{i \bar{\omega} \alpha} \right) \left(\frac{\partial \delta \bar{p}_a}{\partial \bar{x}} \right) \left[1 - \frac{J_0(i^{\frac{3}{2}} s \bar{r})}{J_0(i^{\frac{3}{2}} s)} \right]. \quad (16)$$

Для аналізу розподілу амплітуд варіацій швидкості й тиску, до прикладу, по довжині свердловини, вводимо середню за перерізом амплітуду варіації швидкості:

$$\delta \bar{U}_a(\bar{x}, \bar{\omega}) = \left(\frac{1}{\pi} \right) \int_0^1 2 \pi \bar{r} \delta \bar{u}_a(\bar{x}, \bar{r}, \bar{\omega}) d\bar{r}, \quad (17)$$

котра з допомогою співвідношення (16) набуде виду:

$$\delta \bar{U}_a(\bar{x}, \bar{\omega}) = - \left(\frac{1}{i \bar{\omega} \alpha} \right) \left(\frac{\partial \delta \bar{p}_a}{\partial \bar{x}} \right) \left[1 - \frac{2 J_1(i^{\frac{3}{2}} s)}{i^{\frac{3}{2}} s J_0(i^{\frac{3}{2}} s)} \right], \quad (18)$$

тут J_1 – функція Бесселя першого роду першого порядку.

Якщо ввести параметр β , що визначається залежністю:

$$\left(\frac{1}{\beta^2} \right) = \left(\frac{2}{i^{\frac{3}{2}} s} \right) \left[\frac{J_1(i^{\frac{3}{2}} s)}{J_0(i^{\frac{3}{2}} s)} \right] - 1, \quad (19)$$

То рівняння руху (18) кінцево набуде вигляду:

$$\delta \bar{U}_a = \left(\frac{1}{i\bar{\omega}\alpha} \right) \left(\frac{1}{\beta^2} \right) \frac{\partial \delta \bar{p}_a}{\partial \bar{x}}. \quad (20)$$

Провівши з рівністю неперервності (8) аналогічні перетворення що й з рівністю (7), та врахувавши граничні умови на пристінковому шарі, отримується співвідношення:

$$\delta \bar{p}_a = \left(\frac{\alpha}{i\bar{\omega}} \right) \frac{\partial \delta \bar{U}_a}{\partial \bar{x}}. \quad (21)$$

Виключивши зі співвідношень (20) та (21) амплітуду варіації тиску, отримується рівняння, що визначає розподіл амплітуд коливань середньої швидкості по довжині потоку, до прикладу, свердловини:

$$\frac{d^2 \delta \bar{U}_a}{d\bar{x}^2} - \beta^2 \bar{\omega}^2 \delta \bar{U}_a = 0. \quad (22)$$

Оскільки, корені характеристичного рівняння (22) дорівнюють $\pm \beta \bar{\omega}$, його розв'язок буде мати вигляд:

$$\delta \bar{U}_a = C e^{(\beta \bar{\omega} \bar{x})} + D e^{(-\beta \bar{\omega} \bar{x})}. \quad (23)$$

Підставивши розв'язок (23) у (21), знаходиться розв'язок для амплітуди варіації тиску:

$$\delta \bar{p}_a = i\beta\alpha \left[C e^{(\beta \bar{\omega} \bar{x})} - D e^{(-\beta \bar{\omega} \bar{x})} \right]. \quad (24)$$

Для визначення констант C та D формулюються граничні умови, до прикладу, для вибою та устя свердловини:

$$\bar{x} = 0; \quad \delta \bar{p}_a = \Psi_0 \delta \bar{U}_a + \gamma_0 \delta \bar{y}_0, \quad (25)$$

$$\bar{x} = 1; \quad \delta \bar{p}_a = \Psi_1 \delta \bar{U}_a + \gamma_1 \delta \bar{y}_1, \quad (26)$$

тут Ψ_0, Ψ_1 – відповідно вхідний та вихідний імпеданси; γ_0, γ_1 – коефіцієнти підсилення для зовнішніх збурень на вході $\delta \bar{y}_0$ й на виході $\delta \bar{y}_1$ потоку.

Підставлення розв'язків (23) і (24) у граничні умови (25) та (26) дає можливість визначити коефіцієнти C та D , після чого віднаходяться співвідношення, що зв'язують коливання швидкості і тиску в довільному перерізі, до прикладу, свердловини за відомої частоти коливань:

$$\delta \bar{U}_a(\bar{x}, \bar{\omega}) = \left(\frac{\gamma_1}{B} \right) \left[(\alpha_n - \Psi_0) e^{(\beta \bar{\omega} \bar{x})} + (\alpha_n + \Psi_0) e^{(-\beta \bar{\omega} \bar{x})} \right] \delta \bar{y}_1 - \quad (27)$$

$$- \left(\frac{\gamma_0}{B} \right) \left\{ (\alpha_n + \Psi_1) e^{[\beta \bar{\omega} (1-\bar{x})]} + (\alpha_n - \Psi_1) e^{[-\beta \bar{\omega} (1-\bar{x})]} \right\} \delta \bar{y}_0;$$

$$\delta \bar{p}_a(\bar{x}, \bar{\omega}) = \left(\frac{\alpha_n \gamma_1}{B} \right) \left[(\alpha_n + \Psi_0) e^{(-\beta \bar{\omega} \bar{x})} - (\alpha_n - \Psi_0) e^{(\beta \bar{\omega} \bar{x})} \right] \delta \bar{y}_1 - \quad (28)$$

$$- \left(\frac{\alpha_n \gamma_0}{B} \right) \left\{ (\alpha_n + \Psi_1) e^{[\beta \bar{\omega} (1-\bar{x})]} - (\alpha_n - \Psi_1) e^{[-\beta \bar{\omega} (1-\bar{x})]} \right\} \delta \bar{y}_0;$$

тут $B = (\alpha_n + \Psi_0)(\alpha_n - \Psi_1) e^{(-\beta \bar{\omega})} - (\alpha_n - \Psi_0)(\alpha_n + \Psi_1) e^{(\beta \bar{\omega})}$; $\alpha_n = -i\alpha\beta$ – приведений хвильовий опір.

Рівняння (27) та (28) дають можливість визначити хвильові характеристики турбулентного потоку рідини, до прикладу, у кільцевому каналі простору в свердловині за стійкого обертового-поступального руху.

У часі проведення розрахунків використовувалися дані реальних умов буріння, зокрема $P = 3 \text{ МПа}$; вхідні й вихідні характеристики тракту генератора включають розміри вхідних і вихідних камер генератора, для яких розхід рідини становить $Q = 36 \text{ л/с}$, а співвідношення

хвильового опору становило $\frac{2\Delta p_1}{\rho U_0 a} = 2,55$, для полімерної рідини «Біокар».

На рисунку 1 наведено результат визначення хвильових характеристик тракту (АЧХ) генератора і зсуву фаз між амплітудами коливань (ФЧХ), звідки видно як залежно від амплітудо-

частотних (а) та фазово-частотних (б) характеристик генератора змінюються енергетичні характеристики потоку, до прикладу, в кільцевому просторі свердловини.

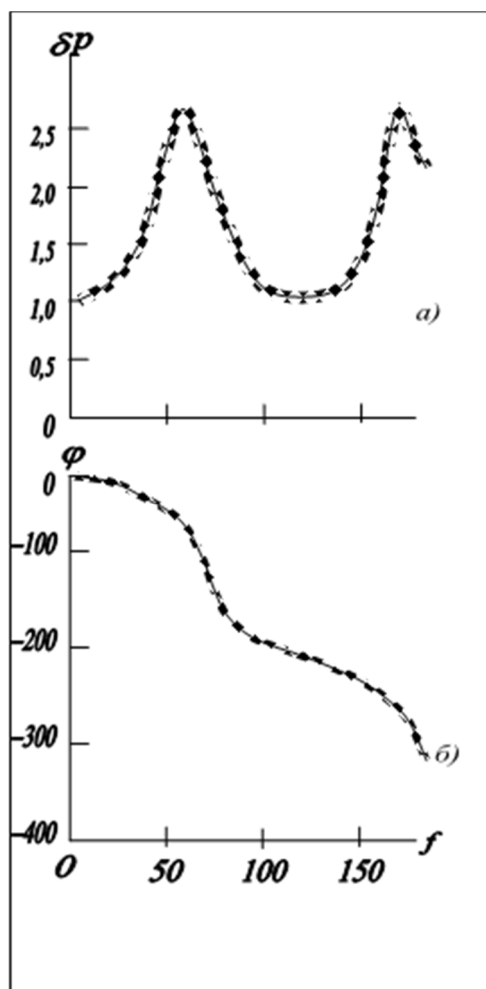


Рис. 1. Амплітудно-частотні (а) і фазово-частотні (б) характеристики тракту потоку

Наявність резонансних піків дає можливість визначити межі таких амплітуд і частот, за яких робочі характеристики генератора будуть давати стійкий турбулентний потік.

Висновки: Підвищення ефективності буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин можливе за рахунок досконалих гідродинамічних циркуляційних процесів промивальної рідини в позатрубному просторі свердловини.

Формування стійкого обертово-поступального руху промивальної рідини в кільцевому каналі позатрубного простору ПС і ГС здатне забезпечитися енергією самого потоку, енергетичні характеристики якого залежать від конструкції та технічних характеристик гідроакустичного генератора, що включається у компоновання низу бурильної колони.

Науково обумовлений вибір характеристик гідродинамічних циркуляційних процесів забезпечує запобігання ускладненням, пов'язаним з порушенням стійкості стінок свердловини, утворенням застійних зон, спричиняючи сепарацію шламу за значного зниження енергозатрат.

Розрахунок параметрів елементів гідродинамічних пристроїв у комплексі з компонованням низу бурильної колони забезпечує можливість керування технологічним процесом, до прикладу, буріння з урахуванням геологічних умов родовищ.

Список використаних джерел:

1. Пат. 251800 UA, МПК E21B10/18 Присрій для буріння свердловин [Текст] /Паневник О.В., Яремійчук Р.С. : № 97031449; заявл. 27.03.1997; опубл. 30.10.1998. 24.
2. Пат. 1754872 A1 SU, МПК E21B10/13 Пристрій для вібраційного буріння свердловин [Текст] / Габрахимов М.С., Хузина Л.Б.: № 9334568; заявл. 20.03.2004; опубл. 20.08.2005.
3. Звіт з оцінки впливу на довкілля Продовження видобування вуглеводнів та спорудження (буріння) свердловин Більського родовища згідно зі спеціальним дозволом на користування надрами № 1803 від 25.03.1999 року. Підключення свердловин до установок

підготовки вуглеводневої сировини АТ «Укргазвидобування». Київ. Нафтогаз. 2025. 532 с. URL <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://oht.sm.gov.ua/images/docs/03.2013/09/29011.pdf>

4. Звіт з оцінки впливу на довкілля Спорудження свердловин № 14 Роднікового родовища, № 1 Східна-Карлівська Веснянського родовища, № 121 Веснянського родовища, № 134 Котелевського родовища, № 134 Машівського родовища та № 200 Західно-Солохівського родовища на газ і конденсат, підземні споруди. Підключення свердловин до установок підготовки вуглеводневої сировини АТ «Укргазвидобування». Київ. Нафтогаз. 2024. 812 с. URL <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://reshsmart.gov.ua/upload/editor/PD7txumAgTp95EZ.pdf>

5. А.Є. Божко, Я.С. Коцкулич, О.В. Кравченко. Монографія. Розробка технологій та технічних засобів для забезпечення надійності постачання вуглеводнів в Україні. Інститут енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України. Харків. Нове слово. 2011. 550с. ISBN: 978-617-568-059-9 URL <https://www.old.nas.gov.ua/UA/Book/Pages/default.aspx?BookID=0000005844>

6. Чернова М.Є. Динаміка гідроакустичних коливань у затопленій струмині затрубного простору бурильної колони /Чернова М.Є.// Науковий вісник . – 2013. - № 1 (34). – С 82-88. URL <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/2471>

7. Судаков А. К., Дзюбик А. Р., Кузін Ю. Л., Назар І. Б., Судакова Д. А. Ізоляція поглинаючих горизонтів бурових свердловин термопластичними матеріалами. Монографія. – Дрогобич.: «Просвіта», 2019. 182 с. URL <http://www.altis-ism.org.ua/index.php/ALTIS/article/view/286/245>

8. Буріння свердловин: навч. посіб. / Є.А. Коровяка, В.Л. Хоменко, Ю.Л. Винников, М.О. Харченко, В.О. Расцветаєв ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». - Дніпро: НТУ «ДП», 2021. - 292 с. URL <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/14394>

9. Бражененко А.М., Гошовський С.В., Кожевников А.А., Мартиненко І.І., Судаков А.К. Тампонаж гірських порід під час буріння геологорозвідувальних свердловин легкоплавкими матеріалами. - К. УкрДГПІ. 2007. 130 с. URL <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://nasplib.isofts.kiev.ua/server/api/core/bitstreams/223b1639-87b2-4c91-9538-32d852e59507/content>

Рецензент: Андрій ГРИЦАНЧУК, директор науково-дослідного інституту нафтогазової енергетики та екології ІФНТУНГ, к.т.н., доцент, доцент кафедри ВНГ