

УДК 622.276.7

**Б. О. Чернов**, д-р техн. наук, акад. УНГА, проф.; **М. М. Западнюк**, **Я. Б. Лучка**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна*

### **МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГІДРОАКУСТИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА З ТОРОЇДАЛЬНОЮ КАМЕРОЮ ЗАВИХРЕННЯ**

*Розглянуто математичну модель гідроакустичного пристрою для інтенсифікації нафтових і газових свердловин. Одержано аналітичні залежності з визначення гідродинамічних параметрів та коефіцієнта корисної дії гідроакустичного пристрою, на основі яких визначаються оптимальні конструктивні параметри.*

**Ключові слова:** *потік, інтенсивність, генератор, турбулентність.*

*Рассмотрена математическая модель гидроакустического устройства для интенсификации нефтяных и газовых скважин. Получено аналитические зависимости по определению гидродинамических параметров и коэффициента полезного действия гидроакустического устройства, на основе которых определяются оптимальные конструктивные параметры.*

**Ключевые слова:** *поток, интенсивность, генератор, турбулентность.*

*Numerical simulation of the hydroacoustic devices to intensify oil and gas wells. Received analytical depending on the definition and hydrodynamic parameters factor useful actions hydroacoustic devices, on the basis of which are determined by optimal design parameters.*

**Keywords:** *flow, intensity, generator, turbulence.*

Більшість нафтових і газових родовищ України перебувають на завершальній стадії розробки. Під час довготривалої експлуатації видобувних свердловин відбувається зниження дебіту внаслідок кольматації присвердловинної зони та зниження фільтраційно-ємнісних характеристик. З метою підвищення нафтогазовилучення застосовуються різні методи дії на привибійну зону пласта: гідродинамічні, фізико-хімічні, газові, теплові, внутрішньопластове горіння, пароциклічна обробка та ін.

На основі аналізу літературних і патентних джерел, промислових досліджень встановлено, що одним із найбільш ефективних методів інтенсифікації є гідродинамічні і фізичні.

Водночас експериментальні і промислові дослідження впливу хвильових процесів на продуктивний пласт, мають суперечливий характер і в одних випадках дослідники відзначають значне збільшення припливу флюїду та підвищення приймальності нагнітальних свердловин, в інших випадках низьку ефективність. Це пояснюється тим, що при застосуванні різного роду хвильових пристроїв та технологій для інтенсифікації видобування вуглеводнів необхідне вивчення гірничо-геологічної характеристики родовищ, реологічних властивостей вуглеводнів, виявлення механізму різноманітних явищ, які супроводжують розповсюдження хвиль в насичених середовищах та ін.

Головним завданням при обробці свердловин є руйнування і видалення адсорбційних відкладів в порових каналах присвердловинної зони пласта. За результатами промислових досліджень встановлено, що найбільшої ефективності при застосуванні енергії спрямованої дії досягається тоді, коли пристрої, що витрачають дану енергію розміщені в безпосередній близькості до продуктивного пласта (зони перфорації).

Для інтенсифікації видобування нафти і газу, підвищення нафтовіддачі пластів розроблено конструкції гідроакустичних пристроїв з рухомими та нерухомими елементами.

Практика показала, що більшого застосування набули гідроакустичні пристрої з нерухомими елементами конструкції, які більш надійні в роботі і роботоздатні на великих глибинах.

В процесі інтенсифікації свердловини Бухтівець-20 Битків-Бабчинського родовища застосовувався гідроакустичний генератор, в якому енергія потоку рідини перетворюється в енергію гідроакустичних коливань [1].

З аналізу результатів промислових досліджень, вивчення геологічних характеристик родовища та покладу, прийшли до висновку про необхідність проведення комплексу теоретичних і експериментальних досліджень з метою розробки наукових основ коливних процесів в затоплених рідинах та раціональних конструкцій гідроакустичних пристроїв.

Для проведення теоретичних досліджень коливних процесів, які виникають під час застосування гідроакустичних пристроїв запропонована математична модель, схема якої наведена на рис. 1.

Потік в'язкої рідини в даній системі є надзвичайно складний і залежить від великої

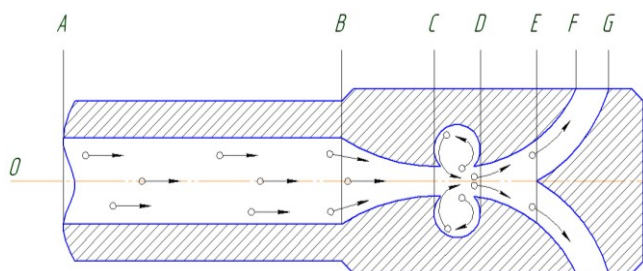


Рис. 1. Розрахункова схема математичної моделі потоку рідини в гідродинамічному пристрої

кількості конструктивних і технологічних факторів, а тому ми розглядаємо динаміку потоку рідин по ділянках згідно розрахункової схеми (рис. 1). На ділянці А–В, що включає насосно-компресорні труби і муфтову частину гідроакустичного пристрою потік рідини є ламінарний, оскільки розхід рідини і швидкість потоку регламентується характеристиками насосного обладнання.

Для визначення кінематики потоку рідини на ділянці А–В, застосовуємо систему рівнянь [2], яка включає в себе параболічне рівняння Нав'є-Стокса:

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\nu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

рівняння неперервності потоку

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

та рівняння енергії.

$$c_p \rho \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial p}{\partial \tau} + w \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3)$$

де  $x, y, z, \tau$  – координати в прямокутній системі і час;  $\nu, \rho, c_p, \lambda$  – теплофізичні властивості потоку – динамічна в'язкість, густина, теплоємність, теплопровідність;  $w(x, y, z, \tau), p(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau), \rho(x, y, z, \tau)$  – шукані невідомі функції системи.

Із розв'язку даної системи рівнянь із застосуванням методів кінцевих елементів визначається фізичний стан рідини у всіх точках досліджуваної області в даний момент часу.

На ділянці В–С (рис. 2), що являє собою конфузорну частину пристрою відбувається збільшення швидкості потоку рідини та падіння тиску.

При проходженні рідини через конфузор в потоці відбувається взаємодії осьового та пристінкового потоків, що призводить до зміщення шарів, внаслідок чого спостерігається випередження ядра центрального потоку, та затримання ядер потоку пристінкового шару.

Це явище веде до збільшення швидкості, нагромадження та концентрації енергії. Авторами [3] на основі результатів експериментальних досліджень турбулентних потоків рідини встановлено, що вирівнювання центрального та пристінкового шарів відбувається на відстані  $3d$  від початку стабілізуючої ділянки, внаслідок розвитку зсувного шару. Тому для

ефективної роботи гідроакустичного генератора необхідно, щоб довжина даної ділянки не перевищувала  $3d$ . При подальшому спільному русі потоків їх швидкості практично вирівнюються. Раптове звуження (конфузор) викликає втрату енергії, яка обумовлена тертям потоку при вході у звуження. При цьому кільцевий простір навколо звуженої частини потоку заповнюється завихреною рідиною. Втрати динамічного напору за наявності сил тертя та зміни поперечного перерізу конфузора, визначаються залежністю:

$$h_{\text{конф}} = \frac{\lambda_T}{8 \sin(\alpha/2)} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

де  $\lambda_T$  – коефіцієнт гідравлічного тертя,  $\alpha$  – кут звуження конфузора,  $n$  – ступінь звуження,  $v$  – швидкість потоку.

Після стабілізуючої ділянки, пристінкові шари рідини потрапляють у вихрову камеру (ділянка С-D), де створюється турбулентне завихрення. Енергія вихрового потоку пропорційна витраті рідини потоку  $Q$  і різниці тисків на вході та виході рідини з камери завихрення  $p_{\text{вх}} - p_{\text{вих}}$  та витрачається на деформаційно-зсувну взаємодію розривів щільності потоку та створення кавітаційного процесу, а також на подолання сил тертя потоку зі стінками камери завихрення та взаємодією з центральним потоком рідини. В цьому випадку розподілення аксіальної складової швидкості закрученого потоку по січченню каналу може бути рівномірним, або як в нашому випадку з випередженням центрального потоку по осі

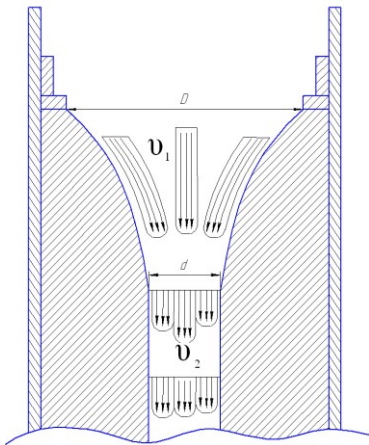


Рис. 2. Розріз вхідного отвору гідроакустичного генератора

пристрою. Випередження середнього потоку характеризує інтенсивність завихрення і чим більша інтенсивність, тим більше випередження.

В камерах завихрення тиск потоку рідини стає рівним тиску пароутворення (тиску насичених парів)  $p_n$ . В рідині утворюються порожнини (так звані кавітаційні бульбашки, або каверни), заповнені повітрям, парою або їх сумішшю. Це явище зумовлене зниженням тиску в рідині та збільшенням її швидкості руху. Таким чином утворюється гідродинамічна кавітація [4]. Бульбашки, які виникають в процесі кавітації, переміщуються з потоком рідини в область з більш високим тиском, та лускають, з утворенням ударної хвилі, шуму та виділенням великої кількості енергії.

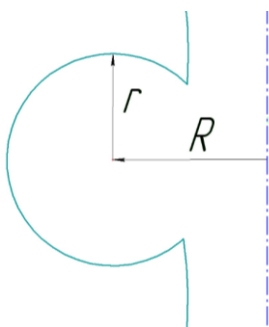


Рис. 3. Розріз камери завихрення гідроакустичного генератора

Тому для досліджень кавітаційних потоків в якості критерію подібності прийнято число Ейлера, яке записується у вигляді:

$$\chi = 2 \frac{p - p_n}{\rho v^2}$$

де  $p$  – гідростатичний тиск потоку рідини, Па;  $p_n$  – тиск насичених парів, Па;  $\rho$  – густина рідини;  $v$  – швидкість потоку на вході в камери завихрення, м/с.

Параметр  $\chi$  ще називають числом кавітації. Кавітаційний потік має місце при значеннях  $\chi \approx 1$ . Він є одним із критеріїв подібності при моделюванні гідродинамічних потоків.

Колову швидкість турбулентного потоку на виході з вихрової камери визначається із залежності, яка одержана авторами [5] на основі результатів експериментальних досліджень:

$$v_\phi = r \sqrt{\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} + \frac{1}{r} \left[ \frac{l}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_\phi) \right]^2}$$

де  $r$  – радіус завихрення,  $\rho$  – густина рідини.

Відповідно величина динамічного напору створюваного даним потоком рідини запишеться:

$$p_{\text{дин}} = \int_r^R \frac{\rho v_{\varphi}^2}{r_l} dr$$

де  $R$  – відстань від осі генератора до центра камери завихрення (рис. 3).

Потік рідини, який виходить із тороїдальної камери завихрення з певною частотою, взаємодіє з центральним потоком, внаслідок чого генеруються періодичні гідроакустичні коливання. Амплітудно-частотна характеристика генератора гідроакустичних імпульсів залежить від геометричних розмірів тороїдальної камери завихрення та кільцевого отвору перед нею, а також від режимних і реологічних параметрів потоку рідини.

На ділянці D–E (дифузور), відбувається зменшення швидкості робочої рідини та збільшення тиску, а отже перетворення кінетичної енергії рідини в енергію тиску. Далі робоча рідини потрапляє на розділювач потоку (ділянка E–G), який розділяє потік, і спрямовує його у вихідні сопла, за рахунок чого підвищується енергія пульсуючого потоку, та створюються потужні гідроакустичні ударні імпульси тиску, які діють на стінки свердловини.

Коефіцієнт корисної дії гідроакустичного генератора визначається відношенням дійсної кінетичної енергії потоку на виході  $E$  до енергії на вході  $E_0$ :

$$\eta = \frac{E}{E_0} = \frac{\left( \sqrt{\frac{2p_{\text{вх}} - \Delta p}{\rho}} \right)^2}{\left( \sqrt{\frac{2p_{\text{вх}}}{\rho}} \right)^2} = \frac{p_{\text{вх}} - \Delta p}{p_{\text{вх}}}$$

де  $p_{\text{вх}}$  – тиск на вході в гідроакустичний генератор,  $\Delta p$  – сума всіх втрат тиску в гідроакустичному генераторі.

При взаємодії потоку рідини із продуктивним горизонтом, стінка отримує подвійний імпульс і енергія коливань поширюється у породі на значну відстань та відбувається процес декольмататії продуктивного горизонту.

Експериментальні дослідження розробленої конструкції гідроакустичного генератора показали високу стабільність та ефективність. Техніко-економічна ефективність гідроакустичного генератора полягає у підвищенні продуктивності свердловини та нафтогазовіддачі пласта, за рахунок енергії спрямованої дії потоку рідини.

### Література

1. Пат. України № 63187 E21B 28/00. Генератор гідроакустичних імпульсів / Б. О. Чернов, М. С. Чернова, М. М. Западнюк, І. М. Ільків, О. А. Мозолев; заявник Чернов Борис Олександрович. – № u201105983. – Заявл. 13.05.2011; Опубл. 26.09.2011. – Бюл. №18
2. Зайцев А. В., Пеленко Ф. В. Моделирование течения вязкой жидкости в трубе // Научный журнал СПбГУНиПТ. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств (электронный журнал) / СПбГУНиПТ. №1. – Март. 2012. Режим доступа к журн.: <http://processes.open-mechanics.com/свободный>.
3. Турбулентное смешение в малогабаритных трубчатых аппаратах химической технологии / Р. Г. Тахавутдинов, Г. С. Дьяконов, Р. Я. Дебердеев, К. С. Минскер // Химическая промышленность. – 2000. – № 5. – С. 41–49.
4. Дегтярь Б. Г. Кавитация и РОГО – неустойчивость. – Челябинск: узд. ЮУрГУ, 1997. – 100 с.
5. Хавкин Ю. И. Центробежные форсунки. Л., «Машиностроение», 1976. – 168 с.

Надійшла 15.07.13