

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ УДОСКОНАЛЕНОЇ СТРУМИННОЇ СВЕРДЛОВИННОЇ УСТАНОВКИ

Я. Я. Якимечко*, Л. Б. Мороз, С. О. Овецький, Я. В. Фем'як

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
e-mail: yaroslav.yakymechko@nuing.edu.ua

Розглядається використання конструкції струминного насоса з розділеними робочими потоками для видобування високов'язкої нафти. Автори удосконалили конструкцію струминної свердловинної установки з розділеними робочими потоками, у якій робоча рідина, рухаючись по міжтрубному простором і досягнувши корпусу насоса, розділяється на два потоки. Частина робочої суміші – 40% (залежності від перерізу сопла камери закручування) потрапляє до камери закручування гідродинамічного кавітатора, при проходженні робочої рідини з неї виділяються бульбашки газу. Ці бульбашки лускають під дією зовнішнього тиску на виході з камери при проходженні рідини через ступінчатий дифузор. Друга частина робочої суміші – 60% (в залежності від перерізу сопла струминного апарату) потрапляє на сопло насоса, звідки, витікаючи з великою швидкістю, утворює зону зниженого тиску, внаслідок чого суміш і нафта із підпакерного простору надходять в камеру змішування дифузора пристрою. Враховуючи те, що із застосуванням струминних апаратів можна досягти при певних умовах ефекту фонтанування, нами розглянуто умови, які можуть забезпечити цей ефект. При цьому можуть мати місце два випадки: 1) відбір рідини з свердловин обмежений; 2) відбір рідини з свердловин необмежений. Наводяться вихідні дані, технологічні параметри та послідовність їх визначення для варіанту, коли в якості робочої рідини використовується легка нафта, а робочий тиск наземної силової установки не задається. Визначення технологічних параметрів роботи свердловинної установки є рішенням прямої задачі, а далі – зворотної. Запропоновано удосконалену методику розрахунку технологічних параметрів струминної свердловинної установки з розділеними робочими потоками, конструкція якої немає аналогів в Україні. Дана методика була апробована під час промислових випробувань дослідного зразка комплексу обладнання для видобування високов'язких нафт. Спосіб роботи насосно-ежекторної свердловинної струминної установки з гідродинамічним пульсатором для видобування високов'язких нафт захищений патентом України.

Ключові слова: високов'язка нафта; глибинні насоси; струминні апарати; обмежений відбір нафти; послідовність розрахунку; проектування процесу.

Рассматривается использование конструкции струйного насоса с разделенными рабочими потоками для добычи высоковязкой нефти. Авторы усовершенствовали конструкцию струйной скважинной установки с разделенными рабочими потоками, в которой рабочая жидкость, при движении по межтрубному пространству, достигнув корпуса насоса, разделяется на два потока. Часть рабочей смеси - 40% (в зависимости от сечения сопла камеры закручивания) попадает в камеру закручивания гидродинамического кавитатора, проходя которую из рабочей жидкости выделяются пузырьки газа. Эти пузырьки лопаются под действием внешнего давления на выходе из камеры при прохождении жидкости через ступенчатый диффузор. Вторая часть рабочей смеси – 60% (в зависимости от сечения сопла струйного аппарата) попадает на сопло насоса, откуда, вытекая с большой скоростью, образует зону пониженного давления, в результате чего смесь и нефть с подпакерного пространства поступает в камеру смешивания диффузора устройства. Учитывая то, что с применением струйных аппаратов можно достичь при определенных условиях эффекта фонтанирования, нами рассмотрены условия, которые могут обеспечить этот эффект. При этом могут иметь место два случая: 1) отбор жидкости из скважин ограничен; 2) отбор жидкости из скважин неограничен. Приводятся исходные данные, технологические параметры и последовательность их определения для варианта, когда в качестве рабочей жидкости используется легкая нефть, а рабочее давление наземной силовой установки не задается. Определение технологических параметров работы скважинной установки представляет собой решение прямой задачи, а в дальнейшем – обратной. Предложена усовершенствованная методика расчета технологических параметров струйной скважинной установки с разделенными рабочими потоками, конструкции которой нет аналогов в Украине. Данная методика была апробирована при проведении промышленных испытаний опытного образца комплекта оборудования для добычи высоковязкой нефти. Способ работы насосно-эжекторной скважинной струйной установки с гидродинамическим пульсатором для добычи высоковязкой нефти защищен патентом Украины.

Ключевые слова: высоковязкая нефть; глубинные насосы; струйные аппараты; ограниченный отбор нефти; последовательность расчета; проектирование процесса.

The article considers the use of a jet pump design with separate workflows for the production of high-viscosity oil. The authors have developed an improved design of a jet well unit with separate workflows, in which the working fluid, moving through the inner annulus, reaching the pump housing, is divided into two streams. A portion of the working mixture - 40% (depending on the cross section of the nozzle of the twisting chamber) enters the twisting chamber of the hydrodynamic cavitator, via which the working fluid passes, creating gas bubbles. These bubbles flake under the action of external pressure at the outlet of the chamber when the liquid passes through a stepped diffuser. The second portion of the working mixture - 60% (depending on the cross section of the jet nozzle) enters the pump nozzle, where flowing at high speed, forms a zone of reduced pressure, resulting in the mixture and oil from the subpacker enter the mixing chamber of the device. We have considered the conditions that can provide the effect of gushing, taking into account the fact that with the use of jet devices can achieve this effect. There may be two cases: 1) the extraction of fluid from wells is limited; 2) the extraction of fluid from wells is unlimited. The initial data, technological parameters and the sequence of their determination are given for the variant when light oil is used as a working liquid, and the working pressure of the surface power plant is not set. Determining the technological parameters of the well unit is a solution to the direct problem, and then - the reverse one. The improved method for calculating the technological parameters of a jet well unit with separate workflows, the design of which has no analogues in Ukraine, is proposed. This technique has been tested during industrial tests of a prototype of an equipment set for the extraction of high-viscosity oils. The method of operation of the pumping-ejector downhole jet unit with a hydrodynamic pulsator for the extraction of high-viscosity oils is protected by a patent of Ukraine.

Keywords: high viscosity oil; submersible pumps; jet devices; limited oil extraction; sequence of calculation; process design.

Вступ

В Україні видобування високов'язкої нафти здійснюється свердловинним методом за допомогою глибинно-насосних установок, а в якості глибинних насосів використовують штангові, електрозанурювані, гідропоршневі і гвинтові. Враховуючи те, що в міру піднімання нафти з вибою свердловин її в'язкість суттєво зростає, застосування штангових насосів стає не лише нерентабельним, але й технічно важко реалізованим. При ході штанг вниз вони в високов'язкому середовищі зависають, а при підніманні угору витримують великі розтягуючі напруження, що призводить часто до їх розриву.

В електрозанурюваних насосах (ЕЗН) через підвищення в'язкості нафти, різко зростає необхідний напір насоса та напруга на електропроводах ЕЗН, що призводить до виведення їх з робочого стану.

З відомих типів насосів для піднімання високов'язких нафт залишаються гвинтові та гідропоршневі. В цих типах насосів проблеми напору не мають вирішального значення, позаяк робочою рідиною виступає легка нафта, розчинник або спеціальні види емульсій, які при змішуванні з високов'язкими нафтами не підвищують в'язкості змішаного потоку. В обох видах насосів відношення витрат робочої рідини до витрат високов'язкої нафти, яка поступає до всмоктуючої камери насосів, складає 5-10 до 1. Таким чином, ріст в'язкості змішаного потоку у ліфтовій частині труб не перевищує 15-20%, а відповідно і необхідний напір насосів по відношенню до їх напору при роботі з чистою робочою рідиною не перевищує 20-25%. Єдиною проблемою для обох видів насосів є про-

блема всмоктування високов'язких нафт. Якщо в'язкість цих нафт не перевищує 10-30 мПа·с, то приймати спеціальні заходи щодо її зменшення не має потреби. У випадку в'язкості більшої 30 мПа·с в умовах вибою виникає потреба у розробленні спеціальних технічних рішень, які б дозволяли зменшувати в'язкість.

Технічні характеристики гідропоршневих насосів мають суттєві обмеження за максимально можливими витратами. Так, при глибині свердловини 3000 м українські насоси виробництва Сумського науково-виробничого об'єднання можуть піднімати на поверхню нафту з витратою 15 м³/добу. Тобто вони можуть бути використані лише в малодобітних свердловинах.

В США струминні насоси були розроблені в 70-х роках минулого століття і почата експериментальна експлуатація нафтових свердловин фірмами Kobe, National і Guiberson. Застосування їх на деяких свердловинах виявилось досить ефективним.

Нами запропоновано удосконалена конструкцію струминної свердловинної установки з розділеними робочими потоками, у якій робоча рідина, що рухається міжтрубним простором, досягнувши корпуса насоса, розділяється на два потоки. Частина робочої суміші – 40% (в залежності від перерізу сопла камери закручування) потрапляє в камеру закручування гідродинамічного кавітатора, де з робочої рідини виділяються бульбашки газу, а на виході з камери при проходженні рідини через ступінчастий дифузор ці бульбашки під дією зовнішнього тиску лускають. Друга частина робочої суміші – 60% (залежить від перерізу сопла струминного апарату) потрапляє на сопло насо-

са, звідки, витікаючи з великою швидкістю, утворює зону зниженого тиску. Внаслідок цього суміш і нафта із підпакерного пристрою надходить в камеру змішування дифузора пристрою. В колоні НКТ за рахунок аерації нафти і використання енергії виділеного з нафти газу суттєво знижується тиск на пласт, що дозволяє збільшити приплив і відбір пластової рідини. Далі по насосно-компресорними трубами нафта піднімається на поверхню. Аналогів запропонованої конструкції струминного апарату в Україні немає.

Метою роботи є удосконалення методики розрахунку технологічних параметрів струминної свердловинної установки з розділеними робочими потоками.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій. Струминні насоси в даний час широко застосовують у багатьох країнах світу, в тому числі і в Україні. Вперше в Україні запропонував використання струминних апаратів у технології освоєння свердловин та інтенсифікації припливу вуглеводнів професор Яремійчук Р.С. за участю Кіфора Б.І., Хомінця З.Д., Лотовського В.М., Шандровського Т.Р. та ін.

Струминні насоси, які можна застосовувати при підніманні звичайної легкої і високов'язкої важкої нафти, мають дуже гнучку характеристики. В цих насосах відсутні рухомі деталі, тому вони відрізняються досить великою надійністю, мають значний моторесурс (6000 годин), у вставному варіанті можуть бути замінені без підйому насосно-компресорних труб.

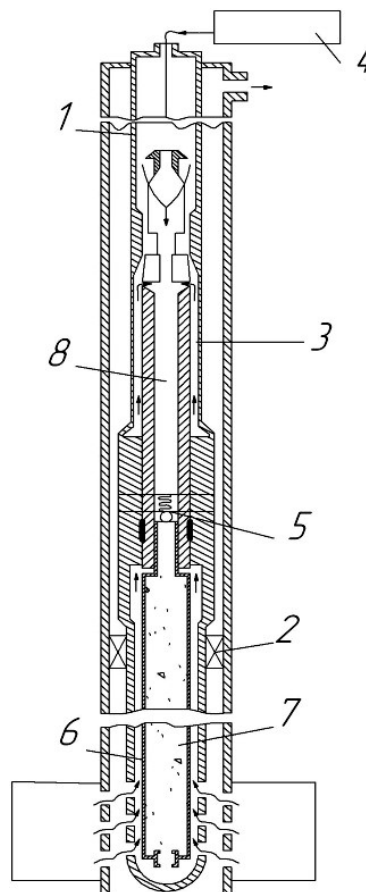
Застосування глибинних струминних насосів для експлуатації нафтових свердловин зумовлено такими їх особливостями:

- необхідний тиск робочої рідини біля входу у сопло струминного насоса створюється не тільки наземним силовим насосом, але і напором стовпа робочої рідини в колоні НКТ;
- тиск на виході струминного насоса, який необхідний для підймання рідини на поверхню, суттєво зменшується завдяки газліфтному ефекту, який виникає при виділенні вільного газу з нафти в колоні НКТ;
- менша чутливість до наявності вільного газу і піску в рідині у порівнянні з поршневыми насосами;
- простота конструкції і порівняно малі габарити насосів, надійність і корозійна стійкість при прийнятній ціні [5].

Поєднання струминного насоса із дією на високов'язку нафту імпульсно-кавітаційними технологіями може істотно вплинути на інтенсифікацію видобування важких вуглеводнів із свердловин. В якості генераторів імпульсно-кавітаційного впливу нами запропоновано використовувати ультразвукові гідродинамічні кавітатори. Такі пристрої мають мінімальні габарити і масу, просту конструкцію, без рухомих деталей, легко монтується у струминний апарат.

На сьогоднішній день відома низка свердловинних насосних установок і пристроїв для відкачування рідини із свердловини із використанням струминних насосів та застосуванням аерування робочої рідини [1-8]. Деякі з них мають на меті піднімання на поверхню рідин, які не володіють високою в'язкістю.

Заслугує на увагу пристрій для видобування високов'язкої і парафіністої нафти. Пристрій вміщує струминний насос 3, підвішений з пакером 2 на колоні труб 1 (рис. 1).



1 – колона труб; 2 – пакер; 3 – струминний насос; 4 – поверхневий насос; 5 – регулюючий клапан; 6 – реакційна камера; 7 – хімічний реагент; 8 – проточний канал

Рисунок 1 – Пристрій для видобування високов'язкої і парафіністої нафти

Струминний насос вміщує заповнену хімічним реагентом 7, реакційну камеру 6. Причому порожнина реакційної камери 6 з'єднана з проточним каналом 8 струминного насоса через регулюючий клапан 5. Струминний насос 3 спускають у колону труб 1, реагент 7 при зіткненні з водою, яка подається під тиском з поверхні, виділяє велику кількість тепла. Воно нагріває стінки реакційної камери 6. Ефективність досягається за рахунок зниження в'язкості нафти шляхом нагрівання її на вибої нафти. В якості джерела тепла використовується реакція хімічного реагента з водою.

Недоліком цього винаходу є те, що реагент, який використовується для ініціювання хімічної реакції з виділенням тепла, є недешевим і через деякий час його необхідно буде поновлювати. А для цього необхідно буде зупинити видобування і зворотним промиванням або за допомогою канатної техніки підняти реакційну камеру на поверхню. Все це незадовільно відобразиться на ефективності видобування високов'язкої нафти, погіршить економічні показники роботи свердловини.

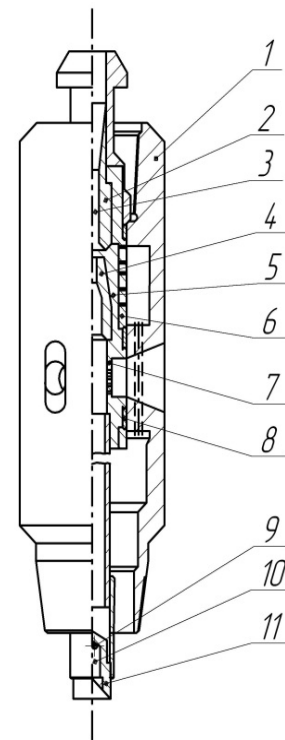
Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми. Для зменшення впливу цих недоліків нами пропонується удосконалити технологію видобування високов'язких нафт шляхом застосування струминних насосів з розділеними робочими потоками і використанням енергії пульсуючих потоків.

При проектуванні комплексу обладнання для видобування високов'язких нафт була взята за основу уже відома і випробувана конструкція струминного апарата типу ПЕОС. Нами запропоновано струминний апарат, схему якого зображено на рис. 2.

Корпус пристрою має осьовий канал з мінімальним діаметром 48 мм, який для заданого технологічного процесу перекривається відповідною вставкою (клапаном для опресування пакера, насосом ежекторним з клапаном гідродинамічних досліджень або гідродинамічним кавітатором). В корпусі пристрою є також радіальні канали для подачі робочої рідини і бокові канали вздовж осі для всмоктування пластової рідини з підпакерної зони. У верхній і нижній частинах корпусу пристрою має різьбу НКТ 73 ГОСТ 633-80 для з'єднання з насосно-компресорними трубами.

В струминних апаратах типу ПЕОС робоча рідина подається трубами НКТ, а за технологією видобування високов'язких нафт затрубному просторі, тому насос ежекторний нами конструктивно змінений. Він складається з корпусу, в якому вгвинчені сопло і змішувач. В

корпусі насоса передбачені радіальні отвори діаметром не більше 2,5 мм для фільтрації як робочої суміші, так і для фільтрації пластової рідини. Цим забезпечується більш надійніша і довговічніша робота струминного апарата. Сопло і змішувач виконані двох типорозмірів, що дає можливість підбирати різні режими роботи. У верхній частині ежекторного насоса знаходиться хвостовик з проточкою, за яку при допомозі цангового вловлювача на канатній техніці можна підняти на поверхню. В нижній частині ежекторного насоса є різьбова частина, до якої можна приєднувати клапан гідродинамічних досліджень або гідродинамічний кавітатор.



1 – корпус пристрою; 2 – дифузор; 3 – камера змішування; 4 – сопло; 5 – сідло; 6 – струминний насос; 7 – фільтраційні отвори; 8 – ущільнюючі кільця; 9 – тангенціальні входні отвори; 10 – камера змішування; 11 – гідродинамічний кавітатор

Рисунок 2 – Струминний апарат для видобування високов'язких нафт

Клапан для гідродинамічних досліджень складається з корпусу, в якому знаходиться сідло, з'єднане з обмежуючою втулкою, кулька діаметром 25 мм, притиснена пружиною до сідла і обмежуючий гвинт. Сідло в нижній частині з'єднане з наконечником, який підтримує ущільнюючі манжети. В наконечнику передбачена різьба для приєднання глибинного манометра або термометра.

Експлуатація свердловин з високим газовим фактором і відносно низькими вибійними тисками (при підніманні високов'язких нафт для забезпечення притоку нафти з пласта необхідно створити великі депресії на пласт, а, значить, створювати низькі вибійні тиски) представляє значні інженерні труднощі. Фонтанний спосіб не реалізується через нестачу природної енергії пласта, механізовані - економічно малоефективні, газліфтний - через високі питомі витрати газу, насосні - через низький коефіцієнт корисної дії та інші фактори.

Формулювання цілей статті. Враховуючи те, що із застосуванням струминних апаратів можна досягти ефекту фонтанування, нижче розглянуто умови, які можуть забезпечити цей ефект. При цьому можуть мати місце два випадки:

- відбір рідини з свердловин обмежений;
- відбір рідини з свердловин необмежений.

Для випадку, коли необхідно проектувати процес вилучення нафти з обмеженим відбором, розрахунок наведено нижче. Для необмеженого відбору необхідне вирішення додаткових задач.

Вихідні дані, технологічні параметри: послідовність їх визначення для варіанту, коли як робоча рідина використовується легка нафта, а робочий тиск надземної силової установки не задається.

Визначення технологічних параметрів роботи свердловинної установки є розв'язання прямої задачі, а далі - оберненої.

Висвітлення основного матеріалу дослідження. Для визначення технологічних параметрів ми опиралися на роботи таких вчених: Баскієва К.С., Гіматутдінова Ш.К., Бойка В.С., Савенкова І.Г., Міщенко І.Т., Соколова Е.О., Зінгера М.М., Шурова В.І., Аметова І.М., Яремійчука Р.С., Качмара Ю.Д., Світлицького В.М. та ін. [9-23].

Прийmemo такі позначення:

H - глибина свердловини до середніх отворів фільтра, м;

D_e - внутрішній діаметр експлуатаційної колони, м;

d_e - внутрішній діаметр НКТ, м;

d_z - зовнішній діаметр НКТ, м;

b - товщина продуктивного пласта, м;

P_{nl} - пластовий тиск, Па;

k_o - коефіцієнт продуктивності свердловини або постійний коефіцієнт у рівнянні притоку, м³/Па·с;

$h = 1$ - показник ступеня в рівнянні притоку;

Q_n - дебіт свердловини, м³/с·Па;

$P_{нас}$ - тиск насичення нафти газом, Па;

P_e - тиск на вибої свердловини, Па;

P_2 - тиск на викиді свердловини (буферний), Па;

P_0 - атмосферний тиск, Па;

G_o - газовий фактор, приведений до нормальних умов, м³/м³;

α - коефіцієнт розчинності газу в нафті, м³/м³·Па;

ρ_n - густина нафти, кг/м³;

ρ_{zo} - густина газу, приведена до нормальних умов, кг/м³;

ρ_p - густина робочої рідини, кг/м³;

ρ_z - густина змішаної рідини, кг/м³;

μ - коефіцієнт витрати насадки струминного апарату;

μ_n - в'язкість нафти, Па·с;

μ_p - в'язкість робочої рідини, Па·с;

i - коефіцієнт інжекції струминного апарату;

φ - кут нахилу свердловини.

Відбір рідини з свердловини, виходячи з конкретних умов, є обмеженим. Таким чином, відомо Q_n і аналітичний вираз індикаторної лінії:

$$Q_n = f(P_e) . \quad (1)$$

Знаючи Q_n , витрату надземної силової установки або витрату робочої рідини визначимо зі співвідношення:

$$Q_p = \frac{Q_n}{i} B , \quad (2)$$

де

$$B = \frac{\rho_n + G_o \rho_{zo}}{\rho_p} . \quad (3)$$

Коефіцієнтом інжекції i задаються, виходячи з умов забезпечення найбільш ефективної роботи установки. Сумарна подача струминного апарату буде дорівнювати

$$Q_c = Q_n + Q_p . \quad (4)$$

Знаючи дебіт свердловини Q_n , вибійний тиск визначається із рівняння припливу

$$P_e = P_{nl} - \left(\frac{Q_n}{k_0} \right)^{\frac{1}{H}} . \quad (5)$$

За вибійним тиском P_e , тиском насичення нафти газом $P_{нас}$ і умов експлуатації свердловини, тиск на прийомі струминного апарату P_n

визначається, виходячи з таких міркувань: якщо $p_e > p_{нас}$, то

$$p_n = p_{нас} \quad (6)$$

У випадку, коли $p_e < p_{нас}$, то тиск на прийомі насоса приймають рівним вибійному:

$$p_n = p_e \quad (7)$$

Знаючи глибину свердловини, вибійний тиск і тиск біля струминного апарату, визначається глибина його спуску в свердловину за залежністю:

$$L = H - \frac{p_e - p_n}{\rho_n g} \quad (8)$$

В нашій схемі можуть мати місце варіанти конструкцій струминного апарату: робоча рідина подається до струминного апарату через кільцевий міжтрубний простір.

Для розрахунку подачі і необхідної витрати газу необхідно знайти відповідні приведені еквівалентні діаметри. Значення цих діаметрів визначаються за експериментальними залежностями відповідно для визначення витрат рідини і витрат газу:

$$d_Q = \frac{d_e}{2} + 0,013; \quad (9)$$

$$d_z = \frac{d_e}{2} \quad (10)$$

Газ, який повертається з поверхні, у вигляді газорідинної суміші переходить у розчин, а пізніше виділяється з розчину у вихідному потоці. Осереднений тиск насичення цього потоку газом визначається зі співвідношення:

$$p'_{нас} = \frac{G_0 i}{\alpha' (i + B)} \quad (11)$$

Коефіцієнт α' аналогічний коефіцієнту розчинності газу в рідині і приблизно враховує особливості розчинення та виділення газу у висхідному потоці підйомника. Його значення визначається з виразу:

$$\alpha' \approx \frac{2\alpha i}{2i + B} \quad (12)$$

Ефективний газовий фактор (питома витрата газу), який забезпечує процес фонтанування потоку рідини в підйомнику у верхній його частині, починаючи з деякої площини розгазування, буде дорівнювати:

$$G_{эф} = \frac{1}{2} \left[\frac{iG_0}{i+B} - \alpha' (p_2 - p_0) \right] \quad (13)$$

Для забезпечення раціонального використання фонтанного ефекту у струминному апараті режим фонтанування на пошуковій частині його довжини повинен бути оптимальним. Для оптимального режиму довжина верхньої части-

ни підйомника, з якої забезпечується фонтанування висхідного потоку, визначається зі співвідношення:

$$L' = \frac{\frac{iG_0}{\alpha' (i+B)} - p_2}{2\rho_n g} + \left\{ \left[\frac{\frac{iG_0}{\alpha' (i+B)} + p_2}{2\rho_n g} \right]^2 + \frac{1}{2} \left[\frac{iG_0}{(i+B)} - \alpha' (P_2 - 2p_0) \right] d_z^{0,5} \left[\frac{iG_0}{\alpha' (i+B)} - p_2 \right] \times \frac{1}{2,77 \cdot 10^{-4} \rho_c^2} \times d_3 \frac{iG_0}{\alpha' (i+B) p_2} \right\}^{1/2} \quad (14)$$

Таким чином, в установці струминного підйомника, який спущений у свердловину на глибину L , в інтервалі $L - L_1$ відбувається піднімання негазованої рідини за допомогою струминного апарату, а починаючи з глибини L' здійснюється її фонтанування за рахунок енергії напору, що відповідає тиску насичення $p_{нас}$, і енергії розширення газу, який виділяється з потоку цієї рідини.

Отже, за допомогою залежності (13) ми можемо проектувати режим роботи надземних газорідинних установок (насосів-бустерів або надземних ежекторів), а за допомогою залежності (14) визначити інтервал свердловини, де буде здійснюватися фонтанний підйом рідини.

Найбільш важливим параметром, від якого, в основному, залежать всі робочі параметри силової установки, є тиск на викиді струминного апарату p_c . Його значення за умови, що $p_{нас}$ і α' відомі, визначається за таким рівнянням:

$$p_c = \frac{iG_0}{\alpha' (i+B)} + (\alpha - \alpha') \rho_c g + \frac{8\lambda_k (\alpha - \alpha') Q_n^2 (i+B)^2 \rho_c}{\pi^2 (D_b^2 - d_3)^2} \cdot \frac{\lambda}{\cos \varphi} \quad (15)$$

де ρ_c - густина суміші свердловинної і робочої рідини, що виходять зі струминного апарату.

Коли $\alpha < \alpha'$ тиск на викиді струминного апарату можна визначити із співвідношення:

$$p_c = \frac{iG_0}{\alpha' (i+B)} + (\alpha - \alpha') \rho_c g \quad (16)$$

Значення коефіцієнтів гідравлічного опору λ визначаються з відомих залежностей у відповідності до умов, що розглядаються:

Для кільцевого простору:

а) якщо $Re < 1200$, то

$$\lambda_k = \frac{16\pi(D_6 + d_3)\mu_c}{Q_c \rho_c}; \quad (17)$$

б) якщо $Re \geq 1200$, то

$$\lambda_k = \frac{0,2365}{\left(\frac{4Q_c \rho_c}{\pi(D_6 + d_3)\mu_c}\right)^{0,21}}. \quad (18)$$

Для визначення p_c скористаємось такими залежностями:

а) якщо $P_6 < P_{нас}$ і $P_c \geq P'_{нас}$, то

$$p_c = \frac{p_n p_p (1+i)}{p_n + p_p}; \quad (19)$$

б) якщо $P_6 < P_{нас}$ і $P_c < P_{нас}$, то

$$P_c = \frac{p_p (p_n + G_0 p_{z0})(1+i)}{p_n + G_0 p_{z0} + i p_p \left[(G_0 - \alpha' p_c) \frac{p_0}{p_c} \right]}; \quad (20)$$

в) якщо $P_6 \geq P_{нас}$ і $P_c > P'_{нас}$, то

$$p_c = \frac{p_n p_p (1+i)}{p_n + i p_p}. \quad (21)$$

Для визначення відносного перепаду тиску на струминному апараті (за Соколовим і Зінгером):

$$A = \frac{\Delta P_c}{\Delta P_p} = \frac{\varphi_1^2}{m} \left[2\varphi_2 \sqrt{1 + \frac{\Delta p_k}{\Delta p_p} + \frac{2\varphi_2 \rho_p i^2}{\rho_n (m-1)}} - \frac{(2 - \varphi_3^2) \rho_p (1+i)^2}{m p_c} \right] - \frac{\Delta p_k}{\Delta p_p}, \quad (22)$$

де
$$\frac{\Delta P_k}{\Delta P_p} = \left(\frac{\varphi_1}{\varphi_4} \right)^2 \frac{p_p \cdot i}{p_n (m-1)}.$$

Так, $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ - коефіцієнт швидкості відповідно робочого сопла, камери змішування, дифузора, вхідної ділянки камери змішування

$$\varphi_1 = 0,95; \quad \varphi_2 = 0,975; \quad \varphi_3 = 0,924$$

Якщо $P_6 < P_{нас}$, то

$$p_n = p'_n = \frac{p_n + G_0 p_{z0}}{1 + \frac{(G_0 - \alpha p_n) p_0}{p_n}}.$$

Перепад тиску на насадці струминного апарату

$$\Delta p_p = \frac{p_c - p_n}{p}. \quad (23)$$

Тиск на вході в насадку струминного апарату

$$P_p = \Delta p_p + p_n. \quad (24)$$

Тиск на викиді наземних агрегатів на гирлі свердловини

$$P_a = p_p - p_{zp} + p_{тер}, \quad (25)$$

де p_{zp} - тиск, що створюється стовпом рідини при вході в насадку;

$p_{тер}$ - витрати тиску на тертя в НКТ

$$p_{тер} = \frac{8\lambda L Q_p^2 p_p}{\pi^2 d_6^5}. \quad (26)$$

Діаметр насадки струминного апарату визначається із залежності

$$d_c = \left[\frac{2Q_p}{\mu \pi} \left(\frac{2p_p}{\Delta p_p} \right)^{0,5} \right]^{0,5}. \quad (27)$$

Діаметр камери змішування визначається із залежності:

$$d_{кз} = d_c m^{0,5}, \quad (28)$$

де $m = \frac{f_c}{f_{кз}}$

f_c - площа насадки;

$f_{кз}$ - площа камери змішування.

Вище наведеними залежностями визначаються основні параметри роботи струминної установки.

Технологічна схема об'язки обладнання для видобування нафти за допомогою струминного насоса з розділеними робочими потоками передбачає таку область застосування:

- 1) глибина свердловини від 700 м до 2000 м;
- 2) в'язкість нафти на вибої свердловин від 20 мПа·с до 100 мПа·с;
- 3) продуктивність свердловини - від 5 до 100 м³/добу;

Обладнання повинно включати в себе:

- 1) фонтанну арматуру;
- 2) комплект насосно-компресорних труб;
- 3) гідродинамічний пульсатор (кавітатор) для імпульсно-хвильової дії на високов'язкі нафти, в якому зrealізований ефект зменшення в'язкості нафти в камері всмоктування за рахунок розчинення високов'язкої нафти потоком робочої рідини, дії кавітації та пропуском через високов'язку нафту природного газу;
- 4) гідромеханічний або механічний пакери;
- 5) наземний гідропривод, обладнаний ежекторним пристроєм для аерації робочої рідини, який здатний подавати у свердловину газорідинну суміш у співвідношенні за об'ємом рідни-ни-газу при тиску нагнітання в межах 40:60;

6) лінію нагнітання робочої рідини, обладнану зворотним клапаном і фільтром з діаметром отворів не більше 3,5 мм;

7) для повторного використання природного газу повинна бути передбачена дегазаційна установка (сепаратор);

8) мірну ємкість з витратоміром;

9) ємкість технологічної рідини і ємкість доливання технологічної рідини.

Висновки

Наукова новизна – запропоновано удосконалити методику розрахунку технологічних параметрів струминної свердловинної установки з розділеними робочими потоками, конструкція якої немає аналогів в Україні.

Дана методика була апробована під час промислових випробувань дослідного зразка комплексу обладнання для видобування високов'язких нафт на свердловині № 95 Бугруватівського родовища НГВУ «Охтирканафтогаз», якими доведено його ефективність і роботоздатність.

Спосіб роботи насосно-ежекторної свердловинної струминної установки з гідродинамічним пульсатором для видобування високов'язких нафт захищений патентом України 57331 [24].

Застосування комплексу обладнання для видобутку високов'язких нафт має низку переваг:

- тиск на виході струминного насоса, необхідний для підйому рідини на поверхню, суттєво зменшується завдяки газліфтному ефекту, який виникає при виділенні вільного газу з нафти в колоні НКТ;

- конструкція струминного насоса менш чутлива до наявності вільного газу і піску в рідині у порівнянні з поршневыми насосами;

- простота конструкції і порівняно малі габарити насосів, надійність і корозійна стійкість установки.

Література

1. Яремийчук Р.С., Кифор Б.М., Лотовский В.Н., Шанович Л.М. Применение струйных аппаратов при освоении скважин. Техника и технология бурения скважин: обзор. информ. М.: ВНИОЭНГ, 1988. 56 с.

2. Яремийчук Р.С., Джавадян А.А. Применение струйных аппаратов при интенсификации притока нефти. *Нефтяное хозяйство*. 1988. № 5. С. 37-40.

3. Яремийчук Р.С., Возный В.Р., Кифор Б.М., Лотовский В.Н. Технология повышения

продуктивности скважин с помощью струйных аппаратов. *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море: обзор. информ.* М.: ВНИОЭНГ, 1992. 52 с.

4. А. с. 1332086 СССР, МКИ F 04 F 5/54. Скважинная насосная установка / Р.С. Яремийчук, Б.М. Кифор, В.Н. Лотовский, В.И. Арцеховский, М.Г. Храбатин, С.Н. Горев, Г.А. Лесовой, К.Г. Догец (СССР). № 4020533/25-06; заявл. 06.02.86; опубл. 23.08.87, Бюл. № 31.

5. А. с. 1474339 СССР, МКИ F 04 F 5/14. Струйный насос / А.М. Абдулзаде, Р.С. Яремийчук, А.И. Спивак, С.Б. Назаров (СССР). № 4304842/25-29; заявл. 08.09.87; опубл. 23.04.89, Бюл. № 15.

6. А. с. 1481485 СССР, МКИ F 04 F 5/02. Струйный насос / А.М. Абдулзаде, Р.С. Яремийчук, А.И. Спивак, Н.А. Ефимов (СССР). № 4302914/25-29; заявл. 08.09.87; опубл. 23.05.89, Бюл. № 19.

7. А. с. 1551840 СССР, МКИ F 04 F 5/54. Скважинная насосная установка / Р.С. Яремийчук, И.В. Белей, Ю.С. Лопатин, М.Г. Храбатин, В.Д. Холодюк, А.А. Домальчук (СССР). № 4449704/25-29; заявл. 29.06.88; опубл. 23.03.90, Бюл. № 11.

8. А.с. 1701992 СССР, МКИ F 04 F 1/20. Устройство для добычи нефти / М.Г. Храбатин, Р.С. Яремийчук, М.Н. Томин, В.Д. Холодюк (СССР). № 4661478/29; заявл. 13.03.89; опубл. 30.12.91, Бюл. № 48.

9. Яремийчук Р.С., Качмар Ю.Д. Вскрытие продуктивных горизонтов и освоение скважин. Львов: Вища школа. 1982. 150 с.

10. Яремийчук Р.С., Качмар Ю.Д. Освоения свердловин: Практикум. Львів: Світ, 1997. 256 с.

11. Яремийчук Р.С., Возный В.Р. Освоения та дослідження свердловин. Львів: Оріяна-Нова, 1994. 440 с.

12. Баскиев К.С., Власов А.И., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидравлика. М.: Недра, 1986. 303 с.

13. Гиматутдинова Ш.К. Справочная книга по добыче нефти. М.: Недра, 1974. 704 с.

14. Справочное руководство по проектированию разработки и эксплуатации нефтяных месторождений / Добыча нефти / Под ред. Ш.К. Гиматутдинова. М.: Недра, 1983. 455 с.

15. Савенков Г.И., Бойко В.С. Расчет процессов интенсификации притока, освоения и эксплуатации скважин. Львов.: Вища школа, 1986. 160 с.

16. Савенков Г.И. Совершенствование технологии процесса освоения скважин сжатым газом: автореф. дис. на присвоение науч. степени

канд. техн. наук: спец. 05.15.10 “Бурение скважин”. Ивано-Франковск, 1986. 22 с.

17. Мищенко Н.Т., Сахаров В.А., Грон В.Г., Богомольный Г.И. Сборник задач по технологии и технике нефтедобычи. М.: Недра, 1984. 272 с.

18. Соколов Е.Я., Зингер Н.М.. Струйные аппараты. 2-е изд., перераб. М.: Энергия, 1970. 288 с.

19. Шуров В.И. Технология и техника добычи нефти. М.: Недра, 1983. 510 с.

20. Аметов И.М., Байдиқов Ю.Н., Рузин Л.М., Спиридонов Ю.А. Добыча тяжелых и высоковязких нефтей. М.: Недра, 1985. 205 с.

21. Яремийчук Р.С., Савенков И.Г. Временная методика проектирования эксплуатации скважин струйными насосами с использованием фонтанного эффекта. Ивано-Франковск, 1991. 21 с.

22. Качмар Ю.Д., Світлицький В.М., Сянюк Б.Б., Яремийчук Р.С. Інтенсифікація припливу вуглеводнів у свердловину: наукове видання, книга перша. Львів: Центр Європи. 2004. 352 с.

23. Качмар Ю.Д., Світлицький В.М., Сянюк Б.Б., Яремийчук Р.С. Інтенсифікація припливу вуглеводнів у свердловину: [наукове видання, книга друга]. Львів: Центр Європи, 2004. 414 с.

24. Патент 57331 Україна, МПК F04F 5/00 E21B 37/00. Спосіб роботи насосно-ежекторної свердловинної струминної установки з гідродинамічним пульсатором для видобування високов'язких нафт / Р.С. Яремийчук, Я.Я. Якимечко, Т.Р. Шандровський. № u2010 08424; заявл. 05.07.2010; опубл. 25.02.2011. Бюл. № 4.

References

1. Yaremiychuk R.S., Kifor B.M., Lotovskiy V.N., Shanovich L.M. Primenenie struynyih apparatov pri osvoenii skvazhin. *Tehnika i tehnologiya bureniya skvazhin: obzor. inform.* М.: VNIOENG, 1988. 56 p. [in Russian]

2. Yaremiychuk R.S., Dzhavadyan A.A. Primenenie struynyih apparatov pri intensifikatsii pritoka nefi. *Neftyanoe hozyaystvo.* 1988. No 5. P. 37-40. [in Russian]

3. Yaremiychuk R.S., Vozniy V.R., Kifor B.M., Lotovskiy V.N. Tehnologiya povyisheniya produktivnosti skvazhin s pomoschyu struynyih apparatov. *Stroitelstvo neftyanyih i gazovih skvazhin na sushe i na more: obzor. inform.* М.: VNIOENG, 1992. 52 p. [in Russian]

4. A. s. 1332086 SSSR, MKI F 04 F 5/54. Skvazhinnaya nasosnaya ustanovka / R.S. Yaremi-

ychuk, B.M. Kifor, V.N. Lotovskiy, V.I. Artsehovskiy, M.G. Hrabatin, S.N. Gorev, G.A. Lesovoy, K.G. Dogets (SSSR). No 4020533/25-06; zayavl. 06.02.86; opubl. 23.08.87, Byul. No 31. [in Russian]

5. A. s. 1474339 SSSR, MKI F 04 F 5/14. Struyniy nasos / A.M. Abdulzade, R.S. Yaremiychuk, A.I. Spivak, S.B. Nazarov (SSSR). No 4304842/25-29; zayavl. 08.09.87; opubl. 23.04.89, Byul. No 15. [in Russian]

6. A. s. 1481485 SSSR, MKI F 04 F 5/02. Struyniy nasos / A.M. Abdulzade, R.S. Yaremiychuk, A.I. Spivak, N.A. Efimov (SSSR). No 4302914/25-29; zayavl. 08.09.87; opubl. 23.05.89, Byul. No 19. [in Russian]

7. A. s. 1551840 SSSR, MKI F 04 F 5/54. Skvazhinnaya nasosnaya ustanovka / R.S. Yaremiychuk, I.V. Beley, Yu.S. Lopatin, M.G. Hrabatin, V.D. Holodyuk, A.A. Domalchuk (SSSR). No 4449704/25-29; zayavl. 29.06.88; opubl. 23.03.90, Byul. No 11. [in Russian]

8. A.s. 1701992 SSSR, MKI F 04 F 1/20. Ustroystvo dlya dobyichi nefi / M.G. Hrabatin, R.S. Yaremiychuk, M.N. Tomin, V.D. Holodyuk (SSSR). No 4661478/29; zayavl. 13.03.89; opubl. 30.12.91, Byul. No 48. [in Russian]

9. Yaremiychuk R.S., Kachmar Yu.D. Vskrytie produktivnih gorizontov i osvoenie skvazhin. Lvov: Vischa shkola. 1982. 150 p. [in Russian]

10. Yaremiichuk R.S., Kachmar Yu.D. Osvoennia sverdlovyn: Praktykum. Lviv: Svit, 1997. 256 p. [in Ukrainian]

11. Yaremiichuk R.S., Voznyi V.R. Osvoennia ta doslidzhennia sverdlovyn. Lviv: Oriiana-Nova, 1994. 440 p. [in Ukrainian]

12. Baskiev K.S., Vlasov A.I., Kochina I.N., Maksimov V.M. Podzemnaya gidravlika. М.: Nedra, 1986. 303 p. [in Russian]

13. Gimatutdinova Sh.K. Spravochnaya kniga po dobieche nefi. М.: Nedra, 1974. 704 p. [in Russian]

14. Spravochnoe rukovodstvo po proektirovaniyu razrabotki i ekspluatatsii neftyanyihmestorozhdeniy / Dobyicha nefi / Pod red. Sh.K. Gimatutdinova. М.: Nedra, 1983. 455 p. [in Russian]

15. Savenkov G.I., Boyko V.S. Raschet protsesov intensifikatsii pritoka, osvoeniya i ekspluatatsii skvazhin. Lvov.: Vischa shkola, 1986. 160 p. [in Russian]

16. Savenkov G.I. Sovershenstvovanie tehnologi protsessa osvoeniya skvazhin szhatyim gazom: avtoref. dis. na prisvoenie nauch. Stepeni kand. tehn. nauk: spets. 05.15.10 “Burenie skvazhin”. Ивано-Франковск, 1986. 22 p. [in Russian]

17. Mischenko N.T., Saharov V.A., Gron V.G., Bogomolnyiy G.I. Sbornik zadach po tehnologii i tehnikе nefte dobychi. M.: Nedra, 1984. 272 p. [in Russian]
18. Sokolov E.Ya., Zinger N.M. Struynnye apparaty. 2-e izd., pererab. M.: Energiya, 1970. 288 p. [in Russian]
19. Shurov V.I. Tehnologiya i tehnika dobychi nefi. M.: Nedra, 1983. 510 p. [in Russian]
20. Ametov I.M., Baydikov Yu.N., Ruzin L.M., Spiridonov Yu.A. Dobyicha tyazhelyih i vysokovyazkkih neftey. M.: Nedra, 1985. 205 p. [in Russian]
21. Yaremiychuk R.S., Savenkov I.G. Vremennaya metodika proektirovaniya espluatatsii skvazhin struynnymi nasosami s ispolzovaniem fontannogo efekta. Ivano-Frankovsk, 1991. 21 p. [in Russian]
22. Kachmar Yu.D., Svitlytskyi V.M., Syniuk B.B., Yaremiichuk R.S. Intensyfikatsiia pryplyvu vuhlevodniv u sverdlovynu: naukove vydannia, knyha persha. Lviv: Tsentr Yevropy. 2004. 352 p. [in Ukrainian]
23. Kachmar Yu.D., Svitlytskyi V.M., Syniuk B.B., Yaremiichuk R.S. Intensyfikatsiia pryplyvu vuhlevodniv u sverdlovynu: [naukove vydannia, knyha druha]. Lviv: Tsentr Yevropy, 2004. 414 p. [in Ukrainian]
24. Patent 57331 Ukraina, MPK F04F 5/00 E21B 37/00. Sposib roboty nasosno-ezhektornoj sverdlovyanoi struynnoi ustanovky z hidrodynamichnym pulsatorom dlia vydobuvannia vysokov'iazkykh naft / R.S. Yaremiichuk, Ya.Ia. Yakymechko, T.R. Shandrovskiy. No u2010 08424; zaiavl. 05.07.2010; opubl. 25.02.2011. Biul. No 4.