

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ НАФТОВИХ СТРУМИННИХ НАСОСІВ

О. В. Паневник

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, Карпатська 15, тел. (0342) 727101,  
e-mail: o.v.panevnik@gmail.com

Проаналізовано тенденції розвитку свердловинних струминних насосів, призначених для експлуатації нафтових родовищ. Намагання оптимізувати процес змішування потоків викликало появу численних конструкцій струминних насосів, в яких замість прямолінійних використовують закручені потоки. Створення в протічній частині струминного насоса циркуляційних течій сприяє вирівнюванню швидкостей коаксіальних потоків, інтенсифікує процес обміну енергіями в рідині та підвищує ефективність процесу змішування. Поєднання прямолінійного та циркуляційного характеру руху змішуваних потоків дозволяє покращити технічні характеристики струминних насосів до 30 %. Геометричні розміри та взаємна орієнтація елементів протічної частини струминного насоса мають визначальний вплив на енергетичну ефективність реалізації ежекційних технологій, а їх оптимізація вимагає проведення багатофакторних експериментальних досліджень, під час яких, окрім конструкторських факторів, повинні враховуватись і режим роботи ежекційної системи в свердловині. Задача оптимізації конструкторських та режимних параметрів свердловинної ежекційної системи може бути вирішена шляхом моделювання робочого процесу струминного насоса із залученням сучасних програмних комплексів SolidWorks та ANSYS, які забезпечують необхідну точність розрахункових операцій. Величина ККД ежекційної системи залежить також від глибини її розміщення в свердловині. Визначення оптимальної глибини розміщення ежекційної системи в свердловині передбачає використання ітераційних методів розрахунку із застосуванням відповідних комп'ютерних програм (наприклад Matchad). Розвиток гідроструминного способу експлуатації нафтових свердловин відзначається появою тенденції до спільного компонування ежекційної системи та традиційних видів глибинного насосного обладнання. В конструкції комбінованої нафтовидобувної системи струминний насос створює зону низького тиску на вибої свердловини та інтенсифікує приплив вуглеводнів з продуктивного горизонту, а традиційний вибійний насос здійснює їх транспортування на поверхню. Наявність в свердловині додаткового (струминного) насоса оптимізує умови використання основного насоса, внаслідок чого покращуються енергетичні характеристики вибійної компоновки та підвищується ефективність нафтовидобутку. Аналіз використання гібридних ежекційних технологій свідчить про перспективність даного напрямку розвитку нафтогазовидобувного обладнання.

Ключові слова: нафтовий струминний насос, свердловинна ежекційна система, енергоефективність насосної установки, змішування циркуляційних потоків, гібридні насосні установки.

Проанализированы тенденции развития скважинных струйных насосов, предназначенных для эксплуатации нефтяных месторождений. Стремление оптимизировать процесс смешивания потоков привело к разработке многочисленных конструкций струйных насосов, в которых вместо прямолинейных используются закрученные потоки. Создание в проточной части струйного насоса циркуляционных течений способствует выравниванию скоростей коаксиальных потоков, интенсифицирует процесс обмена энергиями в жидкости и повышает эффективность процесса смешивания. Сочетание прямолинейного и циркуляционного характеров движения потоков позволяет улучшить технические характеристики струйных насосов до 30 %. Так как геометрические размеры и взаимная ориентация элементов проточной части струйного насоса имеют определяющее влияние на энергетическую эффективность эжекционных технологий, их оптимизация требует многофакторных экспериментальных исследований, при проведении которых, кроме конструкторских факторов, должен учитываться и режим работы эжекционной системы в скважине. Задача оптимизации конструкторских и режимных параметров скважинной эжекционной системы может быть решена путем моделирования рабочего процесса струйного насоса с использованием современных программных комплексов SolidWorks и ANSYS, обеспечивающих необходимую точность расчетных операций. Величина КПД эжекционной системы также зависит от глубины ее установки в скважине. Определение оптимальной глубины установки эжекционной системы в скважине предусматривает использование итерационных методов расчета с применением соответствующих компьютерных программ (например, Matchad). Развитие гидроструйного способа эксплуатации нефтяных скважин продиктовано появлением тенденции к совместной компоновке эжекционной системы и традиционных видов глубинного насосного оборудования. В конструкции комбинированной нефтедобывающей системы струйный насос

создаёт зону низкого давления на забое скважины и интенсифицирует приток углеводородов из продуктивного горизонта, а традиционный забойный насос используется для их транспортирования на поверхность. Наличие в скважине дополнительного (струйного) насоса оптимизирует условия использования основного насоса, что приводит к улучшению энергетических характеристик забойной компоновки и повышению эффективности нефтедобычи. Анализ результатов применения гибридных эжекционных технологий свидетельствует о перспективности данного направления развития нефтегазового оборудования.

Ключевые слова: нефтяной струйный насос, скважинная эжекционная система, энергоэффективность насосной установки, смешивание циркуляционных потоков, гибридные насосные установки.

*The development trends of hydraulic jet pumps used for the oil-fields exploitation are analyzed. The ambition to optimize the process of mixing flows has led to the emergence of numerous designs of jet pumps, in which swirling flows are used instead of direct flows. The creation of circulation flows in the pump wet end promotes alignment of coaxial flows velocities, intensifies the process of energies exchange in the liquid, and increases the efficiency of the mixing process. The combination of direct and circulation flows gives a possibility to improve the technical characteristics of jet pumps up to 30%. The dimensions and the mutual orientation of the elements of the pump wet end have a decisive influence on the energy efficiency of the ejection technologies implementation. The optimization of dimensions and orientation of the components of the jet pump necessitates multifactorial experimental studies, which, in addition to the design factors, should also take into account the working mode of the ejection system in the well. The task of optimizing the design and mode parameters of a well ejection system can be solved by simulating the work process of the jet pump using modern software complexes Solid Works and ANSYS, which provide the necessary accuracy of the calculation operations. The efficiency of the ejection system also depends on the depth of its location in the well. Determining the optimum depth of installation of the ejection system in the well presupposes the use of iterative calculation methods with the aid of appropriate computer programmes (for example, Matchad). The development of the hydro-jet operation of oil wells is characterized by the tendency of a joint arrangement of the ejection system and traditional types of downhole pumping equipment. In the design of the combined oil-producing system the jet pump creates a low pressure zone in the bottom and intensifies the inflow of hydrocarbons from the production horizon, while the traditional downhole pump transports them to the surface. The presence of an additional (jet) pump in the well optimizes the conditions of the main pump use. It improves the energy characteristics of the bottom-hole assembly and increases the efficiency of oil production. The analysis of the hybrid ejection technologies application indicates the prospects of this trend of oil and gas equipment.*

Key words: oil jet pump, well ejection system, energy efficiency of the pump installation, mixing of circulating flows, hybrid pump units.

### Вступ

Використання нафтових ежекційних технологій дозволяє суттєво підвищити ефективність розробки родовищ нафти і газу та енергетичну безпеку України. Відсутність рухомих частин, проста та недорога конструкція, і можливість застосування у віддалених важкодоступних районах зумовили поширення ежекційних технологій на більшість виробничих процесів буріння, експлуатації та ремонту нафтових і газових свердловин. Розробка родовищ нафти і газу супроводжується збільшенням величини пластових тисків та зростанням глибини пробурених експлуатаційних свердловин. Підвищення рівня світового споживання нафтопродуктів зумовлює необхідність залучення до експлуатації родовищ важкодоступних вуглеводнів. Зважаючи на неперервне зростання потреби в енергоносіях та ускладнення умов нафтовидобутку, удосконалення відомих та розробка нових технологій, спрямованих на розробку покладів вуглеводнів, є актуальним завданням.

### Аналіз сучасних досліджень і публікацій

Поширеність використання нафтогазових ежекційних технологій зумовлена можливістю застосування струминного насоса в складних умовах експлуатації свердловин (зокрема в агресивному середовищі) [1]. Свердловинні ежекційні системи дають змогу подовжити тривалість експлуатації нафтових свердловин фонтанним способом, підвищити ефективність застосування занурених електровідцентрових [2] та глибинних штангових [3] насосів під час використання їх спільної компоновки зі струминним насосом. Нафтогазові ежекційні технології дозволяють зберегти економічно обґрунтований обсяг нафтовидобутку на пізніх стадіях розробки родовищ вуглеводнів. Подальше зростання об'ємів використання нафтогазових ежекційних технологій вимагає розвитку теоретичних питань [4], спрямованих на удосконалення методів проектування ежекційних систем. Упродовж сімдесятих років технології застосування струминних насосів при бурінні [5], експлуатації [6] та ремонті [7] нафтових і газових свердловин.

**Виділення частини невирішеної проблеми**

Світовий досвід використання свердловинних ежекційних систем свідчить про відсутність системних досліджень, спрямованих на визначення впливу експлуатаційних факторів на ефективність застосування струминних насосів. Нестача інформації про діапазон зміни експлуатаційних параметрів свердловинних ежекційних систем ускладнює формування граничних умов, необхідних для вибору конструкцій струминних насосів, що забезпечують їх експлуатацію в оптимальному режимі. Як наслідок, під час проектування конструкцій свердловинних ежекційних систем підвищується небезпека необґрунтованого вибору схем їх розміщення в свердловині та компоновки з іншим глибинним обладнанням, що може негативно вплинути на собівартість видобутої продукції. Пошук нових шляхів удосконалення ежекційних технологій вимагає аналізу основних етапів та тенденцій розвитку свердловинних струминних насосів.

**Мета досліджень**

Метою досліджень, результати яких розглядаються в даній роботі, є аналіз схем і глибинних компоновок нафтових свердловинних струминних насосів, узагальнення їх конструкцій та виявлення тенденцій до подальшого удосконалення, спрямованого на підвищення ефективності реалізації ежекційних технологій в нафтогазовій промисловості.

**Висвітлення основного матеріалу**

Використанню нафтових свердловинних струминних насосів посприяли такі їх особливості:

- менша чутливість до вмісту вільного газу та піску в рідині порівняно з іншими свердловинними насосами;
- суттєве зменшення тиску на виході струминного насоса, необхідного для підйому рідини на поверхню, завдяки газліфтному ефекту, який виникає при виділенні вільного газу в НКТ;
- простота конструкції і порівняно малі габарити, відсутність рухомих частин, що забезпечують високу надійність і корозійну стійкість за невисокої вартості насоса;
- надійність струминного насоса значно вища надійності ЕВН і визначається загалом надійністю силового обладнання та підвідних комунікацій. Міжремонтний період свердловинного струминного насоса становить 1-2 роки;

– можливість створення насосів із значною подачею, які опускають в свердловину і піднімають з неї за допомогою робочої рідини.

Компоновка зануреного обладнання містить три суміжні області з різними тисками. Однією з важливих умов нормальної експлуатації струминного насоса є герметичність елементів зануреного обладнання, які утворюють канали змішаного, робочого та інжектowanego потоків. Контроль герметичності повинен бути основною операцією при уведенні струминного насоса в роботу. Для гідравлічного випробування гідроструминної установки необхідно використовувати спеціальний опресувальний пристрій.

Поширення свердловинних ежекційних систем обмежується низьким ККД струминних насосів. За твердженням окремих авторів, ККД струминного насоса може досягати 0,5, проте його фактичне значення не залежить від фізичних властивостей змішуваних потоків та взаємної орієнтації елементів протічної частини і, як правило, не перевищує величини  $\eta = 0,3$ . Зважаючи на домінуючий вплив енергетичних показників на ефективність реалізації технологічних процесів, геометричні розміри елементів струминного насоса повинні прийматись з умови досягнення максимального ККД свердловинної ежекційної системи. Недостатня величина ККД струминного насоса пов'язана із значними гідравлічними втратами, що супроводжують процес змішування потоків. Намагання оптимізувати процес змішування потоків викликало появу численних конструкцій струминних насосів, в яких замість прямої течії використовують закручені потоки. Створення в протічній частині струминного насоса циркуляційних течій сприяє вирівнюванню швидкостей коаксіальних потоків, інтенсифікує процес обміну енергіями в рідині та підвищує ефективність процесу змішування. Поєднання прямої та циркуляційної характеристик руху змішуваних потоків дозволяє покращити технічні характеристики струминних насосів до 30%. При цьому завихрення потоку забезпечують двома шляхами:

1. Обертанням елементів протічної частини струминного насоса.
2. Використанням похилих направляючих елементів, розміщених в робочому або інжектowanego потоці.

Створення обертового руху елементів протічної частини, однак, суперечить основній перевазі застосування струминного насоса, яка полягає у відсутності рухомих механічних частин в конструкції ежекційної системи. Дана

обставина суттєво знижує область використання таких насосів та надійність вибієної компоновки.

Геометричні розміри та взаємна орієнтація елементів протічної частини струминного насоса мають визначальний вплив на енергетичну ефективність реалізації ежекційних технологій. Геометрію приймальної камери, камери змішування та дифузора струминного насоса характеризують наступні параметри, які з метою уніфікації конструкцій, зазвичай, подають у відносній формі:

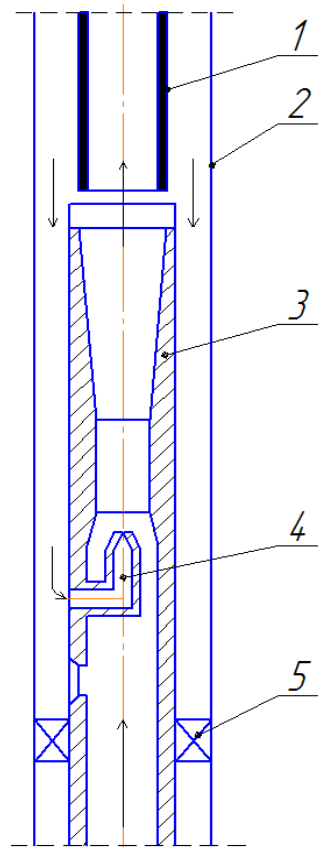
- відстань між робочою насадкою та камерою змішування струминного насоса;
- співвідношення площ перерізів камери змішування та робочої насадки;
- довжина камери змішування та дифузора;
- кут розкриття дифузора.

Зокрема у випадку, якщо довжина камери змішування прийнята меншою за оптимальну, процес вирівнювання профілів швидкостей змішуваних потоків виявляється незавершеним, що негативно впливає на ККД струминного насоса; у випадку перевищення довжини камери змішування зростають гідравлічні втрати на шляху до дифузора струминного насоса, що також призводить до зменшення ККД.

Оптимізація геометричних розмірів та орієнтації елементів струминного насоса вимагає проведення багатфакторних експериментальних досліджень, які крім конструкторських факторів, повинні враховувати і режим роботи ежекційної системи в свердловині. Задача оптимізації конструкторських та режимних параметрів свердловинної ежекційної системи може бути вирішена шляхом моделювання робочого процесу струминного насоса із залученням сучасних програмних комплексів SolidWorks та ANSYS, які забезпечують необхідну точність розрахункових операцій. Слід зауважити, що величина ККД ежекційної системи залежить також від глибини її розміщення в свердловині. Визначення оптимальної глибини розміщення ежекційної системи в свердловині передбачає використання ітераційних методів розрахунку із застосуванням відповідних комп'ютерних програм (наприклад Matchad).

На рисунку 1 показана [8] типова схема пакерного струминного насоса із подаванням робочої рідини каналом затрубного простору.

Пакерні струминні насоси у промисловому масштабі почали використовувати в США фірми Kobe, National та Guiberson у 1970–х роках і на сьогоднішній день застосовують у більше ніж половині свердловин, обладнаних насосними установками.



**1 – НКТ; 2 – експлуатаційна колона;  
3 – камера змішування з дифузором;  
4 – робоча насадка; 5 – пакер**

**Рисунок 1 – Пакерний струминний насос**

Поверхнєве обладнання пакерних струминних насосів призначене для здійснення наступних операцій:

- підготовка пластової рідини до її використання як робочої;
- первинна обробка рідини, що видобувається шляхом видалення вільного газу і твердих частинок та додавання в неї хімреагентів;
- створення циркуляції робочої рідини для приведення в дію свердловинного струминного насоса.

Розподіл робочої рідини при централізованій подачі в чисельні близько розміщені свердловини здійснюється за допомогою групової установки.

Устьове обладнання включає лінію подачі робочої рідини, вузол ловильного пристрою для видалення струминного насоса, який скидається, вихідну лінію, гідравлічну обв'язку для створення прямої і зворотної циркуляції в свердловині, клапани та манометри для визначення тиску в трубному і затрубному просторах.

Схема підведення потоків визначає особливості експлуатації пакерного струминного насоса. Видобування нафти по експлуатаційній

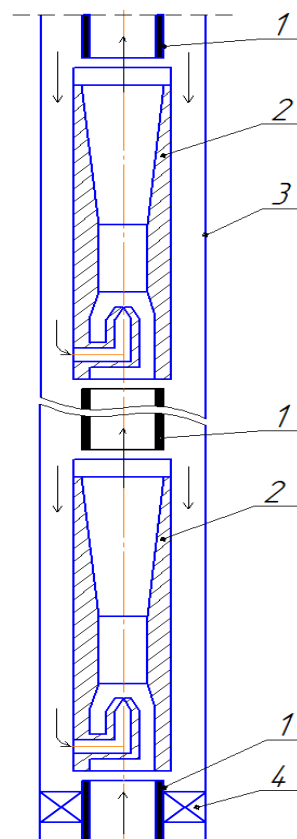
колоні призводить до її кородування, зношування, відкладання у її просторі парафіну і солей. У випадку підйому пластової рідини колоною НКТ експлуатаційна колона піддається дії високого тиску робочої рідини.

Недоліком використання струминного насоса з поверхневим силовим приводом є необхідність підготовки значного об'єму робочої рідини та створення високого тиску на вході в насос. На відміну від компоновки, що складається з дворядного ліфта, для пакерних струминних насосів неможливо визначити статичний та динамічний рівні рідини в затрубному просторі, що ускладнює контроль за роботою ежекційної системи. Крім того, безпакерна компоновка дозволяє швидше виконувати заміну струминного насоса гідравлічним способом і меншим об'ємом робочої рідини. Необхідно також відзначити, що виключення пакера з компоновки дозволяє підвищити надійність експлуатації та зменшити витрати на капітальний ремонт свердловин гідроструминного фонду. Однак, через значну металомісткість компоновки дворядного ліфта перевага її використання у порівнянні з використанням пакерного струминного насоса є сумнівною.

При послідовному з'єднанні пакерних струминних насосів (рис. 2) [9] змішаний потік нижнього струминного насоса спрямовується у всмоктувальну лінію верхнього, а загальний робочий потік, який створюється поверхневим насосним агрегатом, розподіляється між робочими насадками ежекційної системи відповідно до співвідношення гідравлічних опорів її елементів.

Відстань між струминними насосами визначається їх напірною характеристикою, тобто можливістю створювати необхідний напір та витрату пластової рідини на ділянці певної довжини. Наявність двох насосів повинна забезпечити необхідний напір та витрату змішаного потоку по всій довжині колони НКТ. Для підвищення ефективності компоновки нижній струминний насос може мати більше співвідношення діаметрів камери змішування та робочої насадки, ніж верхній насос. Зростання даного співвідношення дозволяє підвищити продуктивність компоновки.

Визначення ефективності послідовно з'єднаних струминних насосів вимагає проведення комплексу теоретичних і промислових досліджень та порівняння отриманих результатів з показниками експлуатації одинарних ежекційних систем.



1 – НКТ; 2 – струминний насос;  
3 – експлуатаційна колона; 4 – пакер  
Рисунок 2 – Послідовно з'єднані пакерні струминні насоси

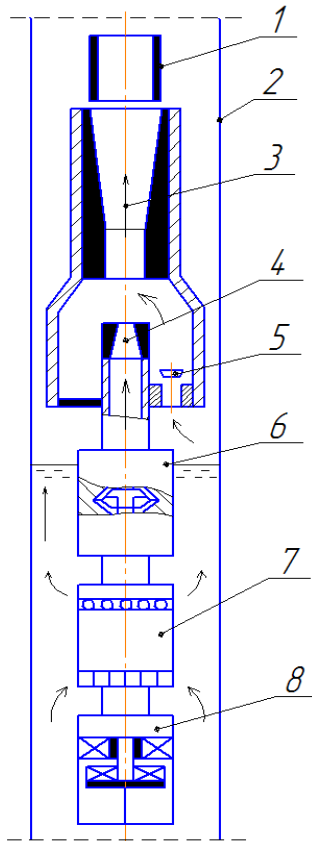
Попередній аналіз гідравлічних зв'язків між елементами послідовного з'єднання пакерних струминних насосів дозволяє встановити два основних фактори, які є визначальними для оцінки ефективності ежекційної системи: витрата робочого потоку та вид гідравлічного опору, встановленого в напірній і всмоктувальній лінії.

Витрата робочого потоку для кожного з насосів компоновки зменшується порівняно з одинарним струминним насосом. При цьому зменшується швидкість потоку в робочій насадці і імовірність виникнення кавітації. Одночасно зменшується максимально допустима глибина розміщення ежекційної системи, яка визначається величиною граничного напору струминного насоса. Слід також зауважити, що коефіцієнт інжекції буде меншим для нижнього струминного насоса, оскільки він повинен подолати гідравлічний опір каналу НКТ, розміщених нижче верхнього струминного насоса.

Таким чином, ефективність та доцільність використання послідовно з'єднаних пакерних струминних насосів повинна бути встановлена в процесі досліджень.

Порівняно із струминним насосом з поверхневим приводом система «Тандем» [10] має такі переваги (рис. 3):

- підвищення ККД установки за рахунок виключення трубопроводу для подавання робочої рідини;
- спрощення конструкції установки та підвищення надійності за рахунок виключення пакера та обладнання для приготування робочого потоку.



**1 – колона НКТ; 2 – свердловина; 3 – камера змішування з дифузorzом; 4 – робоча насадка; 5 – зворотний клапан; 6 – ЕВН; 7 – газосепаратор; 8 – електродвигун**  
**Рисунок 3 – Схема насосно-ежекторної системи «Тандем»**

Основною причиною створення компоновки «Тандем» є накопичення газу в затрубному просторі свердловини. Використання ефективних газосепараторів в комплекті з ЕВН, крім усунення шкідливого впливу газу на роботу насоса в багатьох випадках викликає явище підйому частини продукції по затрубному простору, внаслідок чого відбувається відкладення твердої фази на внутрішній поверхні експлуатаційної колони, на зовнішній поверхні НКТ і кабеля. Це може викликати утворення глухих парафіногідратних корків, для ліквідації яких необхідні високовартісні роботи з капітального

ремонту свердловин. Устьовий клапан, який з'єднує затрубний простір з колектором (поверхневим трубопроводом), спрацьовує, коли тиск в затрубному просторі перевищує тиск на усті свердловини.

Тиск на усті видобувних свердловин може досягати 3 МПа. Це пов'язано з необхідністю транспортування продукції свердловини до замірних вузлів та дотискних насосних станцій. В зимовий час, навіть за незначного вмісту води в продукції свердловини клапан замерзає, і в затрубному просторі накопичується газ.

Ще однією важливою причиною створення системи «Тандем» є існуюче обмеження внутрішнього діаметра експлуатаційної колони, яке не дозволяє застосувати насоси ЕВН необхідного типорозміру. Так, особливістю свердловин ОАО «Юганскнафтогаз» є неможливість використовувати електровідцентрові насоси габариту 5А та 6. Використання системи «Тандем» дозволяє меншим типорозміром електровідцентрового насоса експлуатувати свердловини в області високих подач.

Технологія «Тандем» була розроблена в МІНГ ім. І.М. Губкіна у 80-х роках минулого століття і на початок 2000 років реалізована більше, ніж в 600 свердловинах Росії та Білорусії.

При експлуатації насосно-ежекторної системи «Тандем» (рис. 3) продукція з свердловини 2 надходить на газосепаратор 7. Далі рідина прямує на електровідцентровий насос 6 і через робочу насадку 4 та камеру змішування з дифузorzом 3 надходить у колону НКТ. Відсепарований газ з газового сепаратора 7 надходить в затрубний простір, звідки через клапан 5 всмоктується в протічну частину струминного насоса. Ежекцію газу та рідини з затрубного простору здійснюють в зоні, розміщеній нижче рівня утворення відкладів твердої фази (парафіну, смол, асфальтенів, газогідратів). Завдяки використанню електровідцентрового насоса меншого типорозміру в установках «Тандем» в декілька разів зменшуються витрати на електроенергію порівняно із стандартною експлуатацією ЕВН.

Досвід експлуатації систем «Тандем» протягом останніх 30 років дозволив сформулювати основні переваги використання даної технології:

- збільшення відбору рідини і газорідинної суміші з свердловини за рахунок інжекції їх із затрубного простору;
- переведення експлуатації малодобітних свердловин (з використанням ЕВН) з періодичного в стаціонарний режим роботи;
- збільшення міжремонтного періоду серійних ЕВН;

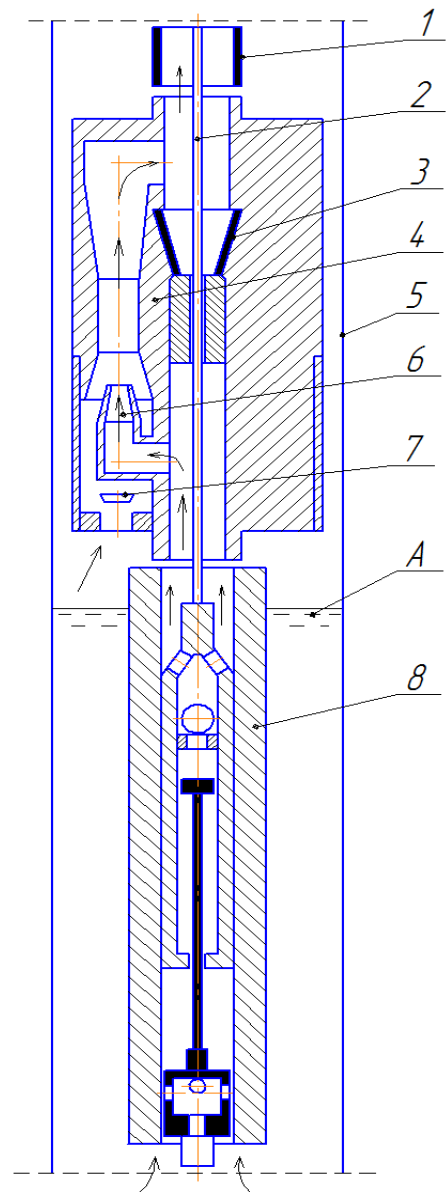
- стабілізація струмових навантажень на електропривод;
- успішна адаптація системи «Тандем» до нестационарних умов, викликаних зміною пластового тиску, продуктивності пласта, проявів вільного газу тощо.

Позитивний досвід спільного використання електровідцентрового та струминних насосів посприяв появі низки дослідних гібридних ежекційних компоновок.

Свердловинний ежектор [3] (рис. 4) відрізняється від компоновки «Тандем» типом силового привода струминного насоса: електровідцентровий насос замінений на штанговий свердловинний. При цьому збережена основна мета розробки нової компоновки: зменшення негативного впливу вільного газу на роботу свердловинного насоса. Зважаючи на величину подачі, яка може створюватись з використанням штангового насоса, свердловинний ежектор призначений для використання в малодобітних свердловинах на пізніх стадіях їх експлуатації.

Потік пластової рідини за допомогою штангового насоса 8 спрямовується на робочу насадку 6 струминного насоса (рис. 4). Внаслідок високої швидкості витікання газорідинної суміші з робочої насадки в приймальній камері створюється зона низького тиску, зворотний клапан 7 відкривається, і вільний газ із затрубного простору надходить в протічну частину струминного насоса. Вільний газ зустрічається з рідиною, що виходить з робочої насадки, і через камеру змішування та дифузор газорідинна суміш надходить в НКТ. Необхідно відзначити, що штанговий насос не є менш чутливим за електровідцентровий насос до вмісту в продукції свердловини вільного газу, наявність якого зменшує ступінь наповнення робочої камери.

Перша згадка про можливість використання штангового свердловинного насоса в спільній компоновці з свердловинним ежектором належить Молчанову В.А. (ОАО «Сервіс Уфа»). Ним запропоновано дві конструкції свердловинного струминного насоса – перша схема стосується класичного ежектора, друга – струминного насоса з кільцевим соплом, утвореним центральним тілом у вигляді насосної штанги. Авторами ідеї проведені лабораторні експериментальні дослідження можливості експлуатації струминного насоса в умовах, близьких до промислових. В Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу розроблена захищена патентом конструкція свердловинного ежектора з приводом від штангового насоса.



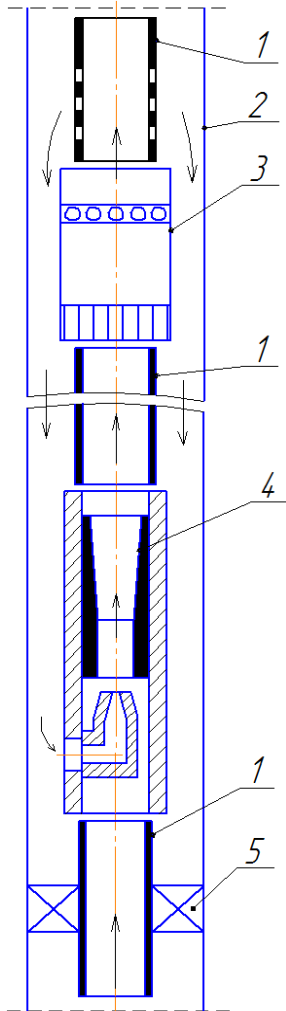
1 – НКТ; 2 – штанга; 3 – фіксатор;  
 4 – камера змішування з дифузором;  
 5 – експлуатаційна колона; 6 – робоча насадка;  
 7 – зворотний клапан; 8 – штанговий насос;  
 А – динамічний рівень рідини в свердловині  
**Рисунок 4 – Свердловинний ежектор з приводом від штангового глибинного насоса**

На відміну від компоновки «Тандем», свердловинний ежектор відрізняється періодичною зміною в часі витрати робочого потоку, яка визначається законом руху точки підвісу штанг та рухомих елементів верстата-качалки. Зважаючи на суттєву залежність режиму роботи струминного насоса від величини витрати робочого потоку, завданням майбутніх досліджень є визначення критичних значень кутів поворота кривошипа верстата-качалки, які забезпечують робочий режим експлуатації ежекційної системи.

Спільне використання струминного та плунжерного насосів дозволяє зменшити навантаження на привод штангового глибинного насоса [3] та здійснювати видобування високо-в'язкої нафти [11].

Гібридна компоновка струминного насоса та газліфтною установки дозволяє, порівняно з використанням електровідцентрових і гвинтових насосів, зберегти кошти на обслуговування свердловин [2]. Відоме також використання струминного насоса для підвищення ефективності експлуатації свердловин гвинтовими насосами.

На відміну від компоновки «Тандем», в свердловинній гідравлічній системі, зображеній на рисунку 5, струминний насос знаходиться [12] нижче рівня розміщення електровідцентрового насоса, а між ними знаходиться колона НКТ розрахункової довжини.



**1 – НКТ; 2 – свердловина; 3 – ЕВН;  
4 – струминний насос; 5 – пакер**

**Рисунок 5 – Послідовне з'єднання струминного та електровідцентрового насосів**

Потік рідини, який створюється насосом ЕВН, після виходу з напірного патрубку (рис. 5) поділяється на дві частини: один потік рухається вгору до устя свердловини, а другий, пройшовши затрубний простір, рухається в напрямку до вибою і формує робочий потік розміщеного на вибої струминного насоса. Після проходження робочої насадки даний потік формує в приймальній камері струминного насоса зону низького тиску, яка сполучається з продуктивним горизонтом і створює умови для надходження пластової рідини в свердловину. Після з'єднання робочого та інжектованого потоку змішаний потік колоною НКТ надходить у всмоктувальну лінію електровідцентрового насоса. Співвідношення витрат висхідного та низхідного потоків після поділу загального потоку, створюваного насосом ЕВН, визначається величиною гідравлічного опору каналів НКТ, затрубного простору та робочої насадки струминного насоса.

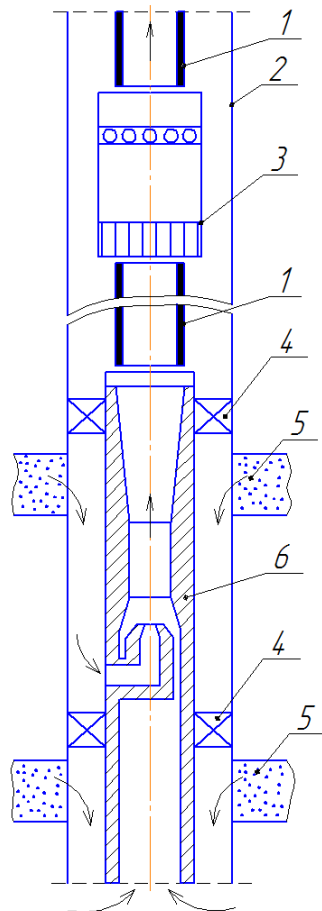
За задумом авторів конструкції, нижній струминний насос створює в свердловині умови для надходження пластової рідини з продуктивного горизонту, а верхній насос ЕВН транспортує її на поверхню.

На відміну від компонок з паралельним розміщенням струминного насоса, в запропонованій схемі відсутній поділ робочого потоку на дві складові. Зважаючи на визначальну роль величини робочої витрати на характеристику ежекційної системи послідовне розташування струминного та електровідцентрового насосів має перспективи промислового використання. Ефективність роботи компоновки у складі послідовно з'єднаних струминного та електровідцентрового насосів може бути визначена у ході досліджень.

Роздільна експлуатація багатопластових родовищ передбачає [13] послідовне з'єднання електровідцентрового насоса та розміщеного на вибої струминного насоса, встановленого між двома пакерами (рис. 6). Кінцевий простір між пакерами сполучається з верхнім продуктивним горизонтом, а кільцевий простір, розміщений нижче рівня встановлення нижнього пакера, сполучається з нижнім продуктивним горизонтом і всмоктувальною лінією струминного насоса. Наведена на рисунку 6 схема може бути реалізована у випадку, коли тиск і продуктивність верхнього пласта перевищують аналогічні параметри нижнього продуктивного горизонту. Верхній продуктивний горизонт в даному випадку є джерелом робочого або активного потоку, а нижній горизонт формує інжектований потік. Внаслідок витікання з великою шви-



дкістю з робочої насадки пластової рідини верхнього горизонту в приймальній камері струминного насоса створюється зона низького тиску, яка сприяє підсмоктуванню пластової рідини нижнього продуктивного горизонту.



1 – НКТ; 2 – експлуатаційна колона;  
3 – ЕВН; 4 – пакер; 5 – продуктивний горизонт; 6 – струминний насос

Рисунок 6 – Насосна установка для експлуатації багатопластових родовищ

Після вирівнювання швидкостей в камері змішування струминного насоса сумарний потік, який надходить з верхнього та нижнього горизонтів, через дифузор струминного насоса прямує в канал НКТ і надходить у всмоктувальну лінію електровідцентрового насоса. Електровідцентровий насос транспортує продукцію свердловини на поверхню каналом НКТ. Як і в попередній схемі, в даній компоновці струминний насос забезпечує надходження пластової рідини в свердловину, а електровідцентровий насос транспортує її на поверхню.

Нведена на рисунку 6 схема насосної установки запропонована в ООО «КогалимНДП-нафта» та ООО «Лукойл-Західний Сибір». Передбачений також варіант використання аналогічної схеми для випадку перевищення продук-

тивності та тиску нижнього продуктивного горизонту порівняно з верхнім. В цьому випадку конструктивне виконання струминного насоса передбачає використання нижнього продуктивного горизонту для створення робочого (активного) потоку, а верхній продуктивний горизонт формує інжектований потік.

Слід зауважити, що ефективність зображеної на рисунку 6 схеми на сьогоднішній день не доведена промисловими дослідженнями.

## Висновок

1. Коефіцієнт корисної дії свердловинної ежекційної системи може бути підвищений на основі удосконалення процесу змішування потоків шляхом створення в протічній частині струминного насоса циркуляційних (вихорових) течій. При цьому зростають напір та коефіцієнт ежекції струминного насоса. Циркуляційні течії в протічній частині струминного насоса доцільно створювати за допомогою похилих направляючих елементів, розміщених в робочому та інжектованому потоках. Завихрення потоку в свердловинних струминних насосах може бути рекомендована при реалізації довготривалих технологічних процесів, наприклад, при видобуванні пластового флюїду. Розробка конструкцій «вихорових» струминних насосів потребує теоретичного обґрунтування.

2. Підвищення ефективності застосування нафтогазових ежекційних технологій може бути досягнуто шляхом оптимізації вибору конструкторських, режимних та експлуатаційних параметрів використання свердловинних струминних насосів. Ефективність вибору конструкторських і експлуатаційних та прогнозування режимних параметрів свердловинних струминних насосів може бути підвищена шляхом використання сучасних програмних комплексів SolidWorks, ANSYS та Matchad, які забезпечують необхідну точність проведення розрахункових операцій.

3. Розвиток гідроструминного способу експлуатації нафтових свердловин відзначається появою тенденції до спільного компонування ежекційної системи та традиційних видів глибинного насосного обладнання. В конструкції комбінованої нафтовидобувної системи струминний насос створює зону низького тиску на вибої свердловини та інтенсифікує приплив вуглеводнів з продуктивного горизонту, а традиційний вибійний насос здійснює їх транспортування на поверхню. Наявність в свердловині додаткового (струминного) насоса оптимізує умови використання основного насоса, внаслідок

док чого покращуються енергетичні характеристики вибівної компоновки та підвищується ефективність нафтовидобутку. Аналіз використання гібридних ежекційних технологій свідчить про перспективність даного напрямку розвитку нафтогазовидобувного обладнання.

Завдання подальших досліджень полягає в експериментальній перевірці ефективності використання удосконалених конструкцій свердловинних струминних насосів під час їх експлуатації в оптимальному режимі.

### **Література**

1 Паневник А.В. Определение эксплуатационных параметров наддольной эжекторной компоновки / А.В. Паневник, И.Ф. Конкур, Д.А. Паневник // Нефтяное хозяйство. – 2018. – №3. – С. 70-73.

2 Nunez O.A. Gas lift jet pump hybrid completion reduces non-productive time during unconventional well production / O.A. Nunez, T.S. Pough, I. Hubbard / SPE Argentina Exploration and Production of Unconventional Resources Symposium, Buenos Aires, Argentina, 1-3 June 2016. - SPE - 180958 - MS. - 9 p.

3 Дубей О.Я. Підвищення ефективності установок свердловинних штангових насосів шляхом застосування нафтогазових ежекторів: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.12 / Дубей Ольга Ярославівна. – Івано-Франківськ, 2017. – 217 с.

4 Velychkovych A.S. Study of the stress state of the downhole jet pump housing / A.S. Velychkovych, D.O. Panevnyk // Науковий вісник НГУ. – 2017. – №5. – Р. 50-55.

5 Паневник Д.А. Оценка напряженного состояния корпуса наддольного гидроэлеватора / Д.А. Паневник, А.С. Величкович // Нефтяное хозяйство. – 2017. – №1. – С.70-73.

6 Liknes F. Jet pump / Liknes F. // Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2013. – 109 p.

7 Syed A.A. Coiled-tubing vacuum removes drilling-induced damage / A.A.Syed, C.H. Jeffrey, F.D.Gino // Oil and Gas Journal. – 2002. – Vol.100. – No 13. – P. 41-46.

8 Териков В.А. Промысловые исследования скважин Самотлорского месторождения, оборудованных установками пакерных гидроструйных насосов, и перспективы развития гидроструйного способа эксплуатации / В.А. Териков, А.Н. Дроздов // Нефтепромысловое дело. – 2003. – №4. – С. 20–24.

9 А.с. 1244391 СССР, F04F 5/02. Скважинный струйный насос / В.П. Петриченко, П.М. Сиваев, В.К. Черкашин (СССР). –

№ 3839482/25–06; заявл. 04.01.85; опубл. 15.07.86, Бюл. № 26.

10 Мищенко И.Т. Струйные насосы для добычи нефти / И.Т. Мищенко, Х.Х. Гумерский, В.П. Марьенко. – М.: Нефть и газ, 1996. – 150 с.

11 Shen I. Application of composite jet-rod pumping system in a deep heavy-oil field in Tarim China / I. Shen, X. Wu, I. Wang // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Florence, Italy, 19-22 September 2010. - SPE 134068. - 8 p.

12 Пат. 2177534 Российской Федерации, МПК E21B 43/00. Способ добычи нефти / Пасечник М.П., Коряков А.С.; заявитель патентообладатель ОАО „Сибнефть–Ноябрьск-нефтегазгеофизика„ – №2000106533/03; заявл. 20.03.2000 опуб. 27.12.2001. – 8 с. : ил.

13 Пат. 2282759 Российской Федерации, МПК F04F 5/54, E21B 43/14. Способ работы скважинной струйной установки при эксплуатации многопластовых месторождений / Павлов Е.Г., Потрясов А.А., Сергиенко В.Н., Валеев М.А., Рахматуллин В.Н.; Заявитель и патентообладатель ОАО Когалымский научно-исследовательский и проектный институт нефти. – № 2005106506/20; заявл. 20.06.2005; опуб.27.08.2006.– 5 с.: ил.

### **REFERENCES**

1 Panevnik A.V. Opredelenie ekspluatatsionnykh parametrov naddolnoy ezhektornoj komponovki / A.V. Panevnik, I.F. Konkur, D.A. Panevnik // Neftyanoe hozyajstvo. - 2018. - №3. - pp. 70-73.

2 Nunez O.A. Gas lift jet pump hybrid completion reduces non-productive time during unconventional well production / O.A. Nunez, T.S. Pough, I. Hubbard / SPE Argentina Exploration and Production of Unconventional Resources Symposium, Buenos Aires, Argentina, 1-3 June 2016. - SPE - 180958 - MS. - 9 p.

3 Dubej O.Ya. Pidvishennya effektivnosti ustanovok sverdlvinnih shtangovih nasosiv shlyahom zastosuvannya naftogazovih ezhektoriv: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.05.12 / Dubej Olga Yaroslavivna. - Ivano-Frankivsk, 2017. - 217 p.

4 Velychkovych A.S. Study of the stress state of the downhole jet pump housing / A.S. Velychkovych, D.O. Panevnyk // Naukovyj visnyk NGU. - 2017. - №5. - pp. 50-55.

5 Panevnik D.A. Ocenka napryazhennogo sostoyaniya korpusa naddolnogo gidroelevatora / D.A. Panevnik, A.S. Velichkovich // Neftyanoe hozyajstvo. - 2017. - №1. - pp. 70-73.

6 Liknes F. Jet pump / Liknes F. -- Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2013. - 109 p.

7 Syed A.A. Coiled-tubing vacuum removes drilling-induced damage / A.A.Syed, C.H. Jeffrey, F.D.Gino // Oil and Gas Journal. - 2002. - Vol.100. - No 13. - pp. 41-46.

9 A.s. 1244391 SSSR, F04F 5/02. Skvazhinnyj strujnyj nasos / V.P. Petrichenko, P.M. Sivaev, V.K. Cherkashin (SSSR). – No 3839482/25–06; zayavl. 04.01.85; opubl. 15.07.86, Byul. No 26.

10 Mishenko I.T. Strujnye nasosy dlya dobychi nefti / I.T. Mishenko, H.H. Gumerskij, V.P. Marenko. – M.: Neft i gaz, 1996. – 150 p.

11 Shen I. Application of composite jet-rod pumping system in a deep heavy-oil field in Tarim China / I. Shen, X. Wu, I. Wang // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Florence, Italy, 19-22 September 2010. - SPE 134068. - 8 p.

12 Pat. 2177534 Rossijskoj Federacii , MPK E21V 43/00. Sposob dobychi nefti / Pasechnik M.P.,KoryakovA.S.; zayaviteli patentoobladatel OAO „Sibneft–Noyabrskneftegazgeofizika”. – No 2000106533/03; zayavl. 20.03.2000 opub. 27.12.2001. – 8 p. : il.

13 Pat. 2282759 Rossijskoj Federacii, MPK F04F 5/54, E21B 43/14. Sposob raboty skvazhinnoj strujnoj ustanovki pri ekspluatácii mnogoplastovyh mestorozhdenij / Pavlov E.G., Potryasov A.A., Sergienko V.N., Valeev M.A., Rahmatullin V.N.; Zayavitel i patentoobladatel OAO Kogalymskij nauchno–issledovalskij i proektnyj institut nefti. – No 2005106506/20; zayavl. 20.06.2005; opub.27.08.2006. – 5 p.: il.