

Н. Г. ШЕВЧЕНКО, Н. М. ФАТЄЄВА, В. Ю. ІВАЩЕНКО, О. М. ФАТЄЄВ

ВПЛИВ СКЛАДУ ТА РЕОЛОГІЇ НАФТОВОЇ ПРОДУКЦІЇ НА РОБОТУ ШТАНГОВОЇ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

Розглянуто експлуатацію нафтових свердловин із застосуванням штангових глибинних насосів. Досліджено, що склад і властивості середовищ, що перекачуються, істотно впливають на робочі параметри насосного обладнання, приводять до підвищення енергетичних витрат на підйом продукції, зриву подачі та іншим технічним проблемам. Продукція свердловин є суміш нафти, води та газу – газорідина суміш. Зміна пластових умов (тиск та температура) уздовж свердловини змінює об'ємну частку вільного/розчиненого газу у нафті та фізичні властивості газорідинної суміші. Проведено огляд промислових реологічних показників водонафтової суміші при механізованому видобутку нафти. Аналіз показав, що зміна об'ємної концентрації води в нафті у діапазоні 50–80 % сприяє зміні реологічних показників та приводить до підвищення в'язкості. Прийнято допущення, що нелінійну в'язку модель водонафтової емульсії типу Гершеля-Балклі можна описати узагальненою ньютонівською моделлю з введенням ефективної в'язкості. Для дослідження складу нафтової продукції на ефективність роботи насосної установки розглянуто наступні взаємопов'язані задачі. Перша – визначити залежності зміни гідродинамічних характеристик нафтогазового потоку у свердловині, динамічного рівня та місця установки насоса. На пластові умови на прийомі у насос провести розрахунки робочих характеристик штангового насоса. Для обраної конструкції колони штанг визначити напругу у точці підвісу штанг – перевірка забезпечення міцності. Розрахувати основні енергетичні показники всієї насосної установки. Розв'язання цих завдань виконано за допомогою програмного комплексу. У роботі удосконалена методика визначення ефективної в'язкості з урахуванням зміни реології промислових даних. У роботі проведено дослідження зміни об'ємної доли вільного газу та води у нафтогазовій продукції на глибину установки насоса, динамічний рівень, тиск у насосі, режимні параметри насоса. Надано результати аналізу впливу зміни структурної в'язкості водонафтової продукції на параметри всієї насосної установки.

Ключові слова: свердловина, насос, колона штанг, реологія, неньютонівська рідина, газорідина суміш, вільний та розчинений газ, об'ємна фаза, тиск насичення, в'язкість ефективна, коефіцієнт корисної дії.

Н. Г. ШЕВЧЕНКО, Н. Н. ФАТЄЄВА, В. Ю. ІВАЩЕНКО, А. Н. ФАТЄЄВ

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И РЕОЛОГИИ НЕФТЯНОЙ ПРОДУКЦИИ НА РАБОТУ ШТАНГОВОЙ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ

Рассмотрена эксплуатация нефтяных скважин с применением штанговых глубинных насосов. Известно, что состав и свойства перекачиваемой продукции, существенно влияют на рабочие параметры насосного оборудования, приводят к повышению энергетических затрат на подъем продукции, срыву подачи, вибрации и другим техническим проблемам. Продукцией добывающих скважин является смесь нефти, воды и газа. Изменение пластовых условий (давление и температура) вдоль скважины приводит к изменению объемной доли свободного/растворенного газа в нефти и физических свойств газожидкостной смеси. Проведен обзор промышленных реологических показателей водонефтяной смеси при механизированной добыче нефти. Анализ показал, что изменение объемной концентрации воды в нефти в диапазоне 50–80 % способствует изменению реологических характеристик смеси и приводит к повышению вязкости. Принято допущение, что нелинейную вязкую модель водонефтяной эмульсии типа Гершеля-Балкли можно описать обобщенной ньютоновской моделью с введением эффективной вязкости. Для исследования состава и свойств нефтяной продукции на эффективность работы штанговой насосной установки рассмотрены следующие взаимосвязанные задачи. Первая – определены зависимости изменения гидродинамических характеристик нефтегазового потока в скважине и рекомендуемое место установки насоса. На принятые условия на приеме насоса определяются режимные параметры работы штангового насоса. Для выбранной конструкции колонны штанг определяются расчетные напряжения в точке подвеса штанг – проверка обеспечения прочности. Расчет основных энергетических показателей всей насосной установки. Решение этих задач выполнено с помощью программного комплекса. В работе усовершенствована методика определения эффективной вязкости с учетом реологии промышленных данных. В работе проведено исследование изменения объемной доли свободного газа и воды в нефтегазовой продукции на глубину установки насоса, динамический уровень, давления в насосе, режимные параметры насоса. Представлены результаты анализа изменения обводненности нефтяной продукции на параметры всей насосной установки.

Ключевые слова: скважина, насос, колонна штанг, реологика, неньютоновская жидкость, газожидкостная смесь, свободный и растворенный газ, объемная фаза, давление насыщения, вязкость эффективная, коэффициент полезного действия.

N. SHEVCHENKO, N. FATIEIEVA, V. IVASHCHENKO, O. FATYEV

THE INFLUENCE OF THE COMPOSITION AND RHEOLOGY OF OIL PRODUCTS ON THE OPERATION OF THE ROD PUMP UNIT

The exploitation of oil wells using sucker rod pumps is considered. It is known that the composition and properties of pumping products significantly affect the operating parameters of pumping equipment, lead to an increase in energy costs for lifting products, disruption of supply, vibration and other technical problems. Production wells produce a mixture of oil, water and gas. A change in reservoir conditions (pressure and temperature) along the well leads to a change in the volume fraction of free/dissolved gas in oil and the physical properties of the gas-liquid mixture. A review of industrial rheological parameters of a water-oil mixture in mechanized oil production is carried out. The analysis showed that a change in the volumetric concentration of water in oil in the range of 50–80 % contributes to a change in the rheological characteristics of the mixture and leads to an increase in viscosity. It is assumed that a nonlinear viscous model of a water-oil emulsion of the Herschel-Bulkley type can be described by a generalized Newtonian model with the introduction of effective viscosity. To study the composition and properties of oil products for the efficiency of the sucker rod pumping unit, the following interrelated tasks are considered. First, the dependences of changes in the hydrodynamic characteristics of the oil and gas flow in the well and the recommended place for the pump installation are determined. On the accepted conditions at the pump intake, the operating parameters of the sucker rod pump are determined. For the selected design of the rod string, the design stresses at the suspension point of the rods are determined – checking the strength. The calculation of the main energy indicators of the entire pumping unit was carried out. The solution of these tasks was carried out using the software package. The work has improved the method for determining the effective viscosity, taking into account the rheology of the field data. In the work, the study of the change in the volume fraction of free gas and the parameter of water cut of oil and gas products

© Н. Г. Шевченко, Н. М. Фатєєва, В. Ю. Івашченко, О. М. Фатєєв, 2021

at the depth of the pump installation, dynamic level, pressure in the pump, operating parameters of the pump was carried out. The results of the analysis of changes in water cut of oil products on the parameters of the entire pumping unit are presented.

Keywords: well, pump, rod string, rheology, non-Newtonian fluid, gas-liquid mixture, free and dissolved gas, bulk phase, saturation pressure, effective viscosity, efficiency.

Вступ. Аналіз стану видобутку нафти і газоконденсату на промислах України показав, що експлуатація малодобітних свердловин більш ефективна із застосуванням штангових глибоких насосів (ШГН). В останні роки значно ускладнилися умови експлуатації заглибного насосного обладнання – збільшилася глибина установки насоса, знижається динамічний рівень, падає тиск на прийомі, розширився діапазон в'язкості пластової рідини; збільшилися об'ємні частки води, газу, піску, смол і парафіну у нафтовій продукції. Склад і властивості середовищ, що перекачуються, істотно впливають на робочі параметри насосного обладнання, приводять до підвищення енергетичних витрат на підйом продукції, зриву подачі, зношування елементів насоса, вібраціям та іншим технічним проблемам [1–3].

Правильний вибір основного обладнання насосної установки та режиму роботи до умов експлуатації свердловини гарантує надійність і ефективність роботи усієї установки. Нині актуальним напрямом є рішення практичних задач в складних технічних об'єктах з урахуванням реальних характеристик середовища: газорідні суміші (ГРС) та неньютонівські рідини (зокрема, водонафтові емульсії). На рис. 1 надана принципова схема установки ШГН та основні позначення.

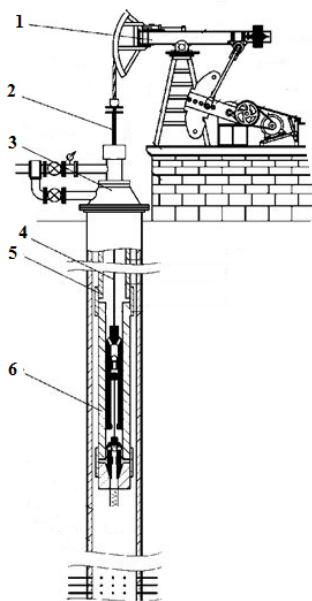


Рис. 1. Принципова схема ШГН:

1 – верстат-качалка; 2 – полірований шток; 3 – устьове обладнання; 4 – колона штанг; 5 – насосно-компресорні труби (НКТ); 6 – насос

Інформаційний огляд. Загалом, всі чинники, що впливають на ефективність роботи заглибного насоса умовно можна розділити на основні групи [4–6]: конструкція свердловини (кривизна і діаметр), конструкція насоса (виконання основних деталей і вузлів), глибина підвіски (тиск на прийомі насоса),

властивості нафтової продукції (нафта, вода, газ, механічні домішки, наявність парафіну і солей).

У числі головних проблем, що виникають при експлуатації свердловинних штангових установок є обриви колони штанг (до 30 %), відмови НКТ та насосів (15 % та 50 %, відносно). Зазвичай розглядають два типи відмов: конструктивні відмови (поломка) та технологічні або експлуатаційні. До другого типу відмов відноситься заміна працездатного насоса на новий через зміну глибини установки насоса, оптимізації режиму, зміна пропускної здатності, ревізії заглибного обладнання тощо.

У роботах [7, 8] описано динамічні навантаження, що діють на деталі вузлів ШГН впродовж робочого циклу при ході всмоктування та нагнітання. Розглянуто вплив сил тертя плунжера о циліндр, а також вплив гідродинамічних сил, що виникають при переміщенні плунжера у кільцевому просторі рідини.

У роботах [9–12] було встановлено, що при роботі заглибних насосів у свердловинах зміна об'ємної концентрації води в нафті сприяє утворенню водонафтових емульсій (ВНЕ) з різними реологічними характеристиками. При аналізі промислових даних встановлена кореляція показників аварійності штангових насосів зі змінами структур дисперсної фази ВНЕ. Найбільш критичним діапазоном обводнення нафти є 40–70 %, коли в'язкість емульсії різко збільшується у декілька разів – рис. 2.

Зміна в'язкості та структури нафтової продукції у свердловині в першу чергу впливає на роботу всієї насосної штангової установки: підвищуються амплітудні навантаження на колону штанг, збільшуються гідравлічні тертя штанг при ході їх вниз нерідко до значення ваги колони штанг, що призводить до зависання штангової колони.

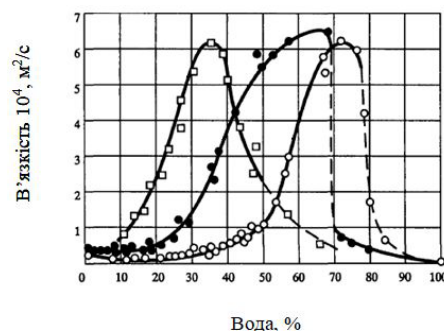


Рис. 2. Залежності ефективної в'язкості ВНЕ від об'ємної долі води у нафтовій продукції [9]

Аналіз впливу газу на роботу штангового насоса показав, що потрапляння в насос плунжерного типу вільного газу з рідиною призводить до істотного зменшення подачі рідини, що характеризується коефіцієнтом наповнення [13, 14]. У роботі [15] відзначається, щоб точно визначити умови в яких працює насос, необхідно наряду з даними,

отриманими від датчиків рівня, датчиків потужності електродвигуна використовувати динамограму насоса, яка вказує відсоткове наповнення насоса рідиною.

Для вибору режиму роботи насосного агрегату на реальні умови експлуатації, виникає необхідність проведення дуже великого об'єму розрахунків: визначення гідродинамічних характеристик нафтогазового потоку, місця встановлення насоса у свердловині з урахуванням об'ємної частки вільного/розчиненого газу на прийомі; робочих параметрів штангового насоса; вибір та розрахунки на міцність колони штанг; визначення показників ефективності роботи всієї насосної установки та інші. Закордонні програмні продукти в області підбору свердловинних насосів – це розробки компанії «REDA», програмне забезпечення «WellFlo», «SubPUMP», «NovometSel-Pro» та інші.

У роботі [16] надано принципи побудови моделі свердловинної штангової насосної установки для середовища Maplesoft MapleSim 7. На кафедрі «Гідравлічні машини» НТУ ХПІ (м. Харків) створена програма «PVT-Well-Pump» [17]. У роботі [18] авторами надано результати верифікації – порівняння розрахункових гідродинамічних параметрів за програмою з промисловими даними родовища НГВУ «Охтирканафтогаз».

Метою даної роботи є прогнозування та дослідження режиму роботи насосного обладнання для реальних умов експлуатації нафтогазових свердловин. Чисельні розрахунки в системі «пласт-свердловина-насос» пов'язані з виконанням трудомістких та громіздких обчислень та здійснюються за допомоги ЕОМ. У роботі удосконалена методика визначення робочих характеристик штангового насоса з урахуванням промислових даних для водо- нафто- газової суміші. Нелінійна в'язка модель рідини ВНЕ типу Гершеля-Балклі описується узагальненою ньютонівською моделлю з введенням ефективної в'язкості.

Математична модель (ММ) та її чисельна реалізація. При описі загальної роботи системи «свердловина-насос-НКТ» необхідно враховувати спільну роботу основних її елементів.

Робота ліфта нафтової продукції в свердловині і НКТ (процес розгазування потоку, зміна PVT характеристик ГРС, втрати напору):

$$\frac{dP}{dL} = \rho_{грс} \cdot g \cdot \cos \alpha + \frac{d}{dL} \left[(1 - \beta_r) \rho_p v_p^2 + \beta_r \rho_r v_r^2 \right] + \frac{\lambda}{2D} \left[(1 - \beta_r) \rho_p v_p^2 + \beta_r \rho_r v_r^2 \right],$$

де λ – коефіцієнт гідравлічного опору, який в залежності від структурної форми потоку визначають по емпіричним або напівемпіричним залежностям; β_r – об'ємна доля фази (газу), д. од; v_p , v_r – швидкості рідкої та газової фаз суміші; $\rho_{грс}$ – щільність ГРС.

Подача штангового насоса на реальні умови експлуатації є залежністю наступних параметрів:

$$Q_n = f(L_{уст}, P_{пр}, G_0, B, \mu_{грс}, \Delta P_n, q_T, D_c, \delta, k_{под}, \lambda_n),$$

де Q – подача насоса; $L_{уст}$ – глибина установки насоса; $P_{пр}$ – тиск на прийомі насоса; G_0 , B , $\mu_{грс}$ – газовий фактор, вміст води у продукції та в'язкість нафтової суміші; ΔP_n – перепад тиску; q_T – теоретична подача насоса; D_c , δ – діаметр та зазор пари «плунжер-циліндр»; $k_{под}$, λ_n – коефіцієнт подачі насоса, втрати ходу штока поршня.

Досвід експлуатації насосних установок показує, що руйнування штангових колон зазвичай зумовлено зносом металу, викликаного тривалою дією циклічних змінних навантажень. Тому для штангових насосів у ММ необхідно включити залежності для перевірки забезпечення втомної міцності обраної конструкції штанг в точці їх підвісу [13]:

$$\sigma_{прі} \leq [\sigma_{пр}],$$

де $\sigma_{прі}$ – напруги в будь-якому довільному перерізі штанг, МПа; $[\sigma_{пр}]$ – гранично допустиме значення напруги для обраного матеріалу штанг, МПа.

Наведена напруга в точці підвісу штанг $\sigma_{пр}$ розраховується за формулою І. О. Одінга:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{\sigma_a \cdot \sigma_{max}},$$

де σ_a – амплітудні напруги циклу, МПа; $\sigma_a = 0,5(\sigma_{max} - \sigma_{min})$; σ_{max} , σ_{min} – максимальне і мінімальне значення напруги циклу, МПа.

Максимальну та мінімальну напругу циклу визначають за формулами:

$$\sigma_{max} = P_{max} / f_{шт}; \quad \sigma_{min} = P_{min} / f_{шт},$$

де P_{max} , P_{min} – максимальне та мінімальне навантаження в точці підвісу штанг, Па; $f_{шт}$ – площа штока, м².

Для розрахунку значень P_{max} , P_{min} у роботі використовуються формули А. Вірновського та А. Адоніна [13]. При роботі насоса колони штанг і труби періодично піддаються пружним деформаціям від ваги рідини, що діє на плунжер. Крім того, на колону штанг діють динамічні навантаження і сили тертя, внаслідок чого довжина ходу плунжера може істотно відрізнятись від довжини ходу полірованого штока. Проведено розрахунок втрати ходу плунжера і довжини ходу полірованого штока.

Опис основних програмних модулів, що використовуються у чисельній реалізації.

Модуль № 1 – служить для визначення розподілу тиску й фізичних характеристик газорідинної суміші при різних термодинамічних умовах у підйомних трубах (свердловина та НКТ); визначення глибини установки насоса у свердловині при заданому значенні об'ємної частки вільного газу на прийомі у насос [18].

Модуль № 1 розроблено в інтегрованому середовищі розробки програмного забезпечення DELPHI з автономними додатками та з графічним інтерфейсом. Програмний модуль містить кореляції співвідношення тиску, обсягу й температури для розрахунків характеристик флюїду, що використовують відомі загальні методики А. П. Сілаш, М. Пирвердяна та Ш. Гіматудинова та

залежності визначення ефективної в'язкості ВНЕ, згідно [13, 19, 20].

Модуль № 2 – служить для розрахунків основних параметрів плунжерного насоса: втрати тиску в клапанах; виток в парі плунжер-циліндр; коефіцієнту наповнення насоса та режимних параметрів (хід поршня та число хитань).

Модуль № 3 – служить для розрахунків основних параметрів роботи колони штанг. Це перевірка забезпечення втомної міцності в точці підвісу колони штанг; визначення довжин і діаметрів рівномірної ступеневої колони штанг; розрахунки максимального й мінімального навантаження в точці підвісу штанг; визначення напруги в штангах; визначення втрат ходу полірованого штока насоса.

Модуль № 4 – служить для визначення енергетичних параметрів роботи ШГН. У модулях № 2–№ 4 використовуються теоретичні методи дослідження, що засновані на промислових даних для розрахунків характеристик штангової насосної установки, згідно [13]. У даній роботі удосконалена методика визначення ефективної в'язкості ВНЕ за промисловими даними.

Дослідження та результати розрахунків. Для проведення дослідження умов роботи свердловин на робочі та енергетичні показники ШГН обрані промислові дані НГВУ "Охтирканафтогаз". На рис. 3 показано розподіл тиску в свердловині родовища Бугри при процентній частці води 10 %, 56,3 % і 95 %. Розрахунки проведено за допомогою – *Модуля № 1*. Проведено порівняння розрахункових значень динамічного рівня рідини на задані умови експлуатації з промисловими даними родовища Бугри НГВУ «Охтирканафтогаз». Похибка обчислення динамічного рівня рідини у свердловині досягає не більш 8,6 % [18].

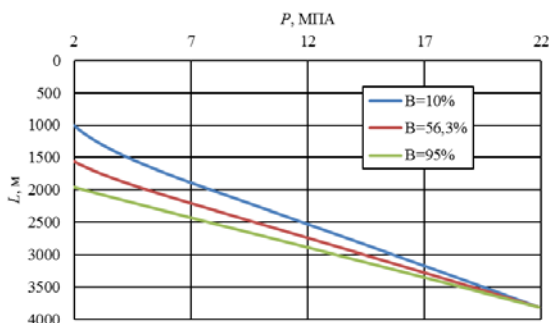


Рис. 3. Розподіл тиску в свердловині при різних значеннях обводнення продукції B

Визначення глибини установки насоса при зміні об'ємної долі газу та води у нафтогазовій продукції.

Основні дані: відстань до кровлі пласта $H_{св} = 3800$ м, запланований дебіт рідини $Q_p = 25$ м³/добу, газовий фактор $Г_о = 60$ м³/м³, тиск насичення нафти газом $P_{нас} = 22$ МПа, продуктивність пласту $K_{пл} = 8,8$ м³/доба/МПа та інші.

На рис. 4 наведено фрагмент графічного інтерфейсу *Модуля № 1*. Параметр обводнення продукції $B = 0$.

Для заданого значення об'ємної частки вільного

газу у ГРС на прийомі у насос – 10 % ($\beta_{г.пр} = 0,1$) було визначено: розподіл тиску вздовж підйомних труб – свердловини та НКТ, місце установки насоса (крапка A), глибина спуска насоса, динамічний рівень рідини, тиск та властивості ГРС на прийомі насоса.

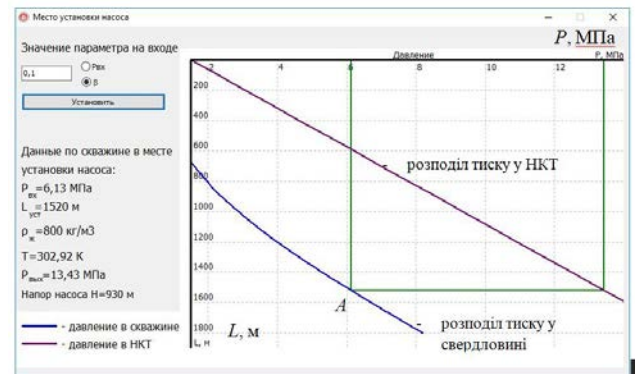


Рис. 4. Фрагмент програми *Модуля № 1*

На рис. 5 наведені узагальнені залежності: тиск на прийомі насоса $P_{вх}$ та глибина установки $L_{уст}$ від об'ємної частки вільного газу ($\beta_{г.пр}$). Розрахунки наведено для значень обводнення нафтової продукції $B = 0$ % (рис. 5, а) та 90 % (рис 5, б).

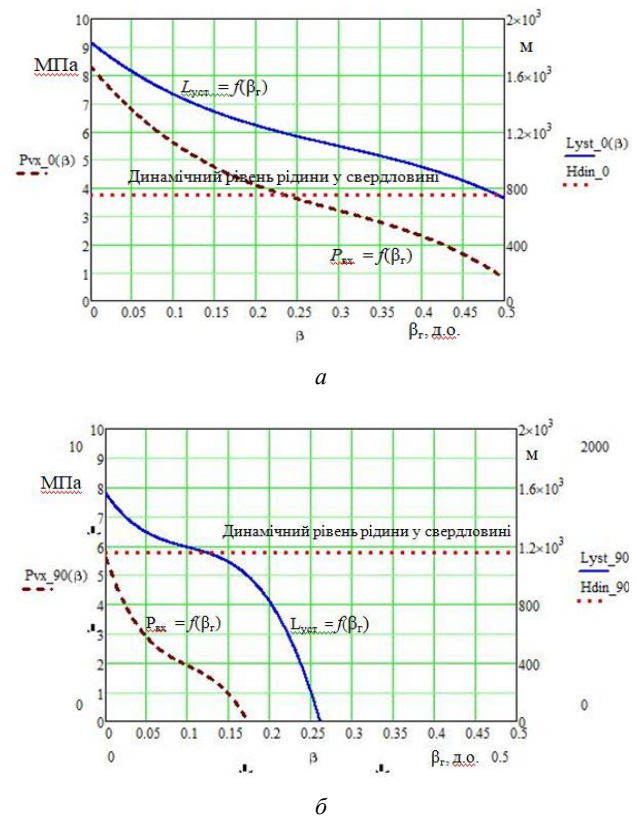


Рис. 5. Розрахункові залежності тиску $P_{вх}$ та глибини установки насоса $L_{уст}$ від $(\beta_{г.пр})$

У табл. 1 надано зведені результати розрахунків при забезпеченні умови 10 % вільного газу на прийомі насоса. При виборі глибини установки насоса треба враховувати динамічний рівень рідини у свердловині – $L_{уст} = H_{дин} + \min 50$ м.

Показано, що зміна об'ємної частки води B у

нафтогазовій продукції впливає на місце установки насоса. Так, при збільшенні обводнення продукції від $B = 0\%$ до $B = 90\%$ для забезпечення рекомендованого значення 10% вільного газу на прийомі у насос, глибина установки насоса буде зменшуватися.

Таблиця 1 – Робочі параметри при 10% вільного газу на прийомі насоса

Вміст води $B, \%$	Динамічний рівень, м	Тиск на прийомі насоса, МПа	$\rho_{см}, \text{кг/м}^3$	Глибина установки насоса	Дебіт ГРС, м^3 на добу
0	750	5,6	724	1520	30,26
40	950	4,8	823	1400	28,63
70	1080	3,6	905	1321	27,26
90	1150	1,9	959	1188	26,5

Глибина занурення насоса під рівень рідини залежить від вмісту газу й води у нафті. Збільшення глибини занурення насоса приводить до зменшення кількості газу, що попадає в насос разом з рідиною. Однак з підвищенням глибини занурення збільшуються пружні подовження насосних штанг і труб. У результаті цього настає момент, коли подальше збільшення глибини занурення насоса спричиняє зниження коефіцієнта подачі й продуктивності насоса. Тому в таких випадках потрібно визначити з обліком обох факторів (впливу газу й подовження насосних штанг і труб) раціональну глибину занурення насоса, при якій виходить найбільш високий коефіцієнт подачі.

Подальші розрахунки проведено при максимально припустимому значенні об'ємного вмісту вільного газу на прийомі насоса – 25% . При менших значеннях глибини установки насоса (що економічно вигідно) значення вільного газу на прийомі насоса збільшується – тому потрібно установити газосепаратор.

Вплив зміни структурної в'язкості водонафтової продукції на параметри ШГН. Аналіз промислових реологічних характеристик пластової продукції при різних значеннях об'ємної частки води показав, що ВНЕ відноситься до неньютонівської рідини типу Гершеля-Балклі.

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n,$$

де τ_0 – межа текучості при швидкості зсуву $\dot{\gamma}$, що дорівнює 0; K – міра консистенції рідини, Па·с; n – показник, що характеризує ступінь відхилення неньютонівської рідини від ньютонівської.

У табл. 2 представлені коефіцієнти полінома апроксимації реологічної характеристики пластової рідини при різних значеннях об'ємної частки води B .

У роботі для опису гідродинамічних процесів неньютонівських рідин прийнято допущення – реологія робочого середовища описується узагальненою ньютонівською моделлю. Для узагальненої ньютонівської моделі введена ефективна в'язкість, що залежить від швидкості деформації середовища [9, 12]. Апроксимуючий вираз для визначення

ефективної в'язкості для рідини типу Гершеля-Балклі має вид:

$$\mu_{ef} = \frac{K \cdot \dot{\gamma}^n + \tau_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{m \cdot \dot{\gamma}}{\Gamma}\right) \right)}{\dot{\gamma}},$$

де m – експонентний множник (приймають від 500); Γ – характерна швидкість зсуву.

Таблиця 2 – Коефіцієнти полінома апроксимації не ньютонівської рідини типу Гершеля-Балклі [12]

$B, \%$	K	n	τ_0
20	0,02	1	0
30	0,25	0,75	0
45	1,8	0,53	0
60	5	0,5	0
70	9	0,48	3
77	10	0,4	10
83	0,6	0,7	7
95	10^{-6}	1	0

При виконанні дослідницької частини роботи було заплановано визначити вплив об'ємної частки води B (0; 0,4; 0,7; 0,9) при незмінній глибини установки ШГН $L_{уст} = 1200$ м на робочі параметри плунжерного насоса та загальні енергетичні характеристики ШГН. Газовий фактор нафтової продукції при дослідженні – незмінний $\Gamma_0 = 60 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Розрахунки робочих параметрів плунжерного насоса, розрахунки на міцність колони штанг; визначення енергетичних характеристик насосної установки на задані пластові умови проведено за допомогою модулів № 2–№ 4 за удосконаленою методикою визначення ефективної в'язкості ВНЕ за промисловими даними.

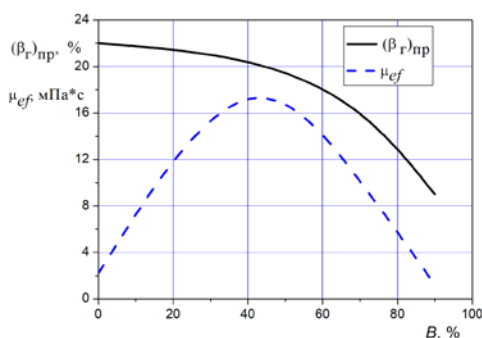
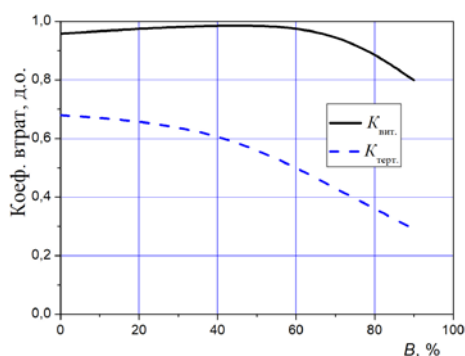
У роботі проведено енергетичні розрахунки роботи всієї установки ШГН. Потужність, споживана двигуном верстата-качалки, витрачається на виконання корисної роботи з підйому рідини на поверхню й на покриття втрат потужності в елементах ШГН. Визначимо витрати потужності в підземній частині установки: втрати потужності на витоку; втрати потужності в клапанних вузлах; втрати потужності на подолання механічного та гідромеханічного тертя штанг, а також тертя плунжера в циліндрі, згідно [13]. На рис. 6, 7 та у табл. 3 надано результати розрахунків.

Висновки. Для проведення дослідницьких розрахунків у роботі використовуються дані НГВУ "Охтирканафтогаз".

У роботі удосконалена методика визначення робочих характеристик штангового насоса з урахуванням реальних характеристик середовища: газорідні суміші та неньютонівські рідини (зокрема, водонафтові емульсії). У роботі проведено чисельні дослідження для умов експлуатації свердловини для критичних значень обводнення нафти від 40% до 90% ; дослідження впливу ефективної в'язкості водонафтової емульсії на експлуатаційні параметри плунжерного насосу; визначення статичних та

Таблиця 3 – Зведені результати розрахунків параметрів насосної установки

Основні параметри	Значення			
	0	40	70	90
Об'ємна доля води у продукції B , %	0	40	70	90
Глибина установки насоса $L_{уст}$, м	1200			
Об'ємна доля вільного газу на прийомі насоса $(\beta_r)_{пр}$, %	22	21	17	9
В'язкість ефективна на прийомі $(\mu_{ef})_{пр}$, мПа·с	2,2	22,4	10,13	1,2
Щільність суміші на прийомі $(\rho_{грс})_{пр}$, кг/м ³	741	885	993	1065
Тиск насичення з урахуванням сепарації перед насосом $P'_{нас}$, МПа	5,48	4,86	4,26	3,6
Тиск в циліндрі насоса при всмоктуванні $p_{вс}$, МПа	3,88	3,17	2,57	1,96
Тиск в циліндрі насоса при нагнітанні $p_{нагн}$, МПа	10,3	10,43	11,46	14,0
Перепад тиску, створюваний насосом $(\Delta p)_{нас}$, МПа	6,3	7,23	8,8	12,1
Коефіцієнт наповнення насоса $k_{нап}$, д.о.	0,786	0,811	0,826	0,93
Втрата ходу полірованого штоку $\lambda_{ш}$, м	0,132	0,183	0,21	0,2
Коефіцієнт подачі насоса $k_{под}$, д.о.	0,681	0,72	0,74	0,82
Максимальне навантаження у точці підвісу колони штанг (КШ) P_{max} , кН	47	48	48,7	49
Розрахункове напруження КШ $\sigma_{пр}$, МПа	50	52	53	53,5
Крутий момент на кривошипному валу редуктора $M_{кр}$, кН·м	13,31	14,0	14,4	14,45
Коефіцієнт втрат потужності на витоки $K_{вит}$, д.о.	0,958	0,992	0,98	0,799
Коефіцієнт втрат потужності на тертя $K_{терт}$, д.о.	0,68	0,64	0,43	0,29
ККД у підземній частині ШГН $\eta_{підз}$, д.о.	0,579	0,608	0,68	0,658
Загальний ККД установки ШГН $\eta_{заг}$, %	38,5	40,4	45,5	43,7
Потужність, що затрачена на підйом рідини, кВт	3,94	5,2	5,3	7,2

Рис. 6. Залежність зміни фізичних властивостей на прийомі насоса ($L_{уст} = 1200$ м, $\Gamma_0 = 60$ м³/м³) від обводнення продукції B Рис. 7. Залежність коефіцієнтів втрат від обводнення продукції B ($L_{уст} = 1200$ м, $\Gamma_0 = 60$ м³/м³)

динамічних навантажень, що діють на колону штанг; втрати довжини ходу плунжера; визначення енергетичних характеристик всієї насосної установки.

Встановлено, що для обраної конструкції та матеріалу штанг АХ із легованої сталі 20НМ (допустима напруга $[\sigma]_{доп} = 90$ МПа) виконуються умови забезпечення втомної міцності колони насосних

штанг для всього діапазону обводнення нафти.

Облік нелінійності реологічної структури водонафтової емульсії та її в'язкості показав, що втрати потужності у критичному діапазоні обводнення нафти 40–70 % у штанговому насосі НСВ1-38 збільшуються на 20–30 %.

Встановлено, що при збільшенні об'ємної доли води у нафтогазовій продукції вплив газу зменшується. Так, при незмінній глибині установки насоса у свердловині – $L_{уст} = 1200$ м, спостерігається зменшення об'ємної доли вільного газу на прийомі насоса, $(\beta_r)_{пр}$ – з 22 % до 7 %. Потужність, яка витрачена на підйом рідини, збільшується. Присутність газу на вході в насос грає негативну роль, знижуючи коефіцієнт наповнення насоса $\eta_{нап}$. Але з іншого боку, газ, який потрапив в насосно-компресорні труби, створює «газліфтний ефект».

За результатами розрахунків у табл. 3 бачимо, що зміна об'ємних часток води та газу у нафтовій продукції неоднозначно впливає на енергетичні характеристики всієї установки ШГН. Тому для підвищення ефективності проектних робіт з вибору оптимального режиму роботи насосного обладнання у свердловинах з ускладненими умовами і забезпечення надійності роботи, необхідно проводити чисельні експерименти за допомогою комплексу прикладних програм.

Список літератури

1. Копей Б. В., Білик Н. Д. Аналіз причин обриву насосних штанг в експлуатаційних умовах України та США. *Нафта і газ. Наука. Освіта. Виробництво: шляхи інтеграції та інноваційного розвитку: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції*. Дрогобич: ТзОВ «Трек-ЛТД», 2019. С. 47–53.
2. Савчук В. В. Видобування нафти з високим вмістом піску, смол

і парафіну із застосуванням спеціальних конструкцій насосів. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2016. № 1. С. 20–28.

3. Валиахметов Р. Всему свое место. Применение ШГН остается эффективным при определенных условиях. *Нефтегазовая Вертикаль*. 2017. № 9. С. 78–79.
4. Мищенко И. Т. *Скважинная добыча нефти*. Москва: Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губкина, 2015. 448 с.
5. Персиянцев М. Н. *Добыча нефти в осложненных условиях*. Москва: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. 653 с.
6. Дроздов А. Н. *Технология и техника добычи нефти погружными насосами в осложненных условиях*. Москва: МАКС Пресс, 2008. 615 с.
7. Наследников С. В., Тимків Д. Ф., Онацко Р. Г. Аналіз структурної схеми устаткування для видобування нафти і її кінематика. *Нафтогазопромислове обладнання. Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2012. № 1 (31). URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvif_2012_1_11 (дата звернення: 30.03.2021).
8. Ямалие В. У., Ишемгузин И. Е., Латыпов Б. М. Оценка силы трения плунжера о цилиндр штангового скважинного насоса при проектировании колонны штанг. *Изв. Самарского научного центра Российской АН*. 2017. Т. 19, № 1. С. 70–75.
9. Уразаков К. Р., Богомольный Е. И., Сейтпагамбетов Ж. С. *Насосная добыча высоковязкой нефти из наклонных и обводненных скважин*. Москва: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. 303 с.
10. Романова Н. А., Алиев З. З., Буранчин А. Р. Вязкость водонефтегазовой эмульсии и ее влияние на эффективность работы глубиннонасосных установок. *Нефтегазовое дело*. 2009. Т. 7, № 1. С. 43–48.
11. Евдокимов И. Н., Лосев А. П. Корреляция отказов скважинных насосов с изменениями структур дисперсной фазы добываемых водонефтяных эмульсий. *Бурение и нефть*. 2013. № 7–8. С. 40–42. URL: http://eee.gubkin.ru/PUBLICAT_RUS_files/PREPR_BUR_NEFT_7_8_2013.pdf (дата обращения: 25.04.2021).
12. Шевченко Н. Г., Шудрик О. Л., Коваль О. С., Дорошенко О. В. Врахування реологічних властивостей водонафтової емульсії на робочі характеристики відцентрового насоса. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2018. No. 17 (1293). P. 58–65.
13. Гиматудинов Ш. К. *Справочное руководство по проектированию разработки и эксплуатации нефтяных месторождений. Добыча нефти*. Москва: Недра, 1983. 455 с.
14. Колесова С. Б., Насыров А. М., Полозов М. Б. Снижение влияния свободного газа на работу насосного оборудования. *Экспозиция Нефть Газ*. 2018. № 6 (66). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/snizhenie-vliyaniya-svobodnogo-gaza-narabotu-nasosnogo-oborudovaniya> (дата обращения: 02.04.2021).
15. МакКой Дж. Н. Как поддержать высокую эффективность добычи нефти при эксплуатации скважин штанговыми глубинными насосами. *Добыча*. 2014. № 10. С. 44–66. URL: https://rogtectmagazine.com/wp-content/uploads/2014/10/07_Maintenance.pdf (дата обращения: 05.04.2021).
16. Копей В. Б., Копей В. В., Кузьмін О. О. Принципи побудови моделі свердловинної штангової насосної установки для середовища Maplesoft MapleSim 7. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2017. № 2. С. 42–52. URL: <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/6568> (дата звернення: 10.04.2021).
17. Шевченко Н. Г., Шудрик О. Л. Свідчення про реєстрацію авторського права на твір № 74077, Україна. *Комп'ютерна програма «Програма моделювання сумісної роботи заглибного відцентрового насоса (ЕВН) та свердловини при видобутку нафти» («PVT-Well-pump»)*. 2017.
18. Шевченко Н. Г., Шудрик А. Л. Комплекс программ для расчета параметров работы штанговой насосной установки. *Вісник Нац. техн. ун-та «ХПІ»*. Сер.: *Енергетичні і теплотехнічні процеси і устаткування*. Харків: НТУ «ХПІ». 2014. № 1 (1044). С. 175–179.

19. Дуношкин И. И., Мищенко И. Т., Елисеєва Е. И. *Расчеты физико-химических свойств пластовой и промысловой нефти и воды*. Москва: Нефть и газ, 2004. 448 с.
20. Шевченко Н. Г., Шудрик О. Л. Програмний модуль прогнозування гідродинамічних характеристик газорідної суміші свердловини при механізованому видобутку нафти. *Вісник Нац. техн. ун-та «ХПІ»*. Сер.: *Математичне моделювання в техніці та технологіях*. Харків: НТУ «ХПІ», 2014. № 39 (1082). С. 190–197.

References (transliterated)

1. Kopey B. V., Bilyk N. D. Analiz prychnyn obryvu nasosnykh shtanh v ekspluatatsiynykh umovakh Ukrainy ta SshA [Analysis of the causes of breakage of pump rods in the operating conditions of Ukraine and the USA]. *Nafta i haz. Nauka. Osvita. Vyrobnystvo: shlyakhy intehratsiyi ta innovatsiynoho rozvytku: materialy vseukrayins'koyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi* [Oil and gas. Science. Education. Production: ways of integration and innovative development: materials of the all-Ukrainian scientific and technical conference]. Droboich, LLC "Trek-LTD" Publ., 2019, pp. 47–53.
2. Savchuk V. V. Vydobuvannya nafty z vysokym vmistom pisku, smol i parafinu iz zastosuvannam spetsial'nykh konstruktivnykh nasosiv [Extraction of oil with a high content of sand, resins and paraffin using special pump designs]. *Naukovyy visnyk Ivano-Frankivsk'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu* [Scientific Bulletin of the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas]. 2016, no 1, pp. 20–28.
3. Valiakmetov R. Vsemu svoje mesto. Primenenie ShGN ostaetsya effektivnym pri opredelennykh usloviyakh [Everything has its place. The use of sucker rod pumps remains effective under certain conditions]. *Neftegazovaya Vertikal'*. 2017, no 9, pp. 78–79.
4. Mishchenko I. T. *Skvazhinnaya dobycha nefiti* [Downhole oil production]. Moscow, Rossiyskiy gosudarstvennyy universitet nefiti i gaza im. I. M. Gubkina Publ., 2015. 448 p.
5. Persiyantsev M. N. *Dобыча нефти v oslozhnennykh usloviyakh* [Oil production in complicated conditions]. Moscow, ООО "Недра-Бизнесцентр" Publ., 2000. 653 p.
6. Drozdov A. N. *Tekhnologiya i tekhnika dobychi nefiti pogruzhnyimi nasosami v oslozhnennykh usloviyakh* [Technology and technique of oil production by submersible pumps in complicated conditions]. Moscow, MAKS Press Publ., 2008. 615 p.
7. Naslyednikov S. V., Tymkiv D. F., Onatsko R. H. Analiz strukturnoyi skhemy ustatkuvannya dlya vydobuvannya nafty i yiyi kinematyka [Analysis of the structural scheme of equipment for oil production and its kinematics]. *Naftohazopromyslove obladnannya. Naukovyy visnyk IFNTUNG* [Oil and gas equipment. Scientific Bulletin IFNTUNG]. 2012, no 1 (31). Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvif_2012_1_11 (accessed 30.03.2021).
8. Yamalie V. U., Ishemguzhin I. E., Latypov B. M. Otsenka sily treniya plunzhera o tsilindr shtangovogo skvazhinnogo nasosa pri proektirovani kolonny shtang [Estimation of the friction force of the plunger on the cylinder of a sucker rod pump in the design of a rod string]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy AN*. 2017, vol. 19, no. 1, pp. 70–75.
9. Urazakov K. R., Bogomol'nyy E. I., Seytpagambetov Zh. S. *Nasosnaya dobycha vysokovязкой нефти iz naklonnykh i obvodnennykh skvazhin* [Pumping production of high-viscosity oil from inclined and flooded wells]. Moscow, ООО "Недра-Бизнесцентр" Publ., 2003. 303 p.
10. Romanova N. A., Aliev Z. Z., Buranchin A. R. Vyazkost' vodoneftegazovoy emul'sii i ee vliyaniye na effektivnost' raboty glubinnonasosnykh ustanovok [Viscosity of water-oil-and-gas emulsion and its influence on the efficiency of deep pumping units]. *Neftegazovoe delo*. 2009, vol. 7, no. 1, pp. 43–48.
11. Evdokimov I. N., Losev A. P. Korrelyatsiya otkazov skvazhinnykh nasosov s izmeneniyami struktur dispersnoy fazy dobyvaemykh vodonefityanykh emul'siy [Correlation of borehole pump failures with changes in the structure of the dispersed phase of the produced oil-water emulsions]. *Burzenie i nefi'*. 2013, no. 7–8, pp. 40–42. Available at: http://eee.gubkin.ru/PUBLICAT_RUS_files/PREPR_BUR_NEFT_7_8_2013.pdf (accessed 25.04.2021).
12. Shevchenko N. H., Shudryk O. L., Koval' O. S., Doroshenko O. V.

- Vrakhuvannya reolohichnykh vlastyvostey vodonaftovoyi emul'siyi na robochi kharakterystyky vidtsentrovoho nasosa [Accounting rheology water-oilemulsion to performance of centrifugal pumps]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2018, no. 17 (1293), pp. 58–65.
13. Gimatudinov Sh. K. *Spravochnoe rukovodstvo po proektirovaniyu razrabotki i ekspluatatsii nefyanykh mestorozhdeniy. Dobycha nefi* [Reference guide for the design, development and operation of oil fields. Oil production]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 455 p.
 14. Kolesova S. B., Nasyrov A. M., Polozov M. B. Snizhenie vliyaniya svobodnogo gaza na rabotu nasosnogo oborudovaniya [Reducing the influence of free gas on the operation of pumping equipment]. *Ekspozitsiya Nefi' Gaz*. 2018, no. 6 (66). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/snizhenie-vliyaniya-svobodnogo-gaza-na-rabotu-nasosnogo-oborudovaniya> (accessed 02.04.2021).
 15. MakKoy Dzh. N. Kak podderzhat' vysokuyu effektivnost' dobychi nefi pri ekspluatatsii skvazhin shtangovymi glubinnymi nasosami [How to maintain high efficiency of oil production when operating wells with sucker rod pumps]. *Dobycha*. 2014, no. 10, pp. 44–66. Available at: https://rogtectmagazine.com/wp-content/uploads/2014/10/07_Maintenance.pdf (accessed 05.04.2021).
 16. Kopey V. B., Kopey B. V., Kuz'min O. O. Prynitsy pobudovy modeli sverdlovnnoyi shtanhovoyi nasosnoyi ustanovky dlya seredovyscha Maplesoft MapleSim 7 [Principles of construction of a model of downhole rod pump installation for Maplesoft MapleSim environment 7]. *Naukovyy visnyk Ivano-Frankivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu* [Scientific Bulletin of the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas]. 2017, no 2, pp. 42–52. Available at: <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/6568> (accessed 10.04.2021).
 17. Shevchenko N. H., Shudryk O. L. *Komp'yuterna prohrama "Prohrama modelyuvannya sumisnoyi roboty zahlybnoho vidtsentrovoho nasosa (EVN) ta sverdlovnny pry vydobutku nafty" ("PVT-Well-pump")* [Computer program "Program for modeling the joint operation of submersible centrifugal pump (ECCP) and wells for oil production" ("PVT-Well-pump")]. Certificate of copyright registration for the work Ukraine, no. 74077, 2017.
 18. Shevchenko N. G., Shudrik A. L. Kompleks programm dlya rascheta parametrov raboty shtangovoy nasosnoyi ustanovki [A set of programs for calculating the parameters of the sucker rod pumping unit]. *Visnyk Nats. tekhn. un-ta "KhPI". Seriya: Enerhetychni i teplotekhnichni protsesy i ustakuvannya* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy and heat engineering processes and equipment]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2014, no. 1 (1044), pp. 175–179.
 19. Dunyushkin I. I., Mishchenko I. T., Eliseeva E. I. *Raschety fiziko-khimicheskikh svoystv plastovoy i promyslovy nefi i vody* [Calculations of physical and chemical properties of reservoir and field oil and water]. Moscow, Nef' i gaz Publ., 2004. 448 p.
 20. Shevchenko N. H., Shudryk O. L. Prohramnyy modul' prohnozuvannya hidrodinamichnykh kharakterystyk hazoridynnoyi sumishi sverdlovnny pry mekhanizovanomu vydobutku nafty [Software module for forecasting the hydrodynamic characteristics of the gas-liquid mixture of wells in mechanized oil production]. *Visnyk Nats. tekhn. un-ta "KhPI". Seriya: Matematychno modelyuvannya v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Mathematical modeling in engineering and technology]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2014, no. 39 (1082), pp. 190–197.

Надійшла (received) 08.04.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шевченко Наталія Григорівна (Шевченко Наталья Григорьевна, Shevchenko Nataliya) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6877-7428>; e-mail: shevng@ukr.net

Фатєєва Надія Миколаївна (Фатеева Надежда Николаевна, Fatieieva Nadiia) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6955-5301>; e-mail: nadin_yak@ukr.net

Іващенко Владислава Юрївна (Иващенко Владислава Юрьевна, Ivashchenko Vladyslava) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістр; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2931-7506>; e-mail: vlada.ivashchenko99@gmail.com

Фатєєв Олександр Миколайович (Фатеев Александр Николаевич, Fatyuev Oleksandr) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9212-4507>; e-mail: fatyan1@ukr.net