

**Н. Г. ШЕВЧЕНКО, Н. М. ФАТЄЄВА, А. О. ЛАЗАРЕНКО**

## **ВПЛИВ ГЛИБИНИ СПУСКУ НАСОСА У СВЕРДЛОВИНУ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ГЛИБИННОЇ ШТАНГОВОЇ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ**

Розглянуто підвищення ефективності проектних робіт глибинної штангової насосної установки за допомогою розробленого комплексу програм. Представлено п'ять програмних модулів. Проведена адаптація програм для реальних умов експлуатації свердловини. У результаті чисельного моделювання отримані: фізичні властивості газорідної суміші на прийманні насоса, рекомендована глибина його спуска, гідродинамічні характеристики плунжерного насоса. Обрана й розрахована конструкція штангової колони, енергетичні показники роботи насосної установки, коефіцієнт експлуатації, імовірність обриву штанг, витрати на підйом нафтової продукції зі свердловини. Досліджено вплив глибини спуска насоса у свердловину на показники роботи установки. Комплекс програм використовується в навчальному процесі для науково-дослідної роботи студентів.

**Ключові слова:** глибинна штангова насосна установка, колона штанг, плунжерний насос, верстат-качалка, прикладні програми, газорідна суміш, дебіт, втомна міцність.

**Вступ.** Заданий відбір нафтової продукції може бути забезпечений при різних режимах роботи насосної установки й відповідно різними варіантами компоновки встаткування. Для ефективної експлуатації глибинного штангового насоса установки (ГШНУ) необхідно розв'язувати декілька важливих задач – забезпечення запланованого дебіту свердловини, достатню надійність роботи штангової насоса та виконання техніко-економічних вимог.

Особливу складність при розв'язанні цієї задачі викликає створення математичної моделі руху газорідної суміші (ГРС) продукції в підйомнику свердловини й штанговому насосі плунжерного типу, прогнозування подачі штангової установки та вибір режиму відкачки продукції із свердловини. Для забезпечення надійної роботи штангового насоса в ускладнених умовах необхідно для обраної конструкції штангової колони та обраного режиму роботи перевіряти забезпечення руху штанг вниз без зависання та втомної міцності штанг в точці підвісу.

При проектуванні ГШНУ вибирають: типорозміри верстата-качалки й електродвигуна, тип і діаметр свердловинного насоса, конструкцію колони піднімальних труб. Розраховують наступні параметри: глибину спуска насоса, режими відкачки, тобто довжину ходу й число хитань, конструкцію штангової колони, енергетичні показники роботи насосної установки, коефіцієнт експлуатації та міжремонтний період роботи, затрати на підйом нафтової продукції із свердловини.

Для проведення чисельних досліджень впливу глибини спуска насоса у свердловині, конструктивних параметрів насоса та колони штанг на технічні, енергетичні та експлуатаційні характеристики ГШНУ треба виконувати великий обсяг розрахункових робіт. У роботі [1] наведено опис комплексу пакету програм, що розроблений на кафедрі гідромашин НТУ «ХП».

Глибина занурення насоса під рівень рідини залежить від вмісту газу й води у нафті. Збільшення глибини занурення насоса під динамічний рівень приводить до зменшення кількості газу, що попадає в насос разом з рідиною. Однак з підвищенням глибини занурення насоса під динамічний рівень збільшуються пружні подовження насосних штанг і труб. Втрати ходу плунжера від пружних подовжень колони штанг

не повинні бути великими, так як це призводить до зниження продуктивності і к.к.д установки. Також необхідно враховувати, що колона штанг (КШ) для обраної глибини спуска насоса, повинна задовольняти умові достатньої втомної міцності. Вага КШ повинна бути по можливості мінімальна, вартість колони не повинна бути завищеною, що слід враховувати при виборі марки штанг.

Деякі з цих положень суперечать один одному. Тому в таких випадках потрібно визначити раціональну глибину занурення насоса, при якій виходить найбільш високі показники насоса при забезпеченні безаварійної роботи всієї установки ГШН із запланованою продуктивністю і при мінімальних витратах.

Враховуючи викладене вище, можна зробити висновок, що чисельне дослідження глибини установки насоса із застосуванням комплексу програм, є актуальною роботою.

**Мета роботи** – підвищення ефективності проектних робіт ГШНУ за допомогою розробленого комплексу програм, адаптування програм для реальних умов експлуатації свердловини. Проведення чисельних досліджень й вибір обладнання ГШН, що забезпечують запланований дебіт свердловини, достатню надійність його роботи та виконання техніко-економічних вимог.

У роботі використовується методика Сілаш А. П [2] для розрахунків параметрів газорідної суміші та тиску в свердловині, а також робота Гіматудинова Ш. [3] для вибору й розрахунків штангового насоса й насосних штанг. Обґрунтовано великий обсяг довідкового матеріалу, розрахункових схем і формул багатьох авторів, таких як А. Н. Адонін, І. М. Мурах, А. П. Крилов, М. М. Глаголевський, І. І. Дунюшкін, А. С. Вірновський, А. М. Пирвердян та інші – [3, 4].

На рис. 1 наведено принципову схему СШНУ. У табл. 1 – основні вихідні дані.

**Структура комплексу програм, розроблених для розрахунків ГШНУ.** Пакет складається з п'яти програмних одиниць. *Модуль № 1 «PVT»* – визначення фізичних властивостей ГРС від тиску, температури та об'ємних фазових змін уздовж свердловини.

*Модуль № 2 «Well-Pump»* – побудова залежності розподілу тиску у свердловині та насосно-

компресорних трубах (НКТ) на задані умови експлуатації.

Модулі № 1–2 зв'язані в інтегрованому середовищі розробки програмного забезпечення DELPHI з автономними додатками та з графічним інтерфейсом.

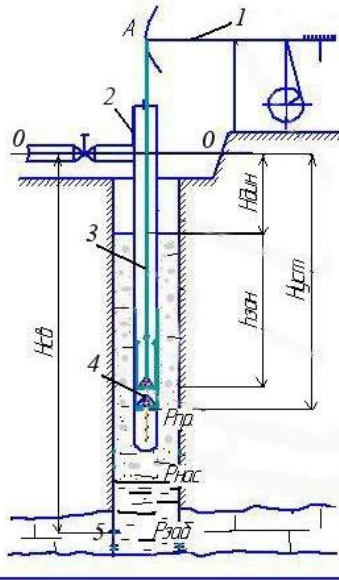


Рис. 1 – Принципова схема СШНУ та позначення [5]:  
1 – станок-качалка; 2 – НКТ; 3 – колона штанг; 4 – насос;  
5 – перфораційні отвори

Позначення на рис. 1:

$H_{\text{дин.}}$  – динамічний рівень рідини у свердловині;

$H_{\text{уст.}}$  – глибина установки насоса;

$H_{\text{св.}}$  – глибина свердловини доперфораційних отворів;

$h_{\text{зан.}}$  – глибина занурення насоса під динамічний рівень;

$A$  – точка підвісу колони насосних штанг на голівці балансира;

$P_{\text{заб.}}$  – тиск у забої свердловини, що працює;

$P_{\text{уст.}}$  – тиск на усті свердловини;

$P_{\text{пр.}}$  – тиск на прийомі насоса;

$P_{\text{нас.}}$  – тиск насичення нафти газом, що приведено до нормальних умов;

$P_{\text{пл.}}$  – пластовий тиск, визначається як тиск у забої, коли свердловина не працює  $Q = 0$ .

$B$  – вміст води у нафтової продукції;

$G_0$  або  $\Gamma_0$  – газовий фактор.

Таблиця 1 – Основні вихідні дані для розрахунку СШНУ

Параметри	Значення, мм
$Q_{\text{пл.рід.}}$ , м <sup>3</sup> /добу	40
$H_{\text{дин.}}$ , м	1800
$P_{\text{уст.}}$ , МПа	1,5
$P_{\text{нас.}}$ , МПа	9
$P_{\text{пл.}}$ , МПа	92
$B$ , д.о.	0,5
$\Gamma_0$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	60
$\rho_{\text{н.лег.}}$ , кг/м <sup>3</sup>	850
$\rho_{\text{г.}}$ , кг/м <sup>3</sup>	1,4
$\rho_{\text{в.}}$ , кг/м <sup>3</sup>	1100
$\mu_{\text{н.лег.}}$ , МПа·с	2,5
$T_{\text{пл.}}$ , °К	315

У модулі № 3 «Pump» визначаються основні параметри плунжерного насоса; у модулі № 4 «КШ» – проводяться вибір і розрахунки на міцність колони

насосних штанг; у модулі № 5 – енергетичні розрахунки роботи глибинної насосної установки.

Модулі № 3–5 створені в математичному прикладному середовищі MathCAD і є автономними програмними модулями. Зв'язок між модулями й коректування їх можлива тільки при особистій участі користувача. У програмній продукції цих модулів є коментарі й підказки при адаптації розрахунків до конкретних умов експлуатації.

**Прогнозування фізичних характеристик ГРС у свердловині – модуль № 1 «PVT».** Фізичні властивості ГРС у свердловині є величинами змінними й залежать від термодинамічних умов і фазових характеристик газорідної суміші. Так, якщо поточний тиск  $P_i > P_{\text{нас.}}$ , то газ повністю розчинений у рідині; якщо  $P_i < P_{\text{нас.}}$ , то розчинений газ починає виділятися з рідини і в цій зоні вертикальних труб рухається газувана рідина (газ у вільному стані у рідині). Розрахунки проводяться згідно кореляційним співвідношенням тиску, обсягу й температури та фазовим змінам, що наведено у роботах – [2, 3, 6].

На рис. 2 зведено результати розрахунків фізичних властивостей ГРС від тиску у свердловині на задані умови експлуатації.

**Розподіл тиску по свердловині та визначення глибини установки насоса.** Розрахунки проводяться у модулі № 2 – «Well-Pump», методика та основні формули дано у роботах [2, 3, 6]. Глибина установки насоса та фізичні властивості ГРС для заданих умов на вході у насос визначаються шляхом апроксимації залежностей модуля № 1. На рис. 3 наведений результат прогнозування розподілу тиску в НКТ та по стовбуру свердловини –  $L(P)$ , глибини установки насоса  $L_{\text{уст.}}$ , значень параметрів нафтової продукції на вході у насос. На рис. 4 представлено зведені дані тиску  $P_{\text{пр}}(\beta)$  та глибини установки насоса  $L_{\text{уст.}}(\beta)$  для різних значень вмісту газу на прийомі насоса.

**Розрахунки основних параметрів плунжерного насоса.** Для заданої глибини спуску насоса  $L$  та запланованого значення дебіту рідини  $Q_p$ , за умовам експлуатації, згідно [3, 7], обрано: діаметр плунжера насоса  $D_{\text{пл.}}$ , тип насоса, група посадки пари «плунжер-циліндр». Далі по модулю № 3 – «Pump» визначаємо основні параметри насоса [3, 4]: втрати тиску в усмоктувальному й напірному клапанах; перепад тиску, створюваний насосом; виток в парі плунжер-циліндр; коефіцієнт наповнення насоса; теоретичну подачу насоса; режимні параметри.

**Вибір і розрахунки на міцність конструкції колони штанг.** Для обраної конструкції колони насосних штанг, згідно довідковим даним, визначаємо за допомогою модуля № 4 «КШ» наступні данні:

1) перевірка забезпечення руху штанг униз без зависання;

2) перевірка забезпечення втомної міцності в кращі підвісу КШ;

3) визначення довжин і діаметрів рівномірної ступеневої КШ;

4) розрахунки навантаження в точці підвісу штанг;

5) визначення напруги в штангах.

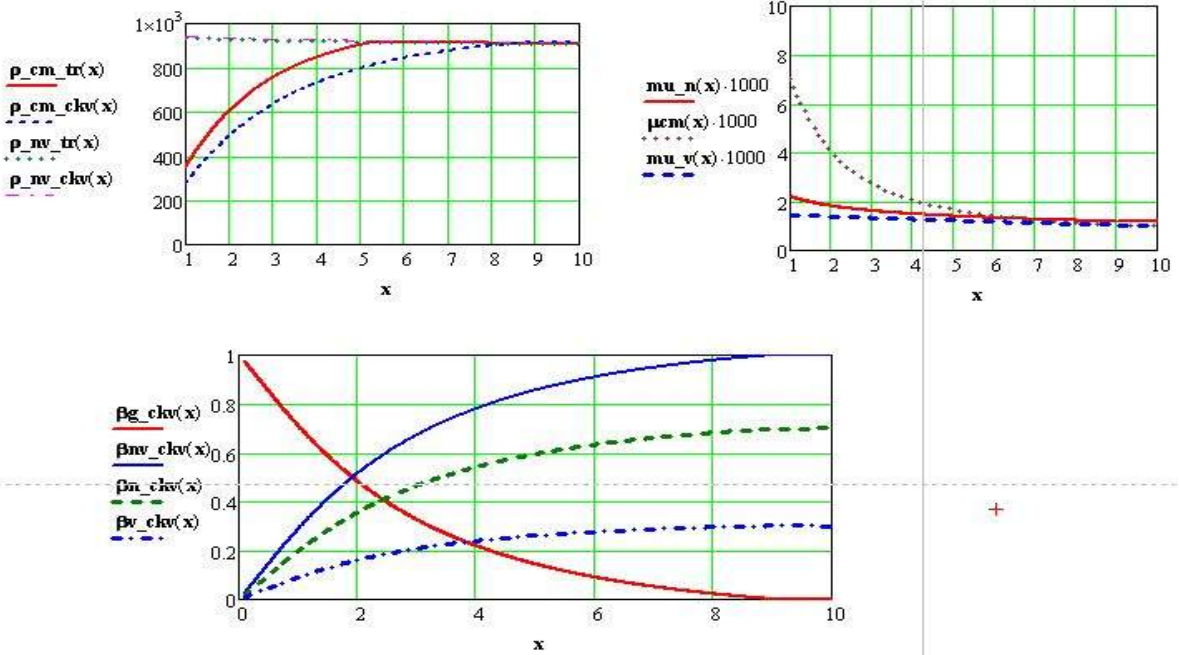


Рис. 2 – Розподіл густини  $\rho$ ,  $\text{кг/м}^3$ , в'язкості  $\mu$  та об'ємної фазової долі  $\beta$  газорідної суміші та рідини від тиску

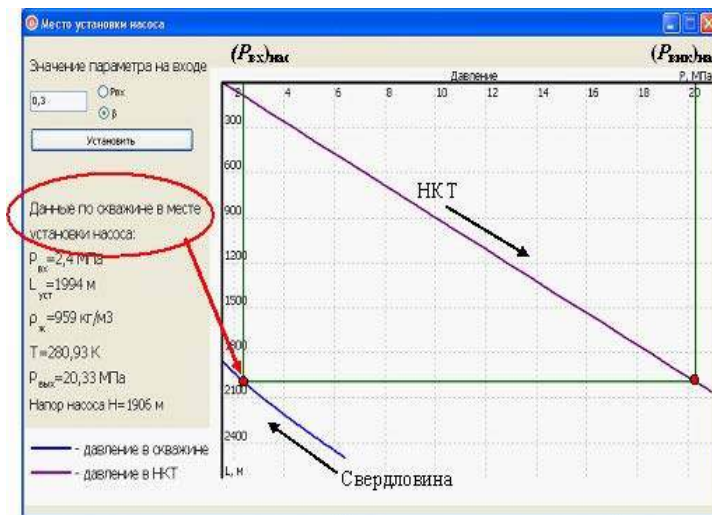


Рис. 3 – Інтерфейс програмного модуля №2

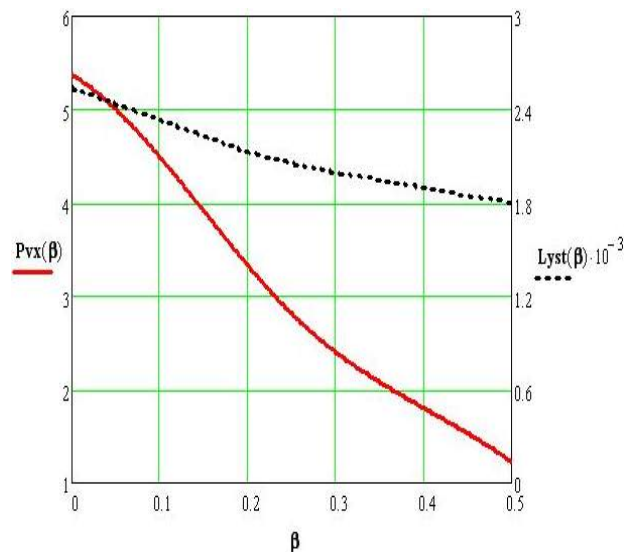


Рис. 4 – Зведені данні глибини установки насоса  $L_{уст}(\beta)$  та тиску  $P_{vx}(\beta)$  від вмісту газу на прийомі насоса

У модулі № 4 – «КШ» необхідно проводити адаптацію вихідних значень двоступеневої або триступеневої колони штанг, обраних характеристик штанг  $i$ -й ступені –  $d_{шт.i}$ ,  $f_{шт.i}$ ,  $q_{шт.i}$ , відповідно: діаметри, площа перетину, вага 1 м штанг кожної із ступені.

Далі по залежностям, що наведено у роботі [3], проведено розрахунки енергетичних показників роботи ГШНУ, коефіцієнта експлуатації та міжремонтний період роботи, затрати на підйом нафтової продукції із свердловини – модуль № 5.

Слід зазначити, що для розрахунків імовірності обриву штанг у роботі використовується формула М. М. Саттарова [3], у якій числові коефіцієнти залежать від діаметра плунжера та наведених напруг, що й допускаються. Ця формула є більш зручною для використання й порівняння різних режимів роботи ГШНУ.

**Результати роботи.** Використовуючи комплекс програм проведено дослідження впливу глибини спуска насоса у свердловину на параметри ГШНУ. Результати розрахунків наведено у графічних залежностях – рис. 5, а, б, в.

Аналіз зведених залежностей, а також показників роботи насосної установки показав, що для заданих умов експлуатації та обраної конструкції КШ, рекомендується діапазон глибини установки насоса  $L_{уст.} = 2100-2200$  м.

Збільшення глибини установки насоса в свердловині приводить до зменшення кількості газу у ГРС, що попадає в насос разом з рідиною. Однак для забезпечення достатньої надійності штангового насоса не виконуються техніко-економічні вимоги.

Установка насоса на глибині від 1850 м до 2000 м, приводить до зменшення коефіцієнта наповнення  $K_{нап} = 0,55-0,65$  та коефіцієнта подачі  $\eta_{под} = 0,48-0,55$ , збільшення значень швидкості відкачки, хода плунжера, повної потужності на підйом рідини, імовірності обриву штанг.

Вибір верстат-качалки (ВК) ведеться шляхом порівняння обраного діапазону розрахункових величин максимального навантаження, скрутний моменту на валу редуктора й швидкості відкачки розглянутого варіанта компонування встаткування з паспортними даними ВК нормального ряду. Наприклад, для даних умов розрахунків, обрано верстат качалку ВК 10-4,5-8000 [8] – див рис. 5, г.

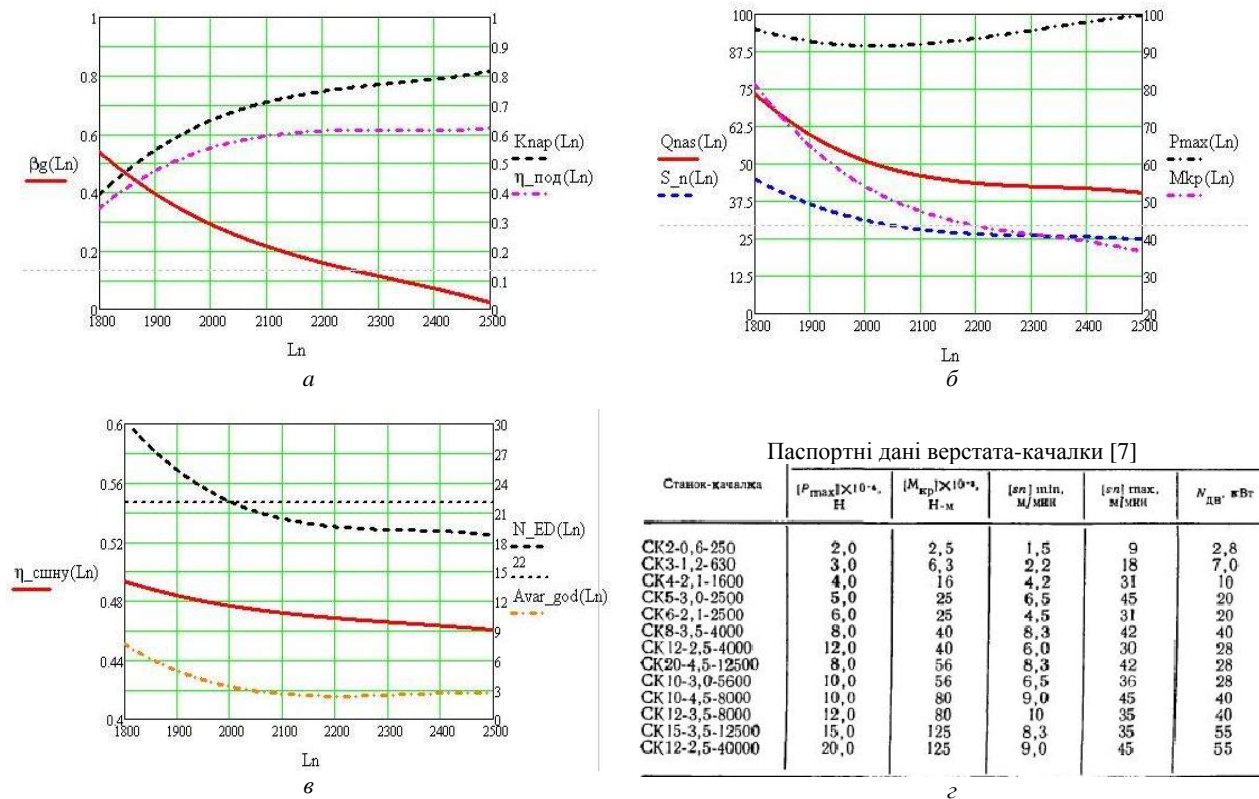


Рис. 5 – Дослідження впливу глибини установки насоса у свердловині на параметри ГШНУ:

$K_{нап}$  – коефіцієнт наповнення, д.о.;  $\eta_{под}$  – коефіцієнт подачі, д.о.;  $\beta_g$  – об’ємна доля вмісту газу,  $Q_{нас}$  – подача насоса для ГРС, м<sup>3</sup>/доба;  $S_n$  – режим відкачки, м/хв;  $P_{max}$  – максимальне навантаження на КШ в точці підвісу штанг, кН;  $M_{кр}$  – скрутний момент на валу редуктора, кН·м;  $\eta_{ГШНУ}$  – коефіцієнт корисної дії ГШНУ, д.о.;  $N_{ЕД}$  – потужність, що потрібна для підйому рідини, кВт;  $Avar_{год}$  – імовірність частоти обриву штанг, рем/год

**Висновки.** Для проведення чисельних досліджень впливу глибини спуска насоса у свердловині, конструктивних параметрів насоса та

колони штанг на технічні, енергетичні та експлуатаційні характеристики ГШНУ треба виконувати великий обсяг розрахункових робіт. У

роботі наведено опис комплексу пакету програм, що розроблений на кафедрі гідромашин НТУ «ХПІ».

Ухвалення рішення по зміні глибини спуска насоса в свердловину необхідно проводити з урахуванням фактичних значень тиску й вільного вмісту газу на прийомі насоса, коефіцієнта подачі насоса й к.к.д. усієї ГШНУ. Для підвищення ефективності проектних робіт необхідно проводити чисельні експерименти за допомогою комплексу програм.

При конструюванні колони насосних штанг та перевірки забезпечення умов достатньої втомної міцності й мінімальних витрат, в зв'язку з великим обсягом довідкового матеріалу, розрахункових схем, корегування вихідних даних для модуля № 4 можливо тільки при особистій участі користувача.

Комплекс програм [1] використовується в учбовому процесі для науково-дослідницької роботи студентів. Апробація роботи була виконана на міжнародній конференції [9].

**Список літератури:** 1. Шевченко Н. Г. Комплекс программ для расчета параметров работы штанговой насосной установки / Н. Г. Шевченко, А. Л. Шудрик // Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Енергетичні та теплотехнічні процеси та устаткування. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2014. – № 1 (1044) – С. 175–179. 2. Силаш А. П. Добыча и транспортировка нефти и газа / А. П. Силаш. – М. : Недра, 1980. – 375 с. 3. Гиматудинов Ш. К. Справочное руководство по проектированию разработки и эксплуатации нефтяных месторождений. Добыча нефти / Ш. К. Гиматудинов. – М. : Недра, 1983. – 455 с. 4. Персиянцев М. Н. Добыча нефти в осложненных условиях / М. Н. Персиянцев. – М. : ООО «НедраБизнесцентр», 2000. – 653 с. 5. Ценципер А. И. Основы техники добычи нефти : учебн. пособие / А. И. Ценципер. – Харьков : Підручник НТУ «ХПІ», 2014. – 292 с. 6. Шевченко Н. Г. Програмний модуль прогнозування гідродинамічних характеристик газорідної суміші свердловини при механізованому видобутку нафти / Н. Г. Шевченко, О. Л. Шудрик // Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х. :

НТУ «ХПІ». – 2014. – № 39 (1082) – С. 190–197. 7. Насосы скважинные штанговые. Общие технические требования. ГОСТ Р 1896-2002. – Режим доступа : <www.complexdoc.ru>. – Дата обращения : 3 сентября 2015. 8. Приводы штанговых скважинных насосов. Общие технические требования. ГОСТ Р 51763-2001. – Режим доступа : <www.complexdoc.ru>. – Дата обращения : 3 сентября 2015. 9. Шевченко Н. Г. Підвищення ефективності проектних робіт для вибору обладнання СШНУ за допомогою прикладних програм / Н. Г. Шевченко, А. О. Лазаренко // Матеріали за 12-а міжнародна научна практична конференція «Бъдещите изследвания». – София : «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2016. – Том 10. Математика. Физика. Съвременни технологии на информации. – С. 38-41.

**References:** 1. Shevchenko, N. G., and A. L. Shudrik. "Kompleks program dlya rascheta parametrov raboty shtangovoy nasosnoy ustanovki." *Visnik NTU "KhPI". Ser.: Energetichni ta teplotehnicni procesi ta ustatkuvannya*. No. 1.1044. Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. 175–179. Print. 2. Silash, A. P. *Dobycha i transportirovka nefiti i gaza*. Moscow: Nedra, 1980. Print. 3. Gimatudinov, Sh. K. *Spravochnoe rukovodstvo po projektirovaniyu razrabotki i ekspluatatsii neftyanyh mestorozhdeniy. Dobycha nefiti*. Moscow: Nedra, 1983. Print. 4. Persiyancev, M. N. *Dobycha nefiti v oslozhnennykh usloviyakh*. Moscow: OOO "NedraBiznescentr", 2000. Print. 5. Cenciper, A. I. *Osnovy tehniki dobychi nefiti*. Kharkov: Pidruchnik NTU "KhPI", 2014. Print. 6. Shevchenko, N. G., and A. L. Shudrik. "Programnyi modul prognozuvannya gidrodinamichnih harakteristik gazoridnoyi sumishi sverdlolini pri mehanizovanomu vidobutku nafti." *Visnik NTU "KhPI". Ser.: Matematichne modelyuvannya v tehnici ta tehnologiyah*. No. 39.1082 Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. Print. 7. *Nasosy skvazhinnye shtangovye. Obshie texnicheskie trebovania*. GOST R 51896-2002. Web. 3 September 2015. <www.complexdoc.ru>. 8. *Privody shtangovykh skvazhinnykh nasosov. Obshie texnicheskie trebovania*. GOST R 51763-2001. Web. 3 September 2015. <www.complexdoc.ru>. 9. Shevchenko, N. G., and A. O. Lazarenko. "Pidvishchennya efektyvnosti projektnykh robot dlya voboru obladnannya SShNU za dopomogoyu prikladnykh program." *Materiali za 12-a mezhdunarodna nauchna praktichna konferentsiya "B'deshchite izsledvaniya" Matematika. Fizika. S'vremenni tehnologii na informatsii*. Vol. 10. Sofiya: "Byal GRAD-BG" OOD, 2016. Print.

Поступила (received) 05.09.2015

**Шевченко Наталія Григорівна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини», м. Харків; тел.: (095) 425-18-33; e-mail: shevng@ukr.net.

**Shevchenko Natal'ja Grigor'evna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of "Hydraulic machines", Kharkiv; tel.: (095) 425-18-33; e-mail: shevng@ukr.net.

**Фатієва Надія Миколаївна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини», м. Харків; тел.: (057) 707-66-46; e-mail: gmntukhpi@gmail.com.

**Fatieieva Nadezhda Nikolaevna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of "Hydraulic machines", Kharkiv; tel.: (057) 707-66-46; e-mail: gmntukhpi@gmail.com.

**Лазаренко Анастасія Олександрівна** – студент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (093) 628-65-53; e-mail: lazarenkonastya@ukr.net.

**Lazarenko Anastasiya Oleksandrivna** – Student, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv; tel.: (093) 628-65-53; e-mail: lazarenkonastya@ukr.net.