

**О. І. ГАСЮК, Є. М. ЦЕНТА, Н. Г. ШЕВЧЕНКО**

### **АНАЛІЗ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ ДЛЯ РОЗРИВУ НАФТОВИХ ПЛАСТІВ**

Наведено основні короткі відомості про насосні установки для гідравлічного розриву пласта, створені в різних країнах, взяті з сайтів заводів та фірм-виробників, довідкової літератури. В даний час для гідравлічного розриву пласта застосовуються спеціальні насосні установки, які змонтовані на різних монтажних-транспортних шасі, що забезпечують повний привід. Наведено основні технічні характеристики установок, що дають лише загальну оцінку виробу без схеми встановлення та переліку елементної бази реалізації. З метою зіставлення насосних установок різних фірм таблиці побудовані за однойменними показниками. Запропоновано вирішальний критерій, що відображає сукупність енергетичних та масогабаритних характеристик, компактність. Він дозволяє обґрунтувати подальший розвиток, який буде пов'язаний із гідроприводними насосними агрегатами, тобто з більш широким використанням сучасних гідромашин та гідроапаратури. Слід зазначити, що установка для гідравлічного розриву пласта являє собою в цілому динамічну машину, робота якої супроводжується нестационарними процесами руху технологічної рідини в свердловині, в пласті, що розривається, при дії пластового тиску на глибинах понад 1500 м. При цьому при розробці насосного агрегату використовувалася нова конструкція регульованого аксіально-поршневого насоса АНП-500 з робочим об'ємом 500 см<sup>3</sup>/об та тиском 35 МПа, що розроблений у НДІ Гідропривід (м. Харків). Огляд відомих джерел показав, що подальше вдосконалення, розвиток та підвищення ефективності насосних установок та агрегатів для гідравлічного розриву пласта стає актуальною проблемою нафтогазової промисловості. Ця проблема може бути вирішена шляхом обґрунтованого вибору приводу; забезпечення плавного регулювання подачі; суттєвого зниження пульсації подачі та тиску суміші, що надходить у свердловину; зменшення маси та габаритів.

**Ключові слова:** насосна установка, насосний агрегат, насосний агрегат з механічним приводом, насосний агрегат з гідравлічним приводом, гідророзрив пласта, гідропривід, інтенсифікація видобутку нафти, критерій ефективності.

**А. И. ГАСЮК, Е. Н. ЦЕНТА, Н. Г. ШЕВЧЕНКО**

### **АНАЛИЗ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ДЛЯ РАЗРЫВА НЕФТЯНЫХ ПЛАСТОВ**

Приведены основные краткие сведения о насосных установках для гидравлического разрыва пласта, созданные в разных странах, взятые с сайтов заводов и фирм-изготовителей, справочной литературы. В настоящее время для гидравлического разрыва пласта применяются специальные насосные установки, смонтированные на различных монтажно-транспортных шасси, обеспечивающих полный привод. Приведены основные технические характеристики установок, дающие лишь общую оценку изделия без схемы установки и перечня элементной базы реализации. С целью сопоставления насосных установок различных фирм таблицы строятся по одноименным показателям. Предложен решающий критерий, который отражает совокупность энергетических и массогабаритных характеристик, компактность. Он позволяет обосновать дальнейшее развитие, которое будет связано с гидроприводными насосными агрегатами, т. е. с более широким использованием современных гидромашин и гидроаппаратуры. Следует отметить, что установка для гидравлического разрыва пласта представляет собой в целом динамическую машину, работа которой сопровождается нестационарными процессами движения технологической жидкости в скважине, в разрываемом пласте, при действии пластового давления на глубинах свыше 1500 м. При этом при разработке насосного агрегата использовалась новая конструкция регулируемого аксиально-поршневого насоса АНП-500 с рабочим объемом 500 см<sup>3</sup>/об и давлением 35 МПа, разработанный в НИИ Гидропривод (г. Харьков). Обзор известных источников показал, что дальнейшее усовершенствование, развитие и повышение эффективности насосных установок и агрегатов для гидравлического разрыва пласта становится актуальной проблемой нефтегазовой промышленности. Эта проблема может быть решена путем обоснованного выбора привода; обеспечения плавного регулирования подачи; существенного снижения пульсации подачи и давления смеси, поступающей в скважину; уменьшения массы и габаритов.

**Ключевые слова:** насосная установка, насосный агрегат, насосный агрегат с механическим приводом, насосный агрегат с гидравлическим приводом, гидроразрыв пласта, гидропривод, интенсификация добычи нефти, критерий эффективности.

**O. HASIUK, E. TSENTA, N. SHEVCHENKO**

### **ANALYSIS OF PUMPING UNITS FOR FRACTURING OIL FORMATIONS**

The article provides basic brief information, taken from the sites of factories and manufacturers, reference literature, about pumping units for hydraulic fracturing, which are created in different countries. Currently, special pumping units are used for hydraulic fracturing, assembled on various removal-installation chassis, providing four-wheel drive. The main technical characteristics of the installations, which give only a general assessment of the unit without the installation diagram and the list of the element base of the implementation, are given. In order to compare the pumping units of different companies, the tables are built according to the indicators of the same characteristics. A decisive criterion, which reflects the totality of energy and weight and size characteristics, small size, is proposed. It makes it possible to substantiate further development, which will be associated with hydraulic driven pumping units, that is, with the wider use of modern hydraulic machines and hydraulic equipment. It should be noted that the installation for hydraulic fracturing is generally a dynamic machine, the operation of which is accompanied by non-stationary processes of movement of the process fluid in the well, in the fractured formation, under the action of formation pressure at depths exceeding 1500 m. At the same time, during developing the pumping unit, a new design of an adjustable axial piston pump ANP-500 with a working volume of 500 cm<sup>3</sup>/rev and a pressure of 35 MPa, developed at the Research Institute Hydroprivid (Kharkov), was used. A review of known sources has shown that further improvement, development and increase in the efficiency of pumping units and units for hydraulic fracturing is becoming an urgent problem in the oil and gas industry. This problem can be solved by making an informed choice of the drive; ensuring smooth flow control; a significant reduction in the pulsation of the supply and pressure of the mixture entering the well; reduction of weight and dimensions.

**Keywords:** pumping set, pumping unit, pumping unit with a mechanical drive, pumping unit with a hydraulic drive, hydraulic fracturing, hydraulic drive, intensification of oil production, efficiency criterion.

**Вступ.** У теперішній час одним з ефективних методів інтенсифікації видобутку нафти є гідравлічний розрив пласта (ГРП). Шляхом

гідромеханічного впливу на продуктивний пласт підключаються додаткові ділянки покладів, що раніше не брали участь в розробці [1]. Для реалізації ГРП в

США, Румунії, Росії, КНР та інших країнах створені спеціальні насосні агрегати з різними конструктивними рішеннями і елементної базою. Узагальнено їх можна розділити на дві групи: насосні агрегати (НА) з механічним приводом (НАМ) і з гідравлічним приводом (НАГ). У НАМ зворотно-поступальний рух поршневих груп насосної частини здійснюється трансмісією, що перетворює обертальний рух приводного двигуна (дизеля або електродвигуна) в поступальний за допомогою кривошипно-шатунного механізму. У НАГ, що з'явилися пізніше, використовується елементна база об'ємного гідروобладнання, яке серійно випускається промисловістю і безпосередньо забезпечує зворотно-поступальний рух поршневих пар.

Сфера застосування ГРП весь час розширюється [2], виникає питання про те, яка з цих груп НА є більш перспективною.

Ця стаття присвячена вирішенню цього питання.

**Аналіз останніх досліджень.** Розглянемо спочатку НАМ, коротка інформація про яких є практично тільки на сайтах інтернету. На рис. 1 показаний НАМ FC-2251 виробництва фірми «Стюарт і Стівенсон» (США) [3]. Він змонтований на шасі і призначений для закачування різних рідин під тиском у пласт в умовах нафтових родовищ і для експлуатації при тривалих режимах роботи.



Рис. 1. Насосний агрегат FC-2251 виробництва «Стюарт і Стівенсон» (США)

Насосний агрегат FC-2251 має дизельний двигун, який через трансмісію передає зворотно-поступальний рух п'яти плунжерам насоса високого тиску, забезпечує регулювання подачі і тиску рідини, що закачується в пласт, допускає роботу при температурі навколишнього середовища від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $40^{\circ}\text{C}$ .

Основні технічні характеристики насосного агрегату FC-2251, які взяті з сайту [3], показані в табл. 1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики насосного агрегату FC-2251

Параметр, розмірність	Монтажне шасі, тип приводного двигуна
1. Монтажна база	автомобіль
2. Приводний двигун	дизельний двигун
3. Максимальний тиск, МПа	105
4. Теоретична подача насоса, л/хв	2547
5. Габарити [L×B×H], мм	12172×3200×4002
6. Маса, кг	37500

Фірма «Синергія» (Росія) [4] виробляє НАМ для ГРП, один з яких, моделі СИН-31, зображений на рис. 2.



Рис. 2. Насосний агрегат СИН-31 виробництва заводу «Синергія»

Насосний агрегат СИН-31, змонтований на автомобілі КРАЗ, має дизельний двигун, п'ятиступінчасту гідромеханічну передачу і трьохплунжерний насос високого тиску, в якому можуть встановлюватися плунжери діаметром 80, 100 і 125 мм. СИН-31 дозволяє змінювати подачу і тиск закачуваної в пласт рідини. Основні технічні характеристики насосного агрегату, що взяті з сайту [4], показані в табл. 2.

Таблиця 2 – Технічні характеристики насосного агрегату СИН-31

Параметр, розмірність	Монтажне шасі, тип приводного двигуна
1. Монтажна база	автомобіль КРАЗ
2. Приводний двигун	дизель, коробка передач на 5 ступенів
3. Максимальний тиск, МПа	45 – 100 в залежності від діаметра плунжера
4. Теоретична подача насоса, л/хв	1062 – 1650 відповідно при діаметрі плунжера 100 і 125 мм і тиску 23 і 15 МПа
5. Габарити [L×B×H], мм	9560×2660×3700
6. Маса, кг	20000

Республіка КНР пропонує на ринку НАМ моделі YL і YLC [5] з використанням технологій американських компаній Western Co. і OPI Co., змонтованих на автомобілі. Ці НАМ мають дизельний двигун з коробкою передач і трьохплунжерний насос високого тиску. Насосні агрегати YL і YLC оснащені комп'ютерним центром по збору і контролю інформації з вимірювальних приладів та відображенню кривих тиску і подачі закачуваної в пласт рідини. На рис. 3 зображено насосний агрегат моделі YLC, а основні технічні характеристики, що взяті з сайту [5] для моделей YL, показані в табл. 3.



Рис. 3. Насосний агрегат моделі YLC

Таблиця 3 – Технічні характеристики насосного агрегату YLC

Параметр, розмірність	Монтажне шасі, тип приводного двигуна
1. Монтажна база	шасі на замовлення клієнта
2. Приводний двигун	дизель з коробкою передач
3. Максимальний тиск, МПа	70 – 105 в залежності від типу установки
4. Теоретична подача насоса, л/хв	900 – 1300 в залежності від типу установки
5. Габарити [L×B×H], мм	9355×2500×3100 – 10250×2500×3800 в залежності від типу установки
6. Маса, кг	20000 – 34000 в залежності від типу установки

Республіка Білорусь випускає НА [6], зображені на рис. 4. Вони змонтовані на шасі МЗКТ-652712, мають дизельний двигун і насос високого тиску.



а



б

Рис. 4. Насосні агрегати виробництва Білорусі: а – Н2501; б – Н2501-10

Основні характеристики насосного агрегату Н2501-10 показані в табл. 4.

Таблиця 4 – Технічні характеристики насосного агрегату Н2501-10

Параметр, розмірність	Монтажне шасі, тип приводного двигуна
1. Монтажна база	шасі МЗКТ-652712
2. Приводний двигун	дизельний двигун
3. Максимальний тиск, МПа	105
4. Теоретична подача насоса, л/хв	2050
5. Габарити [L×B×H], мм	12000×2500×4000
6. Маса, кг	36500

Зупинимось на ще одному НАМ виробництва Росії, який розглядався в статті [7]. Мова піде про

насосні агрегати АНА-105, АНА-105М, АНА-105М-01 і АНА-105М-02.

Насосні агрегати серії АНА-105, вироблені ЗАТ ПКБ «Автоматика» (Росія) [8], призначені для закачування в свердловину робочої суміші під тиском і з продуктивністю, що забезпечують процес гідророзриву пласта, а також для здійснення гідравлічного, гідропіскоструминного або хімічного впливу на нафтових та газових родовищах. На рис. 5 показаний загальний вигляд агрегату на вантажному автомобілі. Склад та розташування робочого обладнання агрегату представлені на рис. 6.

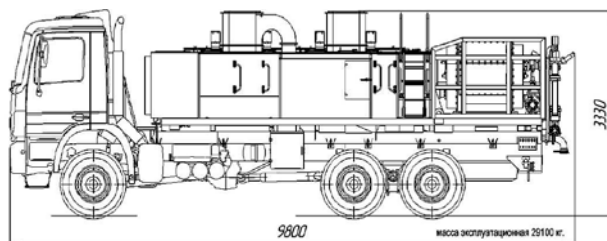


Рис. 5. Насосна установка АНА-105

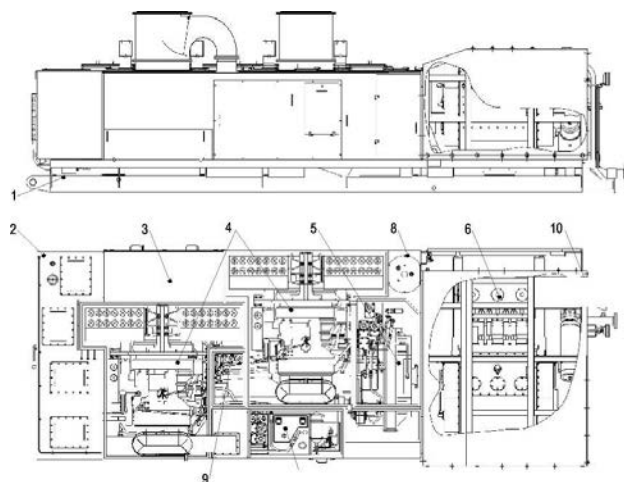


Рис. 6. Робоче обладнання насосного агрегату серії АНА-105:

- 1 – рама; 2 – бак паливний; 3 – відсік електроукомплектування;
- 4 – силові установки із газотурбінним двигуном ГТД-1250;
- 5 – трансмісія в моноблочному виконанні (підсумовуючий редуктор, коробки передач з механізмами розподілу, маслобак, трубопроводи та вузли гідроправління);
- 6 – насос плунжерний; 7 – бак масляний системи змащення приводної частини насоса; 8 – бак системи змащення плунжерів; 9 – пірогенератори автоматичної системи пожежогашіння; 10 – тент

Організації ЗАТ ПКБ «Автоматика», ВАТ «Сибнефтемаш», ВАТ «ПНИТИ» і ВАТ «БурГеоСервіс» поставляють повний комплекс цього обладнання [8]. На відміну від розглянутих вище НАМ вони мають трьохплунжерний насос з газотурбінним приводом, що складається з двох газотурбінних двигунів і двох планетарних коробок передач підсумовуючого редуктора. Модифікації АНА-105 пов'язані з установкою на різні транспортні засоби (трактор «Кіровоць», автомобіль МАЗ та ін.).

Технічні характеристики, аналогічно наведеним, показані в табл. 5.

Таблиця 5 – Технічні характеристики насосного агрегату АНА-105

Параметр, розмірність	Монтажне шасі, тип приводного двигуна
1. Монтажна база	автомобіль
2. Приводний двигун	газотурбінні двигуни
3. Максимальний тиск, МПа	105
4. Теоретична подача насоса, л/хв	2060
5. Габарити [L×B×H], мм	9500×2600×3650
6. Маса, кг	19000

На сайті [8] зазначається, що маса цих НА порівняно з дизельними НАМ тієї ж потужності мінімум на 4000 кг менше.

Перейдемо до НАГ, які оснащені гідроприводом насосної частини високого тиску. Скористаємося роботою [7], де він розглядався.

Цей НАГ розроблений, як експериментальний зразок, спільно організаціями Росії (ЦКБ «Титан» (м. Волгоград), заводом газотурбінних двигунів (м. Калуга)) і України (НДІ Гідропривід (м. Харків)). Насосний агрегат АНА-105 містить п'ять однакових секцій з монтажем на автомобілі. У процесі створення АНА-105 вперше були розроблені регульовані аксіально-поршневі насоси з робочим об'ємом 500 см<sup>3</sup>, частотою обертання 1500 об/хв (в АНА-105 десять паралельно працюючих насосів) на номінальний тиск 35 МПа з приводом від газових турбін. АНА-105 забезпечує регулювання тиску і подачі закачування в пласт різних рідин. У статті [7] наведені гідросхеми однієї секції АНА-105 і опис її роботи, вихідні характеристики об'ємного насоса. Відзначається, що початковий запуск секцій в роботу відбувається послідовно з розузгодженням за часом (0,2 с). Така спільна асинхронна робота всіх секцій АНА забезпечує мінімальну пульсацію подачі і тиску на виході. Є інформація про всі гідроприсрої, що входять до складу АНА-105. Гідроциліндр, штоки якого жорстко з'єднані з двома плунжерами гідроциліндрів, що закачують поперемінно рідину в пласт під високим тиском, утворюють єдиний циліндр мультиплікатора. Однак, масогабаритні параметри АНА-105, що пройшов позитивні випробування у Волгоградській області Росії, невідомі і тому в табл. 6 нами вказані приблизні значення.

Аналіз наведеної інформації [1–24], в основному, взятої з сайтів, з питання створення НА в різних країнах показує:

- в основному виготовляються НАМ з механічним приводом по різним технічним рішенням (кривошипно-шатунний механізм, коробка передач, трансмісія з дизельним двигуном і т. і.) У цих НА складно реалізуються питання регулювання подачі і тиску закачуваної рідини в пласт;

- розроблений гідроприводний НАГ, в якому привідна частина і насосна об'єднані в єдине ціле, що відкриває можливості більш плавного регулювання подачі і тиску, зменшує масогабаритні параметри, полегшує заміну зношених стандартних гідроприсроїв, дозволяє компоувати НА із секцій;

- відсутні принципи і кінематичні схеми НА, результати досліджень динамічних характеристик подачі і тисків закачуваної рідини в пласт;

- відсутні результати промислових випробувань і формулювання на їх основі технічних вимог до показників якості динаміки НА.

Таблиця 6 – Технічні характеристики насосного агрегату АНА-105

Параметр, розмірність	Монтажне шасі, тип приводного двигуна
1. Монтажна база	автомобіль
2. Приводний двигун	гідропривод на базі регульованого аксіально-поршневого насоса з похилим диском моделі АН-П-500/35 і циліндра мультиплікатора
3. Максимальний тиск, МПа	105
4. Теоретична подача насоса, л/хв	подача трьох секцій – 2250
5. Габарити [L×B×H], мм	умовно прийняті як у АНА-105, 9500×2600×3650
6. Маса, кг	умовно прийнята як у АНА-105, 19000

Результати аналізу НА, вироблених в різних країнах, показали, що їх порівняльна оцінка і виявлення тенденції їх розвитку в майбутньому може ґрунтуватися, в якості першого наближення, лише на енергетичних і масогабаритних показниках, наведених в табл. 1–6.

У зв'язку з цим виникає завдання пошуку критерію, який за наявною інформацією про НА, дозволив би узагальнено відповісти на поставлене запитання.

**Основна частина.** Перш ніж сформулювати критерій для поставленого завдання, приділимо увагу пошуку робіт, в яких розглядається подібне завдання стосовно гідроприсроїв (насосів і гідродвигунів).

Такий підхід пов'язаний з тим, що НА для ГРП якраз і характеризуються гідравлічною потужністю і масогабаритними параметрами.

Одним з широко застосовуваних критеріїв прийнятий критерій, який характеризує лише компактність установки, що містить відношення маси  $m$ , яка припадає на одиницю об'єму  $V$  насоса, гідромотора [2], в кг/м<sup>3</sup>:

$$k_v = \frac{m}{V}. \quad (1)$$

В роботі [9] пропонується критерій, який за енергетичними і масогабаритними параметрами дозволяє оцінити технічний рівень проектного або вже створеного, що знаходиться в експлуатації, гідромотора багатократної дії:

$$k = \frac{M \cdot \omega \cdot T}{m \cdot g \cdot L_x}, \quad (2)$$



де  $M$  – крутний момент, в Н·м;  $\omega$  – кутова швидкість вала гідромотора, в об/хв;  $T$  – довговічність, в годинах;  $m$  – маса гідромотора, в кг;  $g$  – прискорення вільного падіння, в м/с<sup>2</sup>;  $L_x = \sqrt{D \cdot L}$  – характерний розмір, в м;  $D$  – діаметр гідромашини, в м;  $L$  – довжина, в м. Чисельник  $M \cdot \omega \cdot T$  являє собою загальну кількість енергії, яка може бути реалізована гідромотором у період часу  $T$ ;  $\omega \cdot T$  представляє собою число циклів вихідної ланки гідромотора, пропорційно його ресурсу, вираженого в мільйонах циклів.

Першою спробою сформулювати критерій для цієї задачі на базі критерію (2) є робота [7]. У ній прийнято такий вираз:

$$k_{pml} = \frac{p_{\max} \cdot q_T}{m \cdot L_x}, \quad (3)$$

де  $p_{\max}$  – максимальний тиск рідини на виході НА, в МПа;  $q_T$  – теоретична подача, в л/хв;  $L_x = \sqrt[3]{L \cdot B \cdot H}$  – характеристичний розмір, в м, де  $L$  – довжина НА, в м;  $B$  – ширина НА, в м;  $H$  – висота НА, в м.

За цим критерієм дається оцінка теоретичної гідравлічної потужності НА, що припадає на один кілограм маси і один метр характеристичного розміру. Критерій є розмірним [Вт/кг·м], в ньому не враховуються реальна подача, компактність виробу, що характерні для оцінки технічного рівня об'ємної гідравлічної техніки. У зв'язку з цим введемо в чисельник формули (3) в якості множників коефіцієнт подачі  $k_{\Pi}$ , як це прийнято для об'ємних насосів, і час роботи НА, наприклад, восьмигодинну зміну  $t_{CM}$ , а в знаменник – вагу виробу  $G$  замість маси. Тоді отримуємо такий вираз критерію:

$$k_{AHL} = \frac{p_{\max} \cdot q_T \cdot k_{\Pi} \cdot t_{CM}}{G \cdot L_x}, \quad (4)$$

який безрозмірний, враховує фактичну подачу і являє собою відношення переданої НА за час  $t_{CM}$  енергії на один Ньютон ваги і один метр характеристичного розміру.

Заповнюваність об'єму  $V$  будемо враховувати критерієм (1) і, отже, оцінку порівняння різних НА пропонується виконувати на основі двох критеріїв (1) і (4), сукупність яких підвищує її об'єктивність.

У табл. 7 наведені результати розрахунку критеріїв  $k_{AHL}$  і  $k_V$  на основі даних табл. 1–6 аналізованих НА.

Причому коефіцієнт подачі  $k_{\Pi}$  для поз. 1–5 і 7 прийнятий рівним 0,92, а для поз. 6 –  $k_{\Pi} = 0,96$ . Це значення взяте з технічної документації на насос, що входить до складу НА-105. Вихідні дані для поз. 7 табл. 7 запозичені з роботи [7]. Якщо порівняння НА виконувати за критерієм  $k_{AHL}$ , то кращим є НА-105. Якщо вибір здійснювати за критерієм  $k_V$ , то кращим представником виявляється НА моделі YLC (виробник – КНР). Такий результат характерний і при рішенні оптимізаційних задач за багатьма критеріями, коли серед безлічі рішень немає жодного з кращими значеннями (максимальними або мінімальними) критеріїв. І тоді виникає питання: який результат вибрати? З табл. 7 видно, що при створенні НА з поліпшеним значенням  $k_{AHL}$  критерій  $k_V$  погіршується, тобто ці критерії суперечливі. Для вибору найкращого НА можна скористатися рекомендаціями роботи [10], коли вибирають вирішальний критерій у формі:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n C_i \Phi_i, \quad (5)$$

де  $C_i$  – показник «важливості» критерію, всі  $C_i \geq 0$ , а сума їх  $C_1 + \dots + C_n = 1$ . Тут буквою  $\Phi_i$  позначені критерії.

Приймемо за вирішальний критерій:

$$k = C_1 \cdot k_{AHL} + C_2 \cdot \beta \cdot k_V, \quad (6)$$

попередньо представимо коефіцієнт  $k_V$  в безрозмірному вигляді шляхом множення на величину  $\beta = 1 \text{ м}^3/\text{кг}$ , що робить ліву і праву частини виразу (6) безрозмірними, і де  $C_1 + C_2 = 1$ .

Значення  $C_1$  і  $C_2$  призначимо виходячи із значущості критерію в процесі створення НА. Цілком природно, що всі зусилля розробників спрямовані на підвищення енергетичних характеристик НА і в меншій мірі – на компактність НА. При цьому слід зазначити, що маса  $m$  об'ємної гідромашини (радіально- і аксіально-поршневих насосів, шестеренних насосів та ін.) з невеликим допущенням рівномірно розподілена в займаному об'ємі  $V$ . Цього не можна сказати про НА, там в займаному об'ємі є багато пустот. Тому є підстави прийняти  $C_1 = 0,8$  і  $C_2 = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Таблиця 7 – Результати розрахунку критеріїв  $k_{AHL}$  і  $k_V$

Модель насосного агрегату	Країна-виробник	$p_{\max}$ , МПа	$q_T$ , л/хв (м <sup>3</sup> /с)	$m$ (G), кг (Н)	$V = H \cdot B \cdot L$ , м <sup>3</sup>	$L_x = \sqrt[3]{V}$ , м	$k_{AHL}$	$k_V$ , кг/м <sup>3</sup>
1. FC-2251	США	105	2547 (0,04245)	37500 (367875)	155,78	5,382	59651	240,57
2. СИН-31	Росія	100	1650 (0,0275)	20000 (196200)	94,09	4,548	81652	212,56
3. YLC	КНР	105	1300 (0,02166)	34000 (333540)	97,375	4,6	39282	349,2
4. H2501-10	Білорусь	105	2050 (0,0341)	36500 (358065)	120	4,932	53821	304,16
5. АНА-105	Росія	105	2060 (0,0343)	19000 (186390)	90,15	4,484	114288	210,75
6. НА-105	Росія і Україна	105	2250 (0,0375)	19000 (186390)	90,15	4,484	130256	210,75
7. ACF 1050	Румунія	105	1170 (0,0195)	18000 (176580)	70,11	4,123	74507	256,73

У табл. 8 наведені значення вирішального критерію (6) з прийнятими значеннями  $C_1$  і  $C_2$  для семи розглянутих НА.

Таблиця 8 – Результати розрахунку вирішального критерію

Модель насосного агрегату, країна-виробник	$k_{AHL}$	$k_{V_3}$ , кг/м <sup>3</sup>	$k = 0,8 \cdot k_{AHL} + 0,2 \cdot \beta \cdot k_V$ (безрозмірний)
1. FC-2251 (США)	59651	240,57	47768,91
2. СИН-31 (Росія)	81652	212,56	65364,11
3. YLC (КНР)	39282	349,2	31495,44
4. H2501-10 (Білорусія)	53821	304,16	43117,63
5. АНА-105 (Росія)	114288	210,75	91472,55
6. НА-105 (Росія і Україна)	130256	210,75	104247
7. АCF 1050 (Румунія)	74507	256,73	59656,95

З табл. 8 однозначно впливає, що технічні рішення, закладені при розробці НА-105, є перспективними.

**Висновки:** 1. Виконаний аналітичний огляд створених насосних агрегатів для ГРП в різних країнах (в основному з сайтів інтернету) дозволив виявити таке:

- в більшості країн виготовляються НА з механічним приводом з різними технічними рішеннями і дизельним двигуном;

- опублікована інформація відображає лише узагальнені відомості з енергетичних і масогабаритних характеристик;

- відсутні результати динамічних досліджень і промислових випробувань НА, що істотно ускладнює оцінку стану питання і перспективної тенденції розвитку насосних агрегатів.

2. Запропонований вирішальний критерій, що відображає сукупність енергетичних і масогабаритних характеристик, компактність, дозволив обґрунтувати, що подальший розвиток буде пов'язано також і з гідроприводними насосними агрегатами, тобто з більш широким застосуванням сучасних об'ємних гідромашин і гідроапаратури.

#### Список літератури

1. Сучков Б. М. *Интенсификация работы скважин*. Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2007. 612 с.
2. Аврунин Г. А., Грицай И. В., Кириченко И. Г., Мороз И. И., Щербак О. В. *Объемный гидропривод и гидропневмоавтоматика: учебн. пособ.* Харьков: ХНАДУ, 2008. 412 с.
3. *Насосный агрегат фирмы "Stewart and Stevenson"* (США). URL: [http://weatherford.ru/ru/service/production/51/193?TB\\_iframe=true&height=550&width=900](http://weatherford.ru/ru/service/production/51/193?TB_iframe=true&height=550&width=900) (дата обращения: 25.09.2020).
4. «Синергия». URL: <http://sinergia/Ru/sin31/shtm/>, [http://sinergia/Ru/sin35\\_komplex/shtm/](http://sinergia/Ru/sin35_komplex/shtm/) (дата обращения: 10.09.2021).
5. *Насосные агрегаты производства КНР*. URL: [http://www.petro-casco.com/cp\\_product/scripts/html/3/329.htm](http://www.petro-casco.com/cp_product/scripts/html/3/329.htm) (дата обращения: 21.09.2020).
6. *Насосные агрегаты производства Беларуси*. URL: <http://www.fidmashnov.by/prod/ustanovki-nasosnye-2/ustanovka-nasosnaya-n2501-10/>, <http://gskp.belgiss.by/Detail.php?UrlGoodsId=28634&UrlKlpId=25900&UrlGoodsAssId=58614&TabId=1&PHPESSID=c82cfd3148a2eaac48a869bfe3b47a25> (дата обращения: 22.09.2021).

7. Лурье З. Я., Панченко А. И., Гасюк А. И. Математическая модель гидроприводного насосного агрегата для разрыва нефтяных пластов. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь: ТДАУ. 2010. Вип. № 10, т. 9. С. 5–25.
8. *Насосные агрегаты ЗАО «ПКБ» Автоматика*. URL: <http://www.automatika.ru> (дата обращения: 22.09.2021).
9. Докукин А. В., Рогов А. Я., Хейфец Л. С. *Радиально-поршневые гидромоторы многократного действия: Конструкция, теория и расчет*. Москва: Машиностроение, 1980. 288 с.
10. Соболев И. М., Статников Р. Б. *Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями*. Москва: Дрофа, 2006. 175 с.
11. Світлицький В. М., Синюк Б. Б., Троцький В. П. *Техніка та технологія підземного ремонту свердловин*. Харків: Прапор, 2007. 496 с.
12. Муравенко Вит. А., Муравенко А. Д., Муравенко Вад. А. *Мобильные, передвижные буровые установки и агрегаты*. Ижевск: ИЖГТУ, 2005. 547 с.
13. Каневская Р. Д. *Математическое моделирование разработки месторождений нефти и газа с применением гидравлического разрыва пласта*. Москва: ООО «Недра-Бизнесцентр», 1999. 212 с.
14. Лысенко В. Д., Грайфер В. И. *Разработка малопродуктивных нефтяных месторождений*. Москва: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001. 562 с.
15. Архангельский В. Л., Авакян И. Е., Бухаленко Е. И., Бухаленко В. Е. *Каталог нефтяного оборудования, средств автоматизации, приборов и спецматериалов*. Москва: ВНИИОЭНГ, 2019. 518 с.
16. Александровская Н. Д., Бурченков Л. Ф., Бушуев В. В., Виницкий М. М., Гавура В. Е., Джавадян А. А., Кореляков Л. В., Курашев В. Д., Макаров А. А., Соловьянов А. А., Шафраник Ю. К. *Нефтяная промышленность. Приоритеты научно-технического развития / ред. Шафраник Ю. К.* Москва, 1996. 240 с.
17. Булгаков С. М. *Гидроприводной буровой насос. Строительные и дорожные машины*. 2008. № 4. С. 43–47.
18. «ОСНАСТКА» НПП (ОАО), *оборудование нефте- и газопромысловое*. URL: <http://www.milfirm.ru/fc5/firm8793.htm> (дата обращения: 22.09.2021).
19. URL: <http://www.burneft.ru/stati/stati-o-vazhnom-v-teke/mechanicheskiy-zavod-kalyazinskii-obretaet-vtoryyu-zhizn.html> (дата обращения: 22.09.2021).
20. URL: <http://www.drillings.ru/page215> (дата обращения: 22.09.2021).
21. URL: <http://www.cortevhdrill.ru/ydx-3a.html> (дата обращения: 22.09.2021).
22. Калинин А. Г., Левицкий А. З., Никитин Б. А. *Технология бурения разведочных скважин на нефть и газ*. Москва: Недра, 1998. 440 с.
23. Будников В. Ф., Макаренко П. П., Юрьев В. А. *Диагностика и капитальный ремонт обсадных колонн в нефтяных и газовых скважинах*. Москва: Недра, 1997. 226 с.
24. Булатов А. И., Качмар Ю. Д., Макаренко П. П., Яремийчук Р. С. *Освоение скважин: справ. пособ.* Москва: ООО «Недра-Бизнесцентр», 1999. 473 с.

#### References (transliterated)

1. Suchkov B. M. *Intensifikatsiya raboty skvazhin* [Intensification of wells operation]. Moscow-Izhevsk, NITs "Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika" Publ., Institut komp'yuternykh issledovaniy Publ., 2007. 612 p.
2. Avrunin G. A., Gritsay I. V., Kirichenko I. G., Moroz I. I., Shcherbak O. V. *Ob'emnyy gidroprivod i gidropnevmoavtomatika* [Volumetric hydraulic drive and hydro pneumatic automatics]. Kharkov, KhNADU Publ., 2008. 412 p.
3. *Nasosnyy agregat firmy "Stewart and Stevenson" (SShA)* [Pumping unit of the company "Stewart and Stevenson" (USA)]. Available at: [http://weatherford.ru/ru/service/production/51/193?TB\\_iframe=true&height=550&width=900](http://weatherford.ru/ru/service/production/51/193?TB_iframe=true&height=550&width=900) (accessed 25.09.2020).
4. "Sinergiya" [Synergy]. Available at: <http://sinergia/Ru/sin31/shtm/>, [http://sinergia/Ru/sin35\\_komplex/shtm/](http://sinergia/Ru/sin35_komplex/shtm/) (accessed 10.09.2021).
5. *Nasosnye agregaty proizvodstva KNR* [Pumping units manufactured in China]. Available at: [http://www.petro-casco.com/cp\\_product/](http://www.petro-casco.com/cp_product/)

- scripts/html/3/329.htm (accessed 21.09.2020).
6. *Nasosnye agregaty proizvodstva Belarusi* [Pumping units made in Belarus]. Available at: <http://www.fidmashnov.by/prod/ustanovki-nasosnye-2/ustanovka-nasosnaya-n2501-10/>, <http://gskp.belgiss.by/Detail.php?UrlGoodsId=28634&UrlKlpId=25900&UrlGoodsAssrId=58614&TabId=1&PHPSESSID=c82cfd3148a2eac48a869bfe3b47a25> (accessed 22.09.2021).
  7. Lur'e Z. Ya., Panchenko A. I., Gasyuk A. I. *Matematicheskaya model' gidroprivodnogo nasosnogo agregata dlya razryva neftyanykh plastov* [Mathematical model of a hydraulic drive pumping unit for fracturing oil reservoirs]. *Pratsi Tavriys'kogo derzhavnogo agrotekhnologichnogo universitetu* [Proceedings of the Tavria State Agrotechnological University]. Melitopol, TDAU Publ., 2010, issue 10, vol. 9, pp. 5–25.
  8. *Nasosnye agregaty ZAO "PKB" Avtomatika* [Pumping units of JSC "PKB" Avtomatika]. Available at: <http://www.avtomatika.ru> (accessed 22.09.2021).
  9. Dokukin A. V., Rogov A. Ya., Kheyfets L. S. *Radial'no-porshnevye gidromotory mnogokratnogo deystviya: Konstruktsiya, teoriya i raschet* [Radial-piston hydraulic motors of repeated action: Design, theory and calculation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 288 p.
  10. Sobol' I. M., Statnikov R. B. *Vybor optimal'nykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriyami* [Choice of optimal parameters in tasks with many criteria]. Moscow, Drofa Publ., 2006. 175 p.
  11. Svitlyts'kyy V. M., Synyuk B. B., Trots'kyy V. P. *Tekhnika ta tekhnolohiya pidzemnoho remontu sverdlovyn* [Technics and technology of underground well workover]. Kharkiv, Prapor Publ., 2007. 496 p.
  12. Muravenko Vit. A., Muravenko A. D., Muravenko Vad. A. *Mobil'nye, peredvizhnye burovye ustanovki i agregaty* [Mobile, portable drilling rigs and units]. Izhevsk, IzhGTU Publ., 2005. 547 p.
  13. Kanevskaya R. D. *Matematicheskoe modelirovanie razrabotki mestorozhdeniy nefi i gaza s primeneniem gidravlicheskogo razryva plasta* [Mathematical modeling of the development of oil and gas fields using hydraulic fracturing]. Moscow, OOO "Nedra-Biznesstsentr" Publ., 1999. 212 p.
  14. Lysenko V. D., Grayfer V. I. *Razrabotka maloproduktivnykh neftyanykh mestorozhdeniy* [Development of low-productive oil fields]. Moscow, OOO "Nedra-Biznesstsentr" Publ., 2001. 562 p.
  15. Arkhangel'skiy V. L., Avakyan I. E., Bukhalenko E. I., Bukhalenko V. E. *Katalog neftyanogo oborudovaniya, sredstv avtomatizatsii, priborov i spetsmaterialov* [Catalogue of oil equipment, automation equipment, devices and special materials]. Moscow, VNIIOENG Publ., 2019. 518 p.
  16. Aleksandrovskaia N. D., Burchenkov L. F., Bushuev V. V., Vinitskiy M. M., Gavura V. E., Dzhavadyan A. A., Korelyakov L. V., Kurashev V. D., Makarov A. A., Solov'yanov A. A., Shafranik Yu. K. *Neftyanaya promyshlennost'. Prioritety nauchno-tekhnicheskogo razvitiya* [Oil industry. Priorities for scientific and technological development.]. Moscow, 1996. 240 p.
  17. Bulgakov S. M. *Gidroprivodnoy burovoy nasos* [Hydraulic mud pump]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2008, no. 4, pp. 43–47.
  18. "OSNASTKA" NPP (OAO), *oborudovanie nefte- i gazopromyslovoe* ["OSNASTKA" NPP (OJSC), oil and gas production equipment]. Available at: <http://www.milfirm.ru/fc5/firm8793.htm> (accessed 22.09.2021).
  19. Available at: <http://www.burneft.ru/stati/stati-o-vazhnom-v-teke/mechanicheskii-zavod-kalyazinskii-obretaet-vtoryyu-zhizn.html> (accessed 22.09.2021).
  20. Available at: <http://www.drillings.ru/page215> (accessed 22.09.2021).
  21. Available at: <http://www.cortevhdrill.ru/ydx-3a.html> (accessed 22.09.2021).
  22. Kalinin A. G., Levitskiy A. Z., Nikitin B. A. *Tekhnologiya bureniya razvedochnykh skvazhin na nefi i gaz* [Technology of drilling exploration wells for oil and gas]. Moscow, Nedra Publ., 1998. 440 p.
  23. Budnikov V. F., Makarenko P. P., Yur'ev V. A. *Diagnostika i kapital'nyy remont obsadnykh kolonn v neftyanykh i gazovykh skvazhinakh* [Diagnostics and overhaul of casing pipes in oil and gas wells]. Moscow, Nedra Publ., 1997. 226 p.
  24. Bulatov A. I., Kachmar Yu. D., Makarenko P. P., Yaremichuk R. S. *Osvoenie skvazhin* [Well development]. Moscow, OOO "Nedra-Biznesstsentr" Publ., 1999. 473 p.

Надійшла (received) 09.11.2021

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Гасюк Олександр Іванович (Гасюк Александр Иванович, Hasiuk Oleksandr)** – 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/0000-0001-6347-8501>; e-mail: [galexfo@gmail.com](mailto:galexfo@gmail.com)

**Цента Євген Миколайович (Цента Евгений Николаевич, Tsenta Yevhen)** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2607-2294>; e-mail: [tsenta.en@gmail.com](mailto:tsenta.en@gmail.com)

**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](mailto:shevng@ukr.net)