

УДК 622.24+621.694.2

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАДДОЛОТНОГО СТРУЙНОГО НАСОСА ДЛЯ ВРЕМЕННОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПРОДУКТИВНОГО ПЛАСТА

Мельников Александр Павлович<sup>1</sup>,  
m1a1p@yandex.ru

Буглов Николай Александрович<sup>1</sup>,  
bna@istu.edu

<sup>1</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

**Актуальность.** Эффективность нефтегазовых скважин зависит от качества работ на этапе заканчивания скважин, а именно от выполнения первичного вскрытия продуктивного пласта. Одна из главных задач при вскрытии продуктивного пласта – сохранить естественные свойства продуктивного пласта-коллектора. Эту задачу можно решить путем временной изоляции пласта путем кольматации. Идея использовать наддолотный эжектор для измельчения шлама и дальнейшей подачи его на кольмататор с целью временной изоляции продуктивного пласта достаточно интересна. Это позволяет заменить металлоёмкое наземное оборудование, которое используется для подобных задач.

**Цель:** проверка на адекватность полученных ранее уравнений напора струйного насоса как функции от коэффициента инжекции, с учетом возможных смещений сопла (углового и эксцентрического), а также с учетом гидравлических потерь на трение в камере смешения и в диффузоре.

**Объект:** наддолотный эжектор со смещениями рабочего сопла (угловым и радиальным эксцентрическим) относительно оси камеры смешения.

**Методы:** факторное экспериментальное исследование характеристик высоконапорного струйного насоса с помощью разработанной лабораторной установки.

**Результаты.** Предложена методика экспериментального исследования основных характеристик наддолотного струйного насоса. Струйный насос предназначен для измельчения инжектированного шлама непосредственно в камере смешения и дальнейшей подачи его на кольмататор, чтобы обеспечить временную изоляцию призабойной зоны во время первичного вскрытия пласта. Разрушение шлама происходит с помощью рабочей струи, которая направлена на стенку камеры смешения. Направление потока задается угловым и эксцентрическим смещением насадки струйного насоса. Результаты исследования подтвердили адекватность полученных ранее напорных характеристик высоконапорного струйного насоса. В напорных характеристиках учтены геометрические параметры проточной части наддолотного струйного насоса.

### Ключевые слова:

Методика исследования, факторный эксперимент, высоконапорный струйный насос, проверка адекватности, коэффициент напора, лабораторный стенд, экспериментальные данные.

### Введение

Главная причина низкой эффективности струйных насосов в наддолотных эжекторных системах заключается в том, что струйный насос является элементом сложной гидравлической системы [1] и работает в нестационарном режиме [2]. Работа наддолотного струйного насоса зависит от работы других элементов системы очистки забоя, а именно, от работы гидравлической системой гидромониторного долота [3].

Основное преимущество струйных насосов – простота их конструкции, надежность и компактность [4]. Высокая надежность наддолотного эжектора связана с тем, что в его конструкции отсутствуют подвижные элементы [5]. Узконаправленное применение наддолотных эжекторов связано с тем, что при их проектировании не учитываются нестационарные процессы в компоновке низа буровой колонны [6].

В свое время А.В. Лягов и Б.З. Султанов разработали конструкцию забойного шламодробителя, идея которого заключалась в измельчении выбуренного шлама за счет работы струйного насоса [7]. Временная изоляция продуктивных пластов кольматацией реализована по результатам научных трудов Н.А. Шамова, А.В. Лягова, К.И. Халикова, Е.Г. Асеева и

других. Опираясь на этот опыт, была предложена конструкция устройства для бурения со струйным насосом для временной изоляции пласта в процессе первичного вскрытия [8].

Цель экспериментального исследования – проверка на адекватность системы уравнений (4) [9], которая позволяет анализировать влияние (рис. 1) углового (рис. 2) и эксцентрического (рис. 3) смещений рабочего сопла относительно оси камеры смешения [10] на напор струйного насоса, при этом также учитывая потери энергии на гидравлическое трение в проточной части эжектора [11]. Наддолотный эжектор предназначен для разрушения шлама, подачи его на сопло кольмататора [12]. Экспериментальное исследование напорной характеристики струйного насоса позволит получить математическую модель, которая описывается формулами (1)–(3) [13, 14]. Эти зависимости будут использованы для проектирования устройств на основе наддолотного струйного насоса для временной изоляции продуктивных пластов при первичном вскрытии [13]. В предложенном эжекторе дробление шлама происходит за счет смещения рабочего сопла (углового и эксцентрического).

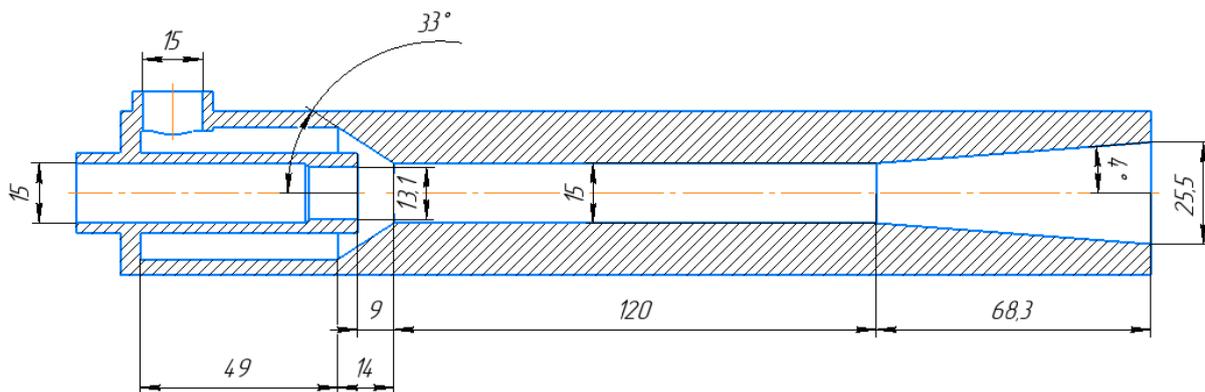


Рис. 1. Основные геометрические размеры струйного насоса  
 Fig. 1. Basic geometric dimensions of the jet pump

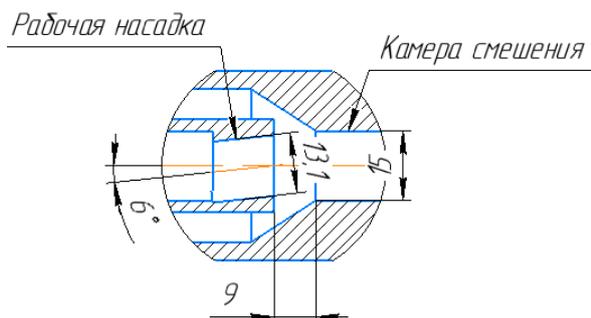


Рис. 2. Угловое смещение рабочей насадки [10]  
 Fig. 2. Angular displacement of the working nozzle [10]

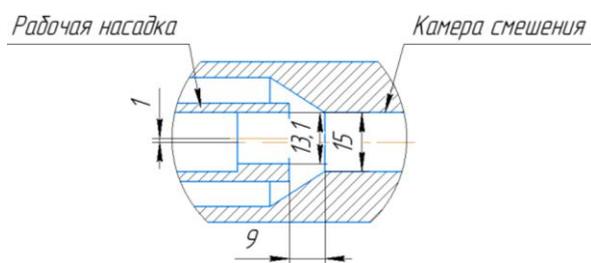


Рис. 3. Эксцентрическое смещение рабочей насадки [10]  
 Fig. 3. Eccentric displacement of the working nozzle [10]

#### Материалы и методы исследования

Методика исследования работы высоконапорного струйного насоса в стационарном режиме заключается в измерении рабочего  $\Delta p_p$  и полезного  $\Delta p_i$  перепадов давления для заданного коэффициента инжекции  $i$  при различных значениях:

- углового смещения  $\alpha$ ;
- эксцентрического смещения  $e$ ;
- гидравлической шероховатости диффузора и камеры смешения  $\Delta$ .

Спланирован дробный факторный эксперимент для проверки полученной ранее системы уравнений, которая позволяет рассчитать основные характеристики струйного насоса.

#### Результаты исследования и их обсуждение

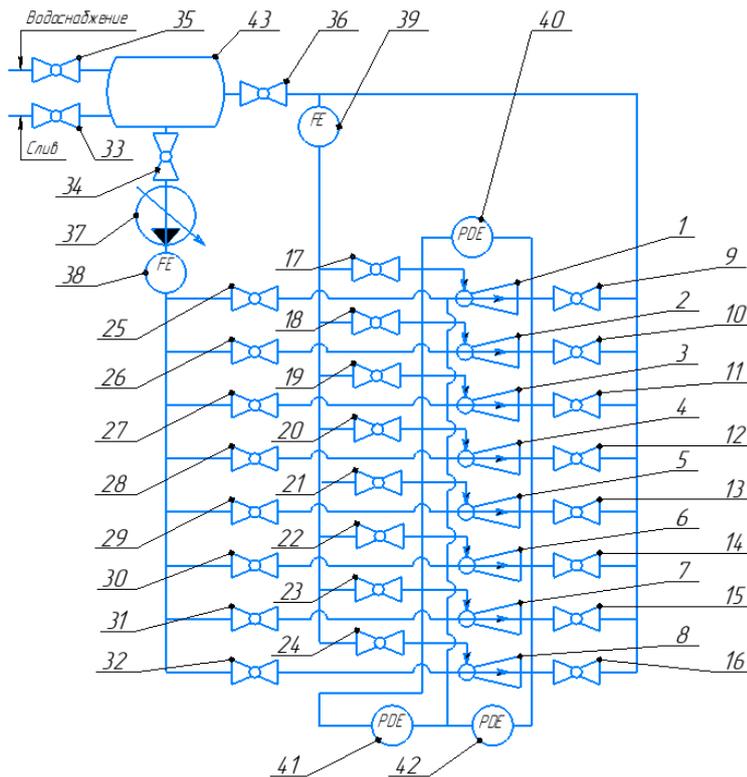
Схема лабораторного стенда для исследования струйного насоса изображена на рис. 4 [10].

Лабораторный стенд (рис. 4) состоит из батареи параллельно соединенных струйных насосов – 1–8. Конструкция струйного насоса – 1, шероховатость проточной части которого  $\Delta=0,02$  мм, показана на рис. 1. Конструкция проточной части струйных насосов – 2–8 отличается от конструкции струйного насоса – 1 смещением рабочей насадки, а также шероховатостью камеры смешения и диффузора согласно плану эксперимента, описанному ниже.

Подача воды (рис. 4) осуществляется с помощью насосной станции – 37, подпор насоса обеспечивает бак – 43 [10]. Регулировка подачи насосной станции осуществляется с помощью органов управления самой станции и шаровых кранов – 25–32. При этом семь из восьми кранов – 25–32 всегда «закрыты» полностью, так как измерение рабочих характеристик струйных насосов производится по одному. Расход рабочего и инжектированных потоков определяют с помощью датчиков – 38, 39. Регулировка инжекции по плану эксперимента осуществляется с помощью шаровых кранов – 17–24, 36. Единственный открытый кран 9–16 должен быть на той же линии, что и открытые краны – 17–24 и 25–32. Перепад давления на струйном насосе измеряют с помощью датчика – 42. Измерение перепада давления  $\Delta p_p = p_p - p_i$  осуществляется с помощью датчика – 41. Измерения полезного перепада давления  $\Delta p_i = p_d - p_i$  осуществляется с помощью датчика – 40.

Перед пуском насосной станции – 37 необходимо убедиться, что: шаровые краны – 34, 36 «открыты»; один из шаровых кранов 25–32 «открыт»; шаровые краны 9–16 «открыты». После первого включения насосной станции необходимо выдерживать определенное время для удаления воздуха из гидравлической системы [10] установки.

Радиальное смещение и поворот сопла струйных насосов – 1–8, а также шероховатость камеры смешения и диффузора [7] указаны в табл. 1.



**Рис. 4.** Схема лабораторного стенда [10]: 1–8 – струйный насос [10]; 9–36 – шаровой кран; 37 – насос; 38, 39 – датчик расхода; 40–42 – датчик дифференциального давления, 43 – подпорный бак

**Fig. 4.** Scheme of the laboratory stand: 1–8 – jet pump; 9–36 – ball valve; 37 – pump; 38, 39 – flow sensor; 40–42 – differential pressure sensor, 43 – backup tank

Технические характеристики лабораторного стенда [10]:  
 Габаритные размеры, мм

- длина ..... 1682
- ширина ..... 2000
- высота ..... 1370

Насос:

- максимальная подача, м<sup>3</sup>/с ..... 0,0072
- максимальный напор, м ..... 246

Струйный насос

- диаметр рабочей насадки, мм ..... 13,1
- диаметр камеры смешивания, мм ..... 15

Контрольно-измерительные приборы:

- датчик дифференциального давления (3 шт.) ..... ЭМИС-БАР 188
- датчик расхода (2 шт.) ..... ВСЭ-М-И 32

Откликом факторного эксперимента является коэффициент напора  $\bar{h}$ :

$$\bar{h} = f(\alpha, e, \Delta, Q_p, i), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угловое смещение рабочей насадки, градусы;  
 $e$  – эксцентрическое смещение рабочей насадки, м;  
 $\Delta$  – гидравлическая шероховатость камеры смешения и диффузора, м;  $Q_p$  – подача рабочей жидкости, м<sup>3</sup>/с;  
 $i$  – коэффициент инжекции.

Кодируем факторы эксперимента:

$$X_1 = \alpha; X_2 = e; X_3 = \Delta; X_4 = Q_p; X_5 = i.$$

Отклик  $\bar{h}$  будем определять по плану измерения (табл. 2).

**Таблица 1.** Геометрические параметры струйных насосов

**Table 1.** Geometric parameters of jet pumps

Порядковый номер струйного насоса на схеме Serial number of a jet pump in the diagram	Угловое смещение рабочей насадки, градусы Angular displacement of the working nozzle $\alpha$ , degrees [10]	Эксцентрическое смещение рабочей насадки, мм Eccentric displacement of the working nozzle $e$ , mm [10]	Шероховатость проточной части камеры смешения и диффузора, мм Roughness of the flow part of the mixing chamber and diffuser $\Delta$ , mm [11]
1	0	0	0,02
2	6	0	0,02
3	0	1	0,02
4	6	1	0,02
5	0	0	0,16
6	6	0	0,16
7	0	1	0,16
8	6	1	0,16

Кодируем факторы эксперимента:

- $X_1 = \alpha; X_{1\min} = 0^\circ \rightarrow -1; X_{1\max} = 6^\circ \rightarrow 1;$
- $X_2 = e; X_{2\min} = 0 \text{ мм} \rightarrow -1; X_{2\max} = 1 \text{ мм} \rightarrow 1;$
- $X_3 = \Delta; X_{3\min} = 0,02 \text{ мм} \rightarrow -1; X_{3\max} = 0,16 \text{ мм} \rightarrow 1;$
- $X_4 = Q; X_{4\min} = 0,0052 \text{ м}^3/\text{с} \rightarrow -1; X_{4\max} = 0,0072 \text{ м}^3/\text{с} \rightarrow 1;$
- $X_5 = i; X_{5\min} = 0,1 \rightarrow -1; X_{5\max} = 0,3 \rightarrow 1.$

Уравнение регрессии для рассматриваемой математической модели имеет вид:

$$\hat{Y} = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + a_5 X_5 + a_{13} X_1 X_3 + a_{14} X_1 X_4 + a_{23} X_2 X_3 + a_{24} X_2 X_4 + a_{34} X_3 X_4 + a_{35} X_3 X_5 + a_{45} X_4 X_5. \quad (2)$$

**Таблица 2.** Дробный факторный эксперимент для пяти факторов

**Table 2.** Fractional factorial experiment for five factors

Номер опыта Experiment number	Факторы Factors					Отклик Response $\hat{Y} = \bar{h}$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	
1	-1	-1	-1	-1	+1	$y_1$
2	+1	-1	-1	-1	-1	$y_2$
3	-1	+1	-1	-1	-1	$y_3$
4	+1	+1	-1	-1	+1	$y_4$
5	-1	-1	+1	-1	+1	$y_5$
6	+1	-1	+1	-1	-1	$y_6$
7	-1	+1	+1	-1	-1	$y_7$
8	+1	+1	+1	-1	+1	$y_8$
9	-1	-1	-1	+1	+1	$y_9$
10	+1	-1	-1	+1	-1	$y_{10}$
11	-1	+1	-1	+1	-1	$y_{11}$
12	+1	+1	-1	+1	+1	$y_{12}$
13	-1	-1	+1	+1	+1	$y_{13}$
14	+1	-1	+1	+1	-1	$y_{14}$
15	-1	+1	+1	+1	-1	$y_{15}$
16	+1	+1	+1	+1	+1	$y_{16}$

Далее выполним полный факторный эксперимент по плану (табл. 2). Для повышения точности эксперимента проведем  $m = 3$  параллельных опытов. Результаты эксперимента и его обработка показана в табл. 3, 4. При обработке экспериментальных данных:

- определено среднее значение отклика  $\bar{y}$ ;
- оценена погрешность измерений в виде дисперсии  $S^2\{\bar{y}\}$ ;
- проверена гипотеза об однородности дисперсии (критерий Кохрена  $G_p$ );
- определена дисперсия воспроизводимости  $S_B^2$ ;
- рассчитано среднее квадратичное отклонение  $S_{\{ak\}}$ ;
- определены коэффициенты для математической модели ( $a_0, a_j, a_{ij}$ );
- определены относительные погрешности определения отклика  $\Delta E_1$  и коэффициента инжекции  $\Delta E_2$ . Значимость коэффициентов математической модели определена с помощью критерия Стьюдента  $t_{pk}$ . Гипотеза об адекватности математической модели проверена с помощью критерия Фишера  $F_p$ .

**Таблица 3.** Результаты измерений

**Table 3.** Measurement results

Номер опыта Experiment number	Факторы в натуральном масштабе Factors on a natural scale						Измеряемые параметры Measured parameters					
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$Q_i$	$\Delta p_{i1}$	$\Delta p_{i2}$	$\Delta p_{i3}$	$\Delta p_{P1}$	$\Delta p_{P2}$	$\Delta p_{P3}$
	градусы degrees	мм/мм		л/с l/s	единицы units	л/с l/s	кПа kPa					
1	0	0	0,02	5,24	0,3	1,57	0,252	0,266	0,279	0,532	0,566	0,611
2	6	0	0,02	5,24	0,1	0,52	0,530	0,558	0,586	0,807	0,858	0,927
3	0	1	0,02	5,24	0,1	0,52	0,433	0,456	0,478	0,710	0,756	0,816
4	6	1	0,02	5,24	0,3	1,57	0,137	0,144	0,151	0,418	0,444	0,480
5	0	0	0,16	5,24	0,3	1,57	0,188	0,197	0,207	0,468	0,497	0,537
6	6	0	0,16	5,24	0,1	0,52	0,400	0,421	0,442	0,678	0,721	0,779
7	0	1	0,16	5,24	0,1	0,52	0,340	0,358	0,376	0,618	0,658	0,711
8	6	1	0,16	5,24	0,3	1,57	0,089	0,094	0,099	0,370	0,394	0,426
9	0	0	0,02	7,22	0,3	2,17	0,461	0,512	0,563	1,056	1,112	1,190
10	6	0	0,02	7,22	0,1	0,72	0,954	1,060	1,166	1,577	1,660	1,776
11	0	1	0,02	7,22	0,1	0,72	0,833	0,925	1,018	1,449	1,525	1,632
12	6	1	0,02	7,22	0,3	2,17	0,255	0,283	0,312	0,839	0,883	0,945
13	0	0	0,16	7,22	0,3	2,17	0,348	0,387	0,426	0,938	0,987	1,056
14	6	0	0,16	7,22	0,1	0,72	0,773	0,859	0,945	1,386	1,459	1,561
15	0	1	0,16	7,22	0,1	0,72	0,630	0,700	0,770	1,235	1,300	1,391
16	6	1	0,16	7,22	0,3	2,17	0,166	0,185	0,203	0,746	0,785	0,840

**Таблица 4.** Факторный эксперимент

**Table 4.** Factorial experiment

Номер опыта Experiment number	Отклик/Response				$S^2\{\bar{y}\}$	$\bar{Y}$	$\Delta E_1, \%^*$	$\Delta E_2, \%^*$
	$\bar{y}_1$	$\bar{y}_2$	$\bar{y}_3$	$\bar{y}$				
1	0,4746	0,4697	0,4566	0,4670	0,0001	0,4612	2,49	0,69
2	0,6574	0,6504	0,6324	0,6467	0,0002	0,6457	1,33	1,74
3	0,6094	0,6030	0,5863	0,5996	0,0001	0,6035	1,58	1,74
4	0,3281	0,3246	0,3156	0,3228	0,0000	0,3124	4,13	0,69
5	0,4012	0,3969	0,3859	0,3947	0,0001	0,3923	3,18	0,69
6	0,5903	0,5841	0,5679	0,5808	0,0001	0,5767	1,69	1,74
7	0,5498	0,5440	0,5289	0,5409	0,0001	0,5346	1,94	1,74
8	0,2412	0,2387	0,2320	0,2373	0,0000	0,2435	5,93	0,69
9	0,4361	0,4604	0,4733	0,4566	0,0004	0,4612	1,28	0,50
10	0,6049	0,6386	0,6565	0,6333	0,0007	0,6457	0,70	1,26
11	0,5747	0,6066	0,6236	0,6016	0,0006	0,6035	0,78	1,26
12	0,3039	0,3208	0,3298	0,3181	0,0002	0,3124	2,10	0,50
13	0,3714	0,3920	0,4030	0,3888	0,0003	0,3923	1,62	0,50
14	0,5578	0,5888	0,6053	0,5840	0,0006	0,5767	0,83	1,26
15	0,5102	0,5386	0,5537	0,5341	0,0005	0,5346	0,99	1,26
16	0,2232	0,2356	0,2422	0,2337	0,0001	0,2435	3,01	0,50

Получена математическая модель для струйного насоса  $k = 1,31$ :

$$\hat{Y} = 0,4712 - 0,0267X_1 - 0,0477X_2 - 0,0345X_3 - 0,1189X_5. \quad (3)$$

Спланированный дробный факторный эксперимент необходим для проверки адекватности системы уравнений:

$$\left[ \begin{aligned} \bar{h} &= \varphi_1^2 \frac{(\cos \alpha)^2}{K} \left[ \begin{aligned} &2\varphi_2 \sqrt{1 + \Delta h} + \\ &+ i^2 a^2 \frac{v_i}{v_p} \frac{2\varphi_2}{K - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{1 + \Delta h}}} - \\ &- (1 + ia)^2 \frac{v_c}{v_p} \frac{(2 - \varphi_3^2)}{K} \end{aligned} \right] - \Delta h; \\ \Delta h &= \frac{\varphi_1^2}{\varphi_4^2} \frac{i^2 a^2}{\left( K - \frac{1}{\sqrt{1 + \Delta h}} \right)^2}; \\ \varphi_2 &= \left[ \begin{aligned} &1 + 0,77 \times \\ &\times \left[ \frac{\Delta}{d_2} + \frac{53,38\eta d_2 \left( 1 + \frac{0,13\tau_0 d_2^3}{\eta Q (1 + ia)} \right)^{0,25}}{\rho_c Q_p (1 + ia)} \right]^{0,25} \end{aligned} \right]^{-0,5}; \\ \varphi_3 &= \left[ \begin{aligned} &1 + 0,01375 (\sin \alpha_3)^{-1} \times \\ &\times \left[ \frac{\Delta}{d_2} + \frac{53,38\eta d_2 \left( 1 + \frac{0,13\tau_0 d_2^3}{\eta Q (1 + ia)} \right)^{0,25}}{\rho_c Q_p (1 + ia)} \right]^{0,25} \times \\ &\times \left[ 1 - \left\{ \frac{d_2}{d_3} \right\}^4 \right] + \sin 2\alpha_3 \left[ 1 - \left\{ \frac{d_2}{d_3} \right\}^2 \right]^2 \end{aligned} \right]^{-0,5}; \\ a &= \left( 1 + \frac{1}{2} \varepsilon^2 \right), \end{aligned} \right. \quad (4)$$

где  $\bar{h}$  – коэффициент напора струйного насоса [15];  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  – коэффициенты потери кинетической энергии на участках струйного насоса [16];  $\alpha$  – поворот рабочего сопла, градусы [17];  $K = \left\{ \frac{d_2}{d_1} \right\}^2$  – геометрический коэффициент [18];  $d_1, d_2, d_3$  – диаметр на выходе рабочей насадки, камеры смешения, на выходе из диффузора соответственно, м [19];  $\Delta h$  – коэффициент потерь энергии в горловине эжектора [5];  $i$  – коэффициент инжекции [5];  $\varepsilon = \frac{2e}{d_2 - d_1}$  – относительное радиальное смещение сопла [10];  $e$  – эксцентриситет сопла, м [10];  $v_p, v_i, v_c$  – удельный объем рабочего, инжектируемого и смешанного потока соответственно, кг/м<sup>3</sup> [5];  $\Delta$  – гидравлическая шероховатость проточной части струйного насоса, м [11];  $\eta$  – абсолютная вязкость бурового раствора, Па·с;  $\tau_0$  –

динамическое напряжение сдвига бурового раствора, Па;  $Q$  – подача рабочей жидкости, м<sup>3</sup>/с [20];  $\rho_c = \frac{1}{v_c}$  – плотность смешанного потока, кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha_3$  – угол расширения диффузора, градусы.

При планировании эксперимента был ограничен пятью факторами с целью его упрощения до рационального объема (16 экспериментальных точек). Свойства рабочей/инжектируемой жидкости, такие как плотность, вязкость и динамическое напряжение сдвига, не вносились в эксперимент, для того чтобы не допустить увеличения объема эксперимента до 256 экспериментальных точек при полном факторном эксперименте. К тому же при анализе системы уравнений (4) было установлено, что максимальный напор струйного насоса, который работает на воде, всего на 2,5 % больше, чем напор струйного насоса, который работает на буровом растворе ( $\rho_c = 1400$  кг/м<sup>3</sup>,  $\tau_0 = 2$  Па,  $\eta = 0,006$  Па·с).

Экспериментальные данные обработаны с помощью критериев Кохрена, Стьюдента и Фишера.

По результатам экспериментального исследования выполнена верификация системы уравнений (4) для струйного насоса ( $K=1,31, d_2=15$  мм,  $d_3=1,7d, \alpha_3=4^\circ$ ). Экспериментальные точки и теоретические кривые показаны на рис. 5. Из графиков видно, что достоверность рассмотренной системы уравнений подтверждена высокой сходимостью расчетных величин с экспериментальными значениями (сходимость результатов в пределах относительной погрешности измерения, которая показана в табл. 4).

Основная погрешность датчика перепада давления  $\pm 0,1$  %. С учетом того, что предел измерения перепада давления равен 3 МПа, погрешность измерения датчика составляет  $\pm 3$  кПа. Данная погрешность справедлива для измерения перепада давления на струйном насосе. Но при измерении рабочего и полезного перепадов давления погрешность будет выше потому, что выносные мембраны датчиков давления расположены на разных уровнях. Разница уровней установки мембран равна 123 мм, что соответствует давлению водяного столба 1,2 кПа. Тогда суммарная погрешность измерения перепадов давления  $\Delta p_p$  и  $\Delta p_i$  будет равна  $\pm 4,2$  кПа. При обработке экспериментальных данных установлено, что максимальная погрешность измерения коэффициента напора равна  $\Delta E_1 = \pm 5,78$  %.

Основная погрешность датчика расхода  $\pm 1$  %. Максимальный измеряемый расход жидкости  $8,3 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с, тогда погрешность измерения датчика составляет  $\pm 8,3 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с. Установлено, что максимальная погрешность измерения коэффициента инжекции равна  $\Delta E_2 = \pm 1,74$  %.

Для переноса результатов экспериментального исследования на рабочий струйный насос используются критерии геометрического подобия, критерий Эйлера, число Рейнольдса, число Фруда.

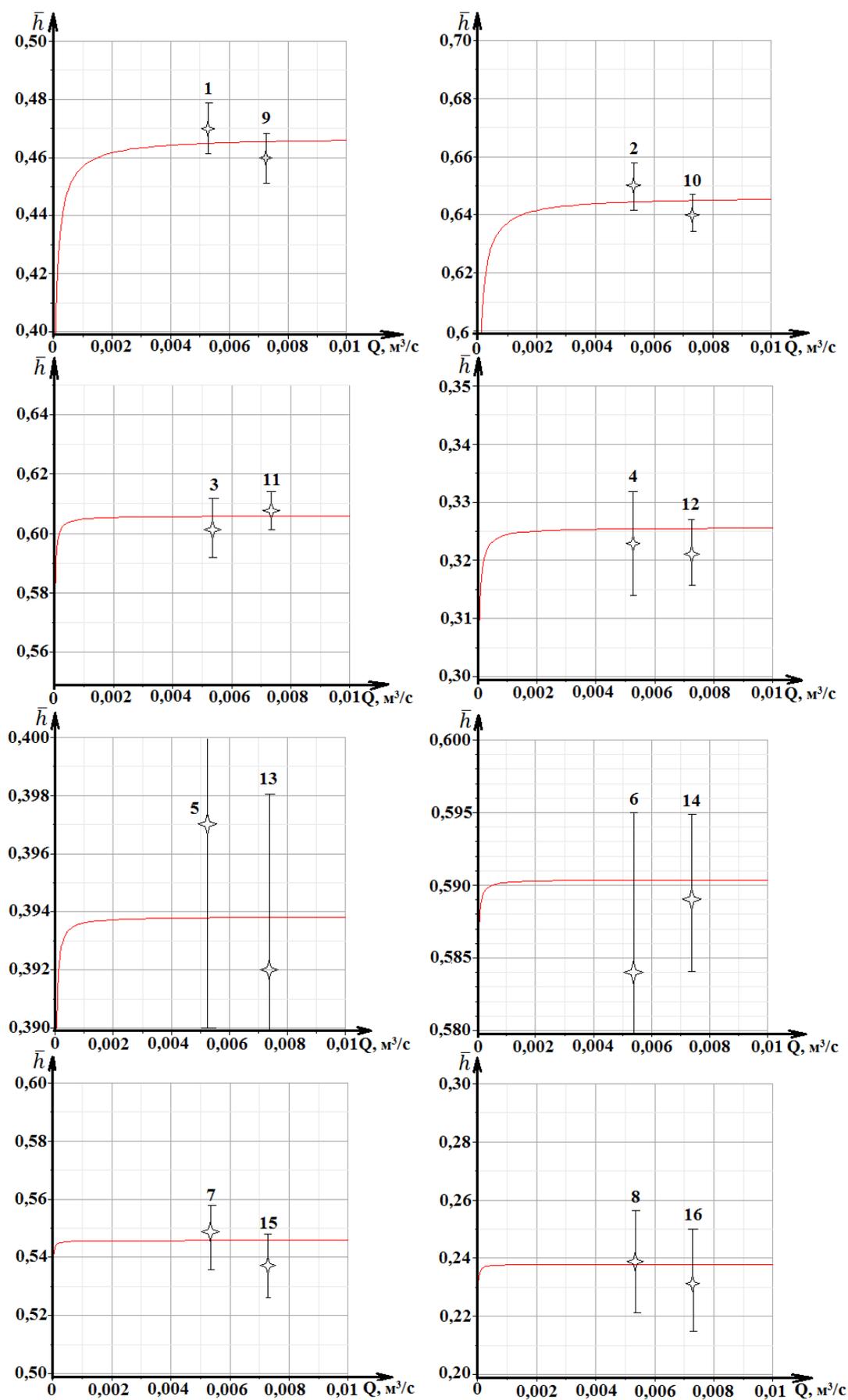


Рис. 5. Результаты эксперимента  
 Fig. 5. Results of the experiment

### Заключение

Экспериментально исследованы характеристики струйного насоса для наддолотного устройства для первичного вскрытия продуктивных пластов. По результатам эксперимента удалось подтвердить адекватность полученной ранее системы уравнений для расчета основных параметров наддолотного эжектора. Раз-

работанные уравнения напора эжектора позволяют определять рабочие параметры струйного насоса, применяемого в компоновке низа буровой колонны [12]. Данная методика может быть использована при разработке и проектировании подобных эжекторных систем для нефтегазовой промышленности, а также в учебном процессе специалистов для нефтегазового дела.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Application of artificial intelligence in predicting the dynamics of bottom hole pressure for under-balanced drilling: extra tree compared with feed forward neural network model / E.E. Okoro, D.I. Olatunji, P. Igbinedion et al. // *Petroleum*. – 2021. DOI: 10.1016/j.petlm.2021.03.001. EDN VWXMFP.
2. Numerical simulation and optimization of injection rates and wells placement for carbon dioxide enhanced gas recovery using a genetic algorithm / S. Liu, B. Sun, H. Li et al. // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – V. 280. – P. 124512. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124512. EDN FVUWXX.
3. Digital well completion solution to complement extreme reservoir contact drilling / K.F. Gordon Goh, V. Gottumukkala, S. Dyer et al. // *International Petroleum Technology Conference 2020*. – Dhahran, 13–15 January 2020. EDN EYOEMR.
4. Megalingam A., Babu V. A numerical investigation of the compressible flow in the ejector of a vapour ejector refrigeration system // *Progress in Computational Fluid Dynamics*. – 2020. – V. 20. – № 1. – P. 29–39. DOI: 10.1504/PCFD.2020.104704. EDN AZZZDL.
5. Applying a variable geometry ejector in a solar ejector refrigeration system / V. Van Nguyen, V. Dvorak, S. Varga et al. // *International Journal of Refrigeration*. – 2020. – V. 113. – P. 187–195. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2020.01.018. EDN SOXBPO.
6. Raza W., Ko G.S., Park Y.C. A study on the combined driven refrigeration cycle using ejector // *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*. – 2021. – P. 2150004. DOI: 10.1142/S2010132521500048. EDN OEIYFJ.
7. Мельников А.П., Буглов Н.А. Обоснование параметров наддолотного струйного насоса для вскрытия продуктивного пласта // *Науки о Земле и недропользовании*. – 2021. – Т. 44. – № 4 (77). – С. 433–440. DOI: 10.21285/2686-9993-2021-44-4-433-440. EDN JSLYNS.
8. Андуганов А.А., Лягов А.В., Агзамов Ф.А. Разработка конструкции эжекторного струйного скважинного насоса для традиционного бурения // *Актуальные проблемы науки и техники-2019: сборник статей, докладов и выступлений XII Международной научно-практической конференции молодых ученых*. – Уфа, 01 июня 2019. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2019. – С. 91–93. EDN KPUDSU.
9. Numerical investigation of the flow field and mass transfer characteristics in a jet slurry pump / Y. Qian, Y. Wang, Z. Fang et al. // *Processes*. – 2021. – V. 9. – № 11. DOI: 10.3390/pr9112053. EDN TYVBDB.
10. Zolper T.J., Cupp A.R., Smith D.L. Investigating the mixing efficiencies of liquid-to-liquid chemical injection manifolds for aquatic invasive species management // *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*. – 2019. – V. 141. – № 3. – P. 031302. DOI 10.1115/1.4041361. EDN NTNFKV.
11. Effect of lower surface roughness on nonlinear hydraulic properties of fractures / J. Li, X. Li, B. Zhang et al. // *Geofluids*. – 2021. – V. 2021. – P. 6612378. DOI: 10.1155/2021/6612378. EDN RDEFIK.
12. Эффективное вскрытие продуктивного пласта при бурении нефтяных и газовых скважин / В.В. Шайдаков, А.П. Мельников, К.В. Чернова, Г.Е. Коробков // *Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР*. – 2018. – № 4. – С. 26–34. DOI: 10.5510/OGP20180400368. EDN YURILZ.
13. Устройство для бурения скважин: пат. на полезную модель № 186817 У1 Российская Федерация, МПК E21B 7/00, F16F 5/00. № 2018138655; заявл. 02.11.2018; опубл. 05.02.2019. EDN DLZKM.
14. Мельников А.П., Шайдаков В.В., Семин В.И. Работа струйного насоса в нестационарных условиях забоя при бурении нефтяных и газовых скважин // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. – 2018. – № 12S. – С. 30–35. DOI: 10.30713/0130-3872-2018-12s-30-35. EDN YYFRCP.
15. Разработка перспективных технологий с применением эжекторных систем и сетчатых турбин / Ю.А. Сазонов, М.А. Мохов, И.В. Грязнова и др. // *Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина*. – 2020. – № 4 (301). – С. 49–60. DOI: 10.33285/2073-9028-2020-4(301)-49-60. EDN NXHMIM.
16. Крыжанивский Е.И., Паневник Д.А. Повышение эффективности использования наддолотных струйных насосов // *Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР*. – 2020. – № 2. – С. 112–118. DOI: 10.5510/OGP20200200437. EDN UPHJXC.
17. Паневник А.В., Концур И.Ф., Паневник Д.А. Определение эксплуатационных параметров наддолотной эжекторной компоновки // *Нефтяное хозяйство*. – 2018. – № 3. – С. 70–73. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-3-70-73. EDN YSWARI.
18. Паневник Д.А., Паневник А.В. Исследование совместной работы струйного и плунжерного насосов с балансирным кривошипно-шатунным приводом // *Нефтяное хозяйство*. – 2020. – № 2. – С. 58–61. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-2-58-61. EDN QMHYPN.
19. Разработка компрессорных технологий с эжекторами высокого давления для добычи нефти и газа / Ю.А. Сазонов, М.А. Мохов, Х.А. Туманян и др. // *Нефтяное хозяйство*. – 2018. – № 5. – С. 78–82. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-5-78-82. EDN XNSWXJ.
20. Депрессионно-волновые и иные средства повышения приемистости и продуктивности скважин / Е.Г. Асеев, Н.А. Шапов, А.В. Лягов и др. // *Проектирование и эксплуатация нефтегазового оборудования: проблемы и решения: Материалы Всероссийской научно-технической конференции*. – Уфа, 04–05 ноября 2004. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2004. – С. 8–13. EDN YYXOTZ.

Поступила: 04.11.2022 г.

Прошла рецензирование: 07.02.2023 г.

### Информация об авторах

**Мельников А.П.**, преподаватель, Иркутский национальный исследовательский технический университет.

**Буглов Н.А.**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой нефтегазового дела, Иркутский национальный исследовательский технический университет.

UDC 622.24+621.694.2

## APPLICATION OF THE METHODOLOGY FOR STUDYING THE CHARACTERISTICS OF A NEAR-BIT JET PUMP FOR TEMPORARY ISOLATION OF A PRODUCTIVE RESERVOIR

Alexander P. Melnikov<sup>1</sup>,  
m1a1p@yandex.ru

Nikolay A. Buglov<sup>1</sup>,  
bna@istu.edu

<sup>1</sup> Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

**Relevance.** The efficiency of oil and gas wells depends on the quality of work at the stage of completion of wells, namely, on the performance of the primary opening of the productive reservoir. One of the main tasks when opening a productive reservoir is to preserve the natural properties of a productive reservoir. This problem can be solved by temporarily isolating the formation by colmatation. The idea of using a jet pump in the layout of the bottom of the drill string for crushing the sludge and further feeding it to the colmatator in order to temporarily isolate the productive reservoir is quite interesting. This makes it possible to replace the metal-intensive ground equipment that is used for such tasks.

**Purpose:** checking the adequacy of the previously obtained dependencies of the jet pump pressure on the injection coefficient, angular and eccentric mixing of the working nozzle, as well as on the roughness of the flow part of the mixing chamber and the diffuser.

**Object:** near-bit jet pump with angular and eccentric displacement of the working nozzle relative to the central axis of the mixing chamber.

**Methods:** factorial experimental study of the characteristics of a high-pressure jet pump using a developed laboratory installation.

**Results.** The authors have proposed the method of experimental investigation of the main characteristics of the near-bit jet pump. The jet pump is designed for crushing the injected sludge directly in the mixing chamber, and further feeding it to the colmatator to provide temporary isolation of the bottomhole zone during the initial opening of the formation. The destruction of the sludge occurs with the help of a working jet, which is directed at the wall of the mixing chamber. The flow direction is set by the angular and eccentric displacement of the jet pump nozzle. The results of the study confirmed the adequacy of the previously obtained pressure characteristics of a high-pressure jet pump. The pressure characteristics take into account the geometric parameters of the flow part of the near-bit jet pump.

### Key words:

Research methodology, factorial experiment, high-pressure jet pump, adequacy check, pressure coefficient, laboratory bench, experimental data.

### REFERENCES

- Okoro E.E., Obomanu T., Sanni S.E., Olatunji D.I., Igbinedion P. Application of artificial intelligent in predicting the dynamics of bottom hole pressure for under-balanced drilling: extra tree compared with feed forward neural network model. *Petroleum*, 2021. DOI: 10.1016/j.petlm.2021.03.001.
- Liu S., Sun B., Li H. Numerical simulation and optimization of injection rates and wells placement for carbon dioxide enhanced gas recovery using a genetic algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 280, p. 124512.
- Gordon Goh F., Gottumukkala V., Dyer S. Digital well completion solution to complement extreme reservoir contact drilling. *K. International Petroleum Technology Conference*. Dhahran, 13–15 January 2020.
- Megalingam A., Babu V. A numerical investigation of the compressible flow in the ejector of a vapour ejector refrigeration system. *Progress in Computational Fluid Dynamics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 29–39. DOI: 10.1504/PCFD.2020.104704.
- Van Nguyen V., Dvorak V., Varga S. Applying a variable geometry ejector in a solar ejector refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, 2020, vol. 113, pp. 187–195.
- Raza W., Ko G.S., Park Y.C. Study on the combined driven refrigeration cycle using ejector. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 2021, pp. 2150004. DOI: 10.1142/S2010132521500048.
- Melnikov A.P., Buglov N.A. Parameter substantiation of supra bit jet pump for productive formation opening. *Earth Sciences and subsurface use*, 2021, vol. 44, no. 4 (77), pp. 433–440. In Rus.
- Anduganov A.A., Lyagov A.V., Agzamov F.A. Razrabotka konstruktsii ezheksionnogo struynogo skvazhinnogo nasosa dlya traditsionnogo bureniya [Design of ejection of the jet well pump for conventional drilling]. *Aktualnye problemy nauki i tekhniki-2019. Sbornik statey, dokladov i vystupleniy XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh* [Actual problems of science and technology. Collection of articles, reports and speeches of the XII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists]. Ufa, Ufa State Petroleum Technical University Publ., 2019. pp. 91–93.
- Qian Y., Wang Y., Fang Z. Numerical investigation of the flow field and mass transfer characteristics in a jet slurry pump. *Processes*, 2021, vol. 9, no. 11. DOI: 10.3390/pr9112053.
- Zolper T.J., Cupp A.R., Smith D.L. Investigating the mixing efficiencies of liquid-to-liquid chemical injection manifolds for aquatic invasive species management. *Journal of Fluids Engineering*, 2019, vol. 141, no. 3, p. 031302.
- Li J., Li X., Zhang B. Effect of lower surface roughness on nonlinear hydraulic properties of fractures. *Geofluids*, 2021, vol. 2021, pp. 6612378.
- Shaidakov V.V., Melnikov A.P., Chernova K.V., Korobkov G.E. Efficient drilling in the oil and gas wells drilling. *SOCAR Proceedings*, 2018, no. 4, pp. 26–34. In Rus.
- Melnikov A.P., Buglov N.A., Ivanishin V.M., Akchurin R.H. *Ustroystvo dlya bureniya skvazhin* Patent RF no. 186817 U, 2019.
- Melnikov A.P., Shaidakov V.V., Semin V.I. Jet pump operation in a bottom hole's non-stationary conditions when drilling oil and gas wells. *Construction of oil and gas wells on land and sea*, 2018, no. 12S, pp. 30–35. In Rus.
- Sazonov Yu.A., Mokhov M.A., Gryaznova I.V. Development of advanced technologies dedicated to ejector systems and mesh turbines. *Proceedings of the Gubkin Russian State University of Oil and Gas*, 2020, no. 4 (301), pp. 49–60. In Rus.
- Kryzhanivsky E.I., Panevnik D.A. Improving use efficiency above bit jet pumps. *Scientific works of NIPi Neftegaz SOCAR*, 2020, no. 2, pp. 112–118. In Rus.
- Panevnik A.V., Kotsur I.F., Panevnik D.A. Determination of operational parameters of near-bit ejector assembly. *Oil industry*, 2018, no. 3, pp. 70–73. In Rus.

18. Panevnik D.A., Panevnik A.V. Investigation of the joint work of a jet and plunger pumps with a balancing crank-rod drive. *Oil industry*, 2020, no. 2, pp. 58–61. In Rus.
19. Sazonov Yu.A., Mokhov M.A., Tumanyan H.A. The development of compressor technologies with high pressure ejectors for oil and gas production. *Oil industry*, 2018, no. 5, pp. 78–82. In Rus.
20. Aseev E.G., Shamov N.A., Lyagov A.V. Depressionno-volnovye i inye sredstva povysheniya priemistosti i produktivnosti skvazhin [Depression-wave and other means of increasing the pick-up and productivity of wells]. *Proektirovanie i ekspluatatsiya nefte-*

*gazovogo oborudovaniya: problemy i resheniya. Materialy Vse-rossiyskoy nauchno-tekhnikeskoy konferentsii* [Design and operation of oil and gas equipment: problems and solutions. Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference]. Ufa, Ufa State Oil Technical University Publ., 2004. pp. 8–13.

*Received: 4 November 2022.*

*Reviewed: 7 February 2023.*

#### **Information about the authors**

*Alexander P. Melnikov*, teacher, Irkutsk National Research Technical University.

*Nikolay A. Buglov*, Cand. Sc., head of the Oil and gas Engineering Department, Irkutsk National Research Technical University.