

УДК 004.942; 622.24
DOI: 10.18799/24131830/2025/8/5196
Шифр специальности ВАК: 2.8.2
Научная статья

Высокоэффективные гидромониторные насадки для буровых долот, армированных резцами PDC

А.Я. Третьяк✉, Е.В. Сидорова, К.В. Кривошеев

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,
Россия, г. Новочеркасск*

✉13050465@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Дан обзор существующих запатентованных гидромониторных насадок, которые получили широкое применение при конструировании породоразрушающего инструмента. В настоящее время важно использование высокоэффективных гидромониторных насадок, при применении которых достигалась бы наибольшая скорость истечения промывной жидкости. Это позволит оптимизировать процесс бурения за счет разрушения горной породы на забое скважины благодаря возникновению гидромониторного эффекта, что, соответственно, улучшит очистку скважины и позволит снизить износ породоразрушающего инструмента. Достигается это за счет того, что струя промывочной жидкости обладает большой кинетической энергией на выходе из насадки, что приводит к изменению давления в порах породы, вследствие чего заключенный в них буровой раствор сжимается–разжимается, происходит гидравлический удар, в результате чего стенки пор, расширяясь, хрупко разрушаются на забое. При применении данных насадок будут снижаться затраты и повышаться рентабельность строительства скважин различного назначения. **Цель.** Разработка конструкции гидромониторной насадки для бурового долота, при использовании которой достигалась бы наибольшая скорость истечения струи бурового раствора, по сравнению с существующими аналогами. **Методы.** Для определения эффективности существующих насадок была разработана гидродинамическая CFD-модель потока бурового раствора в насадке с помощью программы SolidWorks Flow Simulation. Для моделирования истечения промывочной жидкости была выбрана реологическая модель Гершеля–Балкли. Для описания турбулентности задавались такие параметры, как интенсивность и масштаб турбулентности. **Результаты и выводы.** Выполнено моделирование и сравнение существующих запатентованных гидромониторных насадок с предлагаемой. Разработана новая геометрическая форма гидромониторной насадки, показывающая лучшие показатели по сравнению с существующими аналогами.

Ключевые слова: гидромониторная насадка, буровой раствор, реология, конструкция, моделирование

Для цитирования: Третьяк А.Я., Сидорова Е.В., Кривошеев К.В. Высокоэффективные гидромониторные насадки для буровых долот, армированных резцами PDC // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 8. – С. 141–148. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/5196

UDC 004.942; 622.24
DOI: 10.18799/24131830/2025/8/5196
Scientific paper

Highly efficient hydromonitor nozzles for a drill bit reinforced with PDC cutters

A.Ya. Tretyak✉, E.V. Sidorova, K.V. Krivosheev

M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation

✉13050465@mail.ru

Abstract. Relevance. The article gives a review of existing patented hydro-monitor nozzles, which are widely used in the design of rock-destroying tools. Nowadays, it is important to use highly efficient hydro-monitor nozzles, which would achieve

the highest flow rate of flushing fluid. This will optimize drilling by destroying the rock at the bottom of the well due to the emergence of the hydro-monitor effect, which will consequently improve well cleaning and reduce the wear of the rock-destroying tool. This is achieved due to the fact that the jet of washing fluid will have a large kinetic energy at the exit of the nozzle. This leads to a change in pressure in the rock pores, as a result of which the drilling fluid enclosed in them is compressed-tensioned, a hydraulic shock occurs, resulting in the pore walls, expanding, brittle destruction at the bottomhole. Application of these nozzles will reduce costs and increase profitability of construction of wells for various purposes. **Aim.** Development of a design of a jet nozzle for a drill bit, when used, the highest flow rate of the drilling fluid stream would be achieved, compared to existing analogues. **Methods.** To determine the efficiency of existing nozzles, a hydrodynamic CFD model of drilling fluid flow in the nozzle was developed using the SolidWorks Flow Simulation program. The Herschel-Bulkley rheological model was selected for modeling the drilling fluid flow. Such parameters as turbulence intensity and scale were set to describe turbulence. **Results and conclusions.** The authors performed modeling and comparison of existing patented jet nozzles with the proposed one. They developed a new geometric shape of the jet nozzle, showing better performance compared to existing analogues.

Keywords: hydromonitor nozzle, drilling mud, rheology, design, modeling

For citation: Tretyak A.Ya., Sidorova E.V., Krivosheev K.V. Highly efficient hydromonitor nozzles for a drill bit reinforced with PDC cutters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 8, pp. 141–148. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/5196

Введение

Разработка современных высокоэффективных гидромониторных насадок для буровых долот играет важную роль в строительстве нефтяных и газовых скважин. Использование высокоэффективных гидромониторных насадок позволяет увеличить скорость бурения за счет улучшения процесса разрушения горной породы с помощью возникновения гидромониторного эффекта на забое скважины. Это, в свою очередь, повышает общую производительность, что ведет к положительному экономическому эффекту.

Для численного моделирования насадок используются такие программные продукты, как ANSYS FLUENT, ANSYS CFX, COSMOS FLOWWORKS, FLOWVISION, OpenFOAM, SolidWorks Flow Simulation и др. Данные программы позволяют решать гидродинамические задачи истечения промывочной жидкости из гидромониторных насадок породоразрушающего инструмента, получать картины сечений распределения скорости, давления, завихренности, диссипации энергии турбулентности, интенсивности турбулентности, масштаба турбулентности, энергии турбулентности, акустической мощности и многого другого, что позволяет регулировать геометрию конструкций насадок для получения оптимальных показателей механической скорости бурения [1–8].

Оценка работы насадок с помощью CFD-моделей имеет большое количество преимуществ по сравнению с экспериментальным методом, одним из основных является выявление недостатков на этапе проектирования, что дает возможность изменять конструкцию для определения наилучших показателей данной геометрической формы.

Для исследования были использованы четыре гидромониторных насадки, смонтированные на долоте, армированном резцами PDC, диаметром 215,9 мм.

Методы и материалы

Для моделирования истечения промывочной жидкости из гидромониторной насадки буровых долот, армированных резцами PDC, задавались свойства бурового раствора с частично гидролизированным полиакриламидом (Partially Hydrolyzed Polyacrylamide – РНПА) посредством модели Гершеля–Балкли (модифицированный степенной закон) (1), значения параметров которой представлены в табл. 1 [1, 9].

$$\eta = \begin{cases} \eta_0, & \text{если } \tau < \tau_0 \\ \frac{1}{\dot{\gamma}} \left(\tau_0 + k \left(\dot{\gamma}^n - \left(\frac{\tau_0}{\eta_0} \right)^n \right) \right), & \text{если } \tau \geq \tau_0, \end{cases} \quad (1)$$

где τ_0 – предельное напряжение сдвига, Па; η_0 – пластическая вязкость, Па·с, описываемая методом штрафных функций для моделирования жесткоподобного поведения при очень низких скоростях сдвига, с^{-1} , ($\dot{\gamma} \leq \frac{\tau_0}{\eta_0}$), когда напряжение сдвига ниже предельного $\tau \leq \tau_0$. С увеличением скорости деформации вязкость переходит в модель степенного закона после достижения пороговой величины $\tau \geq \tau_0$. Параметр k является коэффициентом консистентности потока, Па·сⁿ; n – показатель степени, характеризующий поведение потока и его отклонение от ньютоновского поведения.

Для описания турбулентности задавались такие параметры, как интенсивность (10 %) и масштаб турбулентности (0,01 м).

В качестве первой основной характеристики турбулентности, называемой интенсивностью турбулентности (2), принимают величину

$$N_m = \frac{\sqrt{\langle v' \rangle^2}}{v}, \quad (2)$$

где v' – пульсационная добавка скорости, представляющая собой разность между истинной ско-

ростью v в точке и осредненной скоростью ($v' = v - \bar{v}$, $v'_x = v_x - \bar{v}_x$, $v'_y = v_y - \bar{v}_y$, $v'_z = v_z - \bar{v}_z$).

Таблица 1. Свойства бурового раствора [1]

Table 1. Properties of drilling mud [1]

Параметр Parameter	Обозначение Designation	Единица измерения Unit of measurement	Величина Value
Плотность/Density	ρ	кг/м ³ /kg/m ³	1450
Пластическая вязкость при низких скоростях сдвига Plastic viscosity at low shear rates	η_0	Па·с/Pa·s	0,01613
Предельное напряжение сдвига Ultimate shear stress	τ_0	Па/Pa	0,294
Коэффициент консистентности Consistency coefficient	k	Па·с ⁿ /Pa·s ⁿ	0,439
Показатель степени, характеризующий поведение потока Exponent characterizing the behavior of a flow	n	–	0,587

Пульсационные добавки скорости имеют положительные и отрицательные значения и являются случайными функциями от времени и координат. В ряде важных практических задач с достаточным приближением можно считать, что они подчиняют-

ся нормальному закону Гаусса о распределении вероятности.

Второй основной характеристикой турбулентности является линейная величина L , определяющая средний размер (в каком-либо направлении) области связанных между собой пульсаций скорости и называемая масштабом турбулентности. В прямоугольной системе координат масштаб L , например, по направлению оси ou выражается так:

$$L_\eta = \int_0^\infty \frac{\overline{v'_{1x} v'_{2x}}}{\sqrt{(\overline{v'_{1x}})^2} \sqrt{(\overline{v'_{2x}})^2}} d\eta,$$

где η – расстояние между точками 1 и 2 по оси ou или параллельной ей оси.

Для численного моделирования в программе SolidWorks Flow Simulation задавались такие граничные условия, как объемный расход $Q=0,008$ м³/с, что эквивалентно входной скорости, равной 28 м/с, и давление окружающей среды на выходе из насадки. Для проведения расчетов математической модели была создана сетка, содержащая 100 тыс. ячеек. На границе стенок насадки и бурового раствора был создан пограничный слой [10–14].

Для обоснования эффективности гидромониторной насадки авторами были взяты для сравнения четыре запатентованные насадки, применяемые в породоразрушающем инструменте (рис. 1, табл. 2).

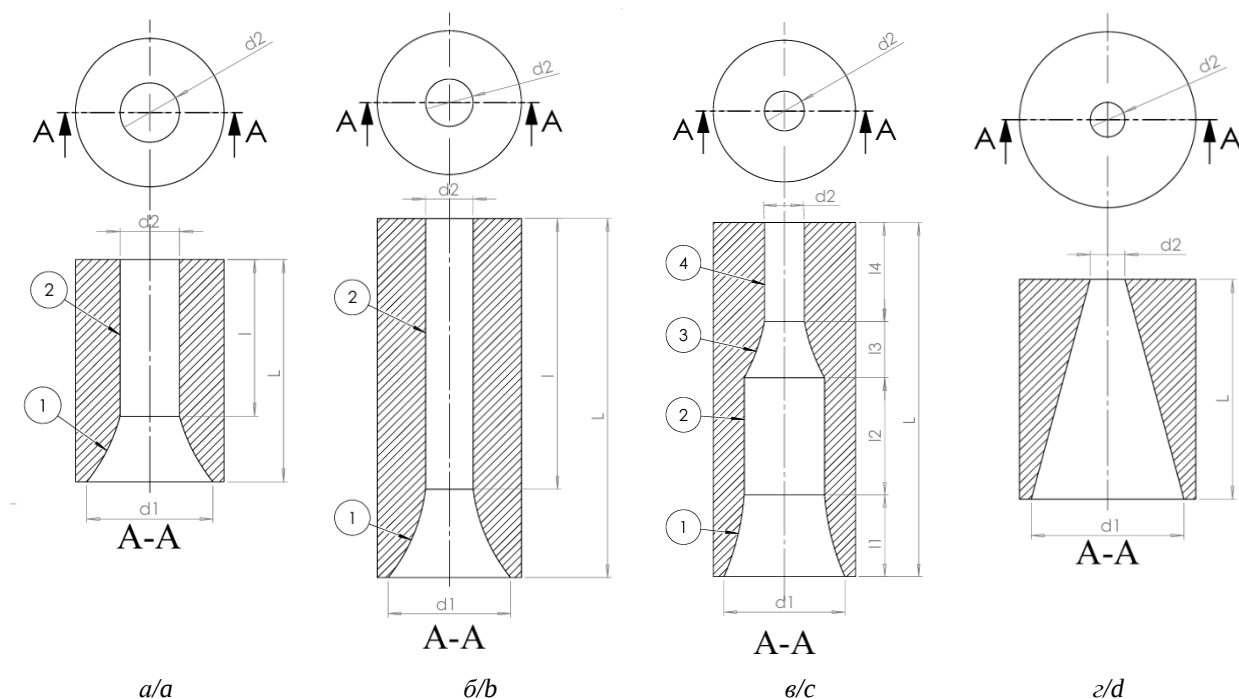


Рис. 1. Рисунки запатентованных насадок: а) RU 2021471; б) RU 2085696; в) RU 2122102; г) RU 2393323
Fig. 1. Patented nozzle drawings: а) RU 2021471; б) RU 2085696; в) RU 2122102; г) RU 2393323

Таблица 2. Размеры рассматриваемых запатентованных насадок

Table 2. Dimensions of the patented attachments under consideration

№ изобретения Invention no.	d_1	d_2	L	l
	мм/мм			
RU 2021471	17	8	34	25
RU 2085696	17	6,6	50	37,7
RU 2122102	17	5,6	50	–
RU 2393323	25,5	8	30	–

Гидромониторная насадка для бурового долота [2], рис. 1, а. Внутренняя часть гидромониторной насадки представляет собой усеченный конус – 1, примыкающий к прямолинейному участку – 2.

Удлиненная гидромониторная насадка бурового инструмента [3], рис. 1, б. Геометрический профиль данной насадки аналогичен профилю, представленному в [2]. Отличительной особенностью является то, что насадка выполнена удлиненной и имеет плавный переход от конической части – 1 к прямолинейному участку – 2, благодаря которому происходит стабилизация потока промывочной жидкости.

Гидромониторная насадка бурового долота [4], рис. 1, в. Данная гидромониторная насадка имеет

переменное сечение, в начале насадки находится коническое сужение – 1 ($l_1=11,5$ мм), примыкающее к прямолинейному участку – 2 ($l_2=16,5$ мм), затем снова расположено коническое сужение – 3 ($l_3=7$ мм), примыкающее к прямолинейному участку – 4 ($l_4=14$ мм).

Насадка гидромониторного долота [5], рис. 1, г. Представляет усеченный конус.

Результаты исследования и их обсуждение

Целью данной работы является рассмотрение существующих запатентованных гидромониторных насадок и разработка конструкции гидромониторной насадки для бурового долота, при использовании которой достигалась бы наибольшая скорость истечения струи бурового раствора из насадки по сравнению с существующими аналогами.

Рассмотрим существующие аналоги.

В данной части работы рассмотрены результаты численного моделирования запатентованных насадок.

Гидромониторная насадка для бурового долота [2]. Была разработана модель данной гидромониторной насадки и проведено моделирование проходящего потока промывочной жидкости через гидромониторную насадку для бурового долота рис. 2, а.

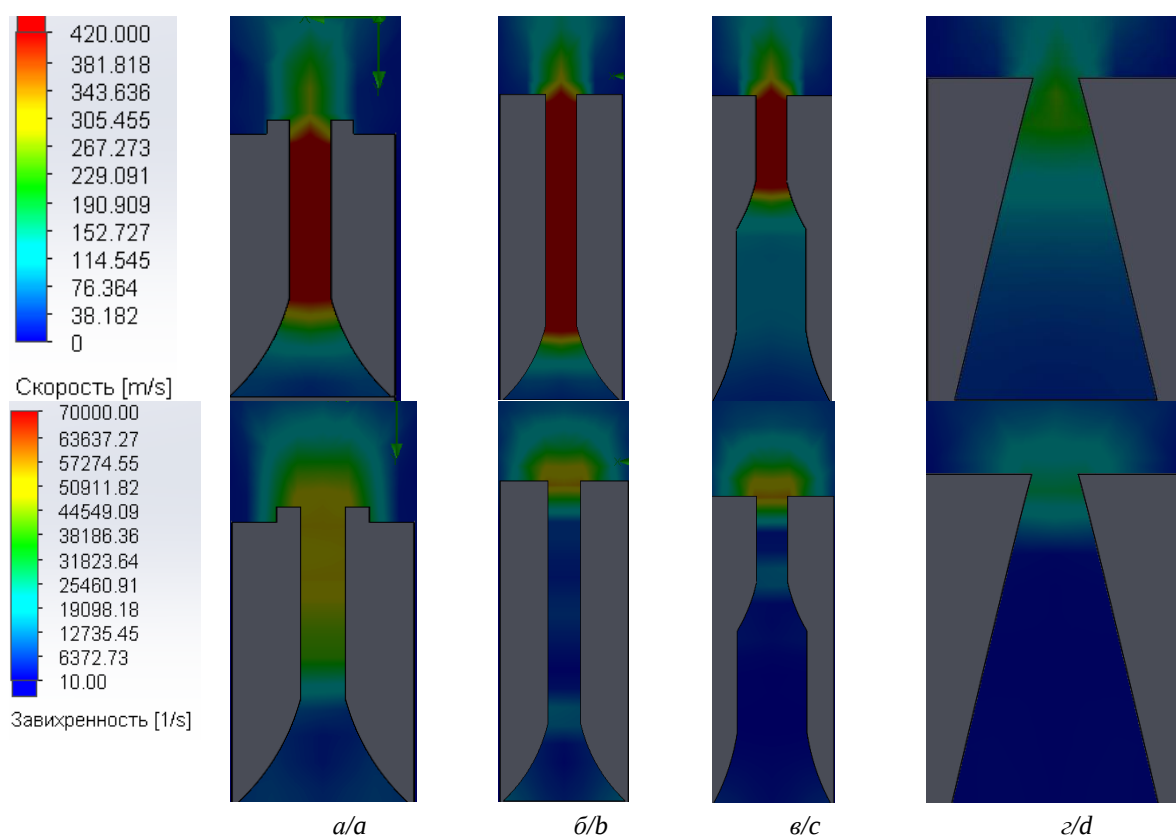


Рис. 2. Картина сечения распределения скорости и завихренности гидромониторной насадки для бурового долота: а) [2]; б) [3]; в) [4]; г) [5]

Fig. 2. Picture of the cross-section of the velocity and vorticity distribution of a hydraulic monitor nozzle for a drill bit: а) [2]; б) [3]; в) [4]; г) [5]

Недостатком данной гидромониторной насадки является отсутствие плавного перехода между конической частью и прямолинейным участком, из-за чего возникают гидравлические потери, которые снижают скорость потока промывочной жидкости.

По результатам моделирования средняя скорость истечения промывочной жидкости на выходе из насадки составляет 320 м/с. Также проводилось моделирование завихренности для определения гидравлических потерь, связанных с геометрической формой. Из картины сечений видно, что на протяжении всей длины прямолинейного участка возникают сильные завихренности, равные порядка 56000 с^{-1} , что не позволяет достигать высокой скорости исходящей струи бурового раствора

Удлиненная гидромониторная насадка бурового инструмента [3], рис. 2, б. По результатам моделирования средняя скорость истечения промывочной жидкости на выходе из насадки составляет 334 м/с. Гидравлические потери возникают внутри насадки в меньшей степени, чем у предыдущего образца, из-за более плавного перехода и более длинного прямолинейного участка, в котором происходит стабилизация потока, завихренность внутри насадки равна порядка 44000 1/с .

Гидромониторная насадка бурового долота [4], рис. 2, в. Недостатком данной гидромониторной насадки является резкий переход от первого прямолинейного участка ко второму, где возникают гидравлические потери, влияющие на выходную скорость бурового раствора. Завихренность внутри насадки достигает порядка 25000 с^{-1} .

Важно отметить, что насадка состоит из двух конических сужений, соединенных между собой прямолинейными участками. Благодаря данной конструкции происходит постепенное формирование высокоскоростной струи бурового раствора, средняя скорость истечения промывочной жидкости на выходе из насадки достигает 395 м/с.

Насадка гидромониторного долота [5], рис. 2, г. По результатам моделирования средняя скорость истечения промывочной жидкости на выходе из насадки составляет 381 м/с. Гидравлические потери возникают внутри насадки, завихренность равна порядка 30000 с^{-1} .

Для сравнения насадок между собой авторы использовали размеры входного и выходного отверстия, для того чтобы можно было определить, благодаря чему достигается увеличение скорости потока. Диаметр входного отверстия равен 19 мм, а диаметр выходного отверстия выбирался равным 5 мм. Средняя скорость замерялась непосредственно на выходе из насадки. Результаты моделирования приведены в табл. 3.

На основании [4] была усовершенствована геометрическая форма и предложена новая гидро-

мониторная насадка, имеющая геометрическую форму (рис. 3), включающую в себя два радиуса, соединенные по касательной, задающие кривизну поверхности, и прямолинейный участок, являющийся выходным отверстием. Насадка является удлиненной и имеет длину $L=46 \text{ мм}$. На рис. 5 представлена оптимальная геометрическая форма насадок с выходным отверстием равным 5 мм.

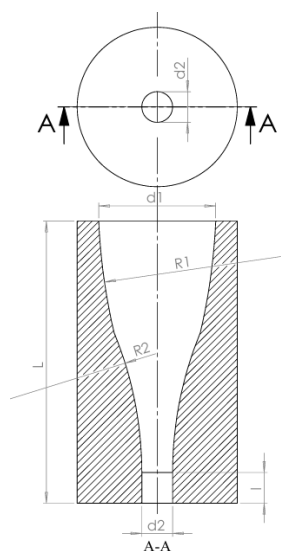


Рис. 3. Чертеж предлагаемой гидромониторной насадки с оптимально подобранными радиусами искривления к выходному отверстию равному 5 мм

Fig. 3. Drawing of the proposed hydromonitor nozzle with optimally selected radii of curvature to the outlet opening equal to 5 mm

При выходном отверстии (d_2) равном 5 мм радиусы искривления R_1 и R_2 равны 100 и 60 мм соответственно. На рис. 4 представлено распределение завихренности (а) и скорости (б) потока в сечении предлагаемой гидромониторной насадки.

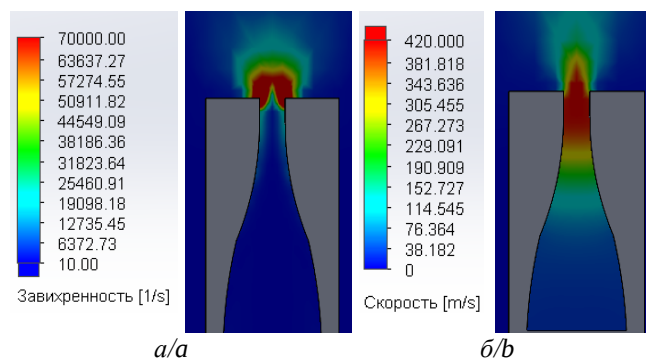


Рис. 4. Картина сечения распределения: а) завихренности потока; б) скорости потока

Fig. 4. Picture of the cross-section distribution: а) flow vorticity; б) flow velocity

Таблица 3. *Скорость промывочной жидкости запатентованных насадок и предлагаемой насадки*

Table 3. *Speed of the flushing liquid of the patented nozzles and suggested nozzle*

№ изобретения Invention no.	2021471	2085696	2122102	2393323	Предлагаемая насадка Suggested nozzle
Скорость на выходе из насадки, м/с Speed at nozzle outlet, m/s	320	334	395	381	420
Среднее значение завихренности внутри насадки, С ⁻¹ Average vorticity value inside the packing, S ⁻¹	56000	44000	25000	30000	27000
Эффективность предлагаемых насадок по сравнению с существующими образцами, % Efficiency of the proposed nozzles compared to existing samples, %	31,3	25,7	6,3	10,2	0

Скорость на выходе из насадки составляет 420 м/с. Предлагаемая насадка с диаметром выходного отверстия равными 5 мм превосходит существующие аналоги, рассмотренные в работе. За счет усовершенствованного профиля насадки была снижена турбулентность (завихренность равна по-

рядка 27000 с⁻¹) внутри насадки и, соответственно, гидравлические потери потока бурового раствора внутри самой насадки, что позволило получить большую скорость на выходе по сравнению с аналогами. При этом высокие значения завихренности достигаются только на выходе из насадки (табл. 3).

Эффективность предлагаемых насадок рассчитывалась по формуле:

$$\Xi = \left(\frac{v_n}{v_a} \cdot 100 \right) - 100, [\%],$$

где v_n – скорость предлагаемой насадки; v_a – скорость насадок аналогов [15–20].

Выводы

1. По результатам CFD-моделирования выхода бурового раствора из гидромониторных насадок бурового долота получено распределение поля скорости и завихренности потока для различных существующих профилей насадок.
2. Определен оптимальный профиль гидромониторной насадки, имеющий радиусы искривления R_1 и R_2 , равные 100 и 60 мм, и выходное отверстие 5 мм, позволяющее снизить гидравлические потери, что даёт возможность получить среднюю скорость истечения промывочной жидкости 420 м/с, что значительно выше, чем у рассмотренных аналогов, при условии одинаковых диаметров входных и выходных отверстий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леушева Е.Л., Алиханов Н.Т., Бровкина Н.Н. Исследование реологических свойств безбаритного бурового раствора повышенной плотности // Записки Горного института. – 2022. – Т. 258. – С. 976–985. DOI: 10.31897/PMI.2022.38.
2. Гидромониторная насадка для бурового долота: пат. № 2021471, Российская Федерация, С1; заявл. 11.04.1989; опубл. 15.10.1994.
3. Удлиненная гидромониторная насадка бурового инструмента: пат. № 2085696, Российская Федерация, С1; заявл. 23.11.1994; опубл. 27.07.1997.
4. Гидромониторный насадок бурового долота: пат. № 2122102, Российская Федерация, С1; заявл. 25.08.1997; опубл. 20.11.1998.
5. Насадка гидромониторного долота: пат. № 2393323, Российская Федерация, С1; заявл. 04.05.2009; опубл. 27.06.2010.
6. Краева Е.Н., Мулярчик И.Г., Артемов А.В. Экспериментальное исследование истечения жидкости через насадки и сравнение с результатами гидродинамического моделирования // Молодежный научно-технический вестник. – 2013. – № 12. – С. 11.
7. Исследование влияния геометрии поперечного сечения гидромониторных насадок на их работоспособность / Д.Ю. Сериков, А.В. Мурадов, Д.А. Борейко, Л.О. Лауденшлегер // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2023. – № 1 (310). – С. 153–161. DOI: 10.33285/2073–9028-2023-1(310)-153–161.
8. Моделирование характеристик при истечении недогретой жидкости из геометрически подобных сопел Лавалья / О.О. Мильман, А.С. Голдин, Б.А. Шифрин, В.Б. Перов, А.В. Птахин, В.С. Крылов, А.В. Кондратьев // Инженерно-физический журнал. – 2024. – Т. 97. – № 5. – С. 1301–1315.
9. Современные направления совершенствования бурового инструмента типа PDC / В.В. Нескормных, Б. Лиу, Ч. Чжаоран, П.Г. Петенев, М.С. Попова, А.Е. Головченко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 5. – С. 60–69. DOI: 10.18799/24131830/2021/5/3186.
10. Хламов В.А., Борейко Д.А. Имитационное гидродинамическое моделирование потока жидкости, истекающей из эжекционных насадок бурового калибратора-эжектора // Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений, транспорта и переработки трудноизвлекаемых запасов тяжелых нефтей: Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Ухта, 07–08 ноября 2024. – Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2024. – С. 253–258.
11. Голдаевич С.А., Сажина О.В. Проблемы, возникающие при истечении жидкости через насадки // Актуальные проблемы науки и техники. 2024: Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону, 19–21 марта 2024. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2024. – С. 199–200.

12. Закиров А.Х. Истечение жидкости из насадок, присоединенных к отверстию // Всероссийская конференция по математике и механике: Сборник материалов конференции. Посвящается 145-летию Томского государственного университета и 75-летию механико-математического факультета. – Томск, 02–05 октября 2023. – Томск: Общество с ограниченной ответственностью "СТТ", 2023. – С. 224–226.
13. Modeling the characteristics during the flow of a subcooled liquid out of geometrically similar laval nozzles / O.O. Milman, A.S. Goldin, B.A. Shifrin, V.B. Perov, A.V. Ptakhin, V.S. Krylov, A.V. Kondratev // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2024. – Vol. 97. – № 5. – P. 1296–1312. DOI: 10.1007/s10891-024-03003-z.
14. Submerged gas jet in liquid cross flow: modeling and flow structures analysis / P. Dong, K. Wang, D. Cheng, B. Lu // Ocean Engineering. – 2021. – Vol. 242. – P. 110128. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.110128.
15. Contribution to the modeling of the interaction between a plasma flow and a liquid jet / S. Vincent, G. Balmigere, C. Caruyer, E. Meillot, J.P. Caltagirone // Surface and Coatings Technology. – 2009. – Vol. 203. – № 15. – P. 2162–2171. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2008.11.009.
16. Modeling of gas jet flow into a liquid bath using the inhomogeneous poly-dispersed method / X. Qu, Yi. Zhang, X. Qi, Q. Guo // Progress in Nuclear Energy. – 2021. – Vol. 137. – P. 103773. DOI: 10.1016/j.pnucene.2021.103773.
17. Balasubramanyam M.S., Chen C.P. Modeling liquid jet breakup in high speed cross-flow with finite-conductivity evaporation // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2008. – Vol. 51. – № 15-16. – P. 3896–3905. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.11.054.
18. Effect of grinding nozzles pressure on particle and fluid flow patterns in a spiral jet mill / L. Scott, A. Borissova, A. Burns, M. Ghadiri // Powder Technology. – 2021. – Vol. 394. – P. 439–447. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.07.090.
19. Wilhelmsen Ø., Aasen A. Choked liquid flow in nozzles: crossover from heterogeneous to homogeneous cavitation and insensitivity to depressurization rate // Chemical Engineering Science. – 2022. – Vol. 248. – P. 117176. DOI: 10.1016/j.ces.2021.117176.
20. Study of liquid-liquid two-phase flow in hydrophilic nanochannels by molecular simulations and theoretical modeling / S. Zhan, Y. Su, W. Wang, Y. Hao, L. Li, Z. Jin, M. Zhang // Chemical Engineering Journal. – 2020. – Vol. 395. – P. 125053. DOI: 10.1016/j.cej.2020.125053.

Информация об авторах

Третьяк Александр Яковлевич, доктор технических наук, профессор кафедры нефтегазовых техники и технологий Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова, Россия, 346400, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, 13050465@mail.ru

Сидорова Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых техники и технологий Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова, Россия, 346400, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, sidorova_ev@npi-tu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8898-0909>

Кривошеев Кирилл Владимирович, студент кафедры нефтегазовых техники и технологий Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова, Россия, 346400, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, 210506.tbn@mail.ru

Поступила в редакцию: 02.06.2025

Поступила после рецензирования: 11.06.2025

Принята к публикации: 30.06.2025

REFERENCES

1. Leusheva E.L., Alikhanov N.T., Brovkina N.N. Study of the rheological properties of barite-free drilling fluid of high density. *Notes of the Mining Institute*, 2022, vol. 258, pp. 976–985. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2022.38.
2. Ilkovsky A.I., Volodin V.A., Makushev F.I. *Hydraulic monitor attachment for drill bit*. Patent RF, no. 2021471, 1994. (In Russ.)
3. Agoshashvili T.G., Urale V.B., Korablev G.A., Buyanovskiy I.N., Kryuchkov V.P. *Extended hydromonitor nozzle for drilling tool*. Patent RF, no. 2085696, 1997. (In Russ.)
4. Kalishin I.S., Sheshukov A.I., Eshimov G.K., Orlikovsky A.N. *Hydraulic drill bit attachment*. Patent RF, no. 2122102, 1998. (In Russ.)
5. Annenkov A.A., Budyukov Yu.E. *Nozzle of a hydromonitor chisel*. Patent RF, no. 2393323, 2010. (In Russ.)
6. Kraeva E.N., Mulyarchik I.G., Artemov A.V. Experimental study of fluid outflow through nozzles and comparison with the results of hydrodynamic modeling. *Youth Scientific and Technical Bulletin*, 2013, no. 12, p. 11. (In Russ.)
7. Serikov D.Yu., Muradov A.V., Boreiko D.A., Laudenshleger L.O. Study of the influence of the cross-sectional geometry of hydromonitor nozzles on their performance. *Proceedings of the Gubkin Russian State University of Oil and Gas*, 2023, no. 1 (310), pp. 153–161. (In Russ.) DOI: 10.33285/2073–9028-2023-1(310)-153–161.
8. Milman O.O., Goldin A.S., Shifrin B.A., Perov V.B., Ptakhin A.V., Krylov V.S., Kondratyev A.V. Modeling characteristics of subcooled liquid flow from geometrically similar Laval nozzles. *Engineering Physics Journal*, 2024, vol. 97, no. 5, pp. 1301–1315. (In Russ.)
9. Neskromnykh V.V., Liu B., Zhaoran Z., Petenev P.G., Popova M.S., Golovchenko A.E. Modern directions of improvement of PDC drilling tool. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 5, pp. 60–69. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/5/3186.
10. Khlamov V.A., Boreiko D.A. Simulation hydrodynamic modeling of liquid flow flowing out of ejector nozzles of a drilling calibrator-ejector. *Problems of geology, development and operation of fields, transportation and processing of hard-to-recover reserves of heavy oils. Proceedings of the All-Russian scientific and technical conference with international participation*. Ukhta, November 7–8, 2024. Ukhta, Ukhta State Technical University Publ., 2024. pp. 253–258. (In Russ.)

11. Goldaevich S.A., Sazhina O.V. Problems arising during liquid flow through nozzles Actual problems of science and technology. *Proceedings of the All-Russian (National) Scientific and Practical Conference*. Rostov-on-Don, March 19–21, 2024. Rostov-on-Don, Don State Technical University Publ., 2024. pp. 199–200. (In Russ.)
12. Zakirov A.Kh. Liquid outflow from nozzles attached to an opening. *All-Russian Conference on Mathematics and Mechanics: Conference Proceedings. Dedicated to the 145th anniversary of Tomsk State University and the 75th anniversary of the Mechanics and Mathematics Faculty*. Tomsk, October 02–05, 2023. Tomsk, STT Publ., 2023. pp. 224–226. (In Russ.)
13. Milman O.O., Goldin A.S., Shifrin B.A., Perov V.B., Ptakhin A.V., Krylov V.S., Kondratev A.V. Modeling the characteristics during the flow of a subcooled liquid out of geometrically similar laval nozzles. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2024, vol. 97, no. 5, pp. 1296–1312. DOI: 10.1007/s10891-024-03003-z.
14. Dong P., Wang K., Cheng D., Lu B. Submerged gas jet in liquid cross flow: Modeling and flow structures analysis. *Ocean Engineering*, 2021, vol. 242, pp. 110128. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.110128.
15. Vincent S., Balmigere G., Caruyer C., Meillot E., Caltagirone J.P. Contribution to the modeling of the interaction between a plasma flow and a liquid jet. *Surface and Coatings Technology*, 2009, vol. 203, no. 15, pp. 2162–2171. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2008.11.009.
16. Qu X., Zhang Yi., Qi X., Guo Q. Modeling of gas jet flow into a liquid bath using the inhomogeneous poly-dispersed method. *Progress in Nuclear Energy*, 2021, vol. 137, pp. 103773. DOI: 10.1016/j.pnucene.2021.103773.
17. Balasubramanyam M.S., Chen C.P. Modeling liquid jet breakup in high speed crossflow with finite-conductivity evaporation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, vol. 51, no. 15–16, pp. 3896–3905. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.11.054.
18. Scott L., Borissova A., Burns A., Ghadiri M. Effect of grinding nozzles pressure on particle and fluid flow patterns in a spiral jet mill. *Powder Technology*, 2021, vol. 394, pp. 439–447. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.07.090.
19. Wilhelmsen Ø., Aasen A. Choked liquid flow in nozzles: crossover from heterogeneous to homogeneous cavitation and insensitivity to depressurization rate. *Chemical Engineering Science*, 2022, vol. 248, pp. 117176. DOI: 10.1016/j.ces.2021.117176.
20. Zhan S., Su Y., Wang W., Hao Y., Li L., Jin Z., Zhang M. Study of liquid-liquid two-phase flow in hydrophilic nanochannels by molecular simulations and theoretical modeling. *Chemical Engineering Journal*, 2020, vol. 395, pp. 125053. DOI: 10.1016/j.cej.2020.125053.

Information about the authors

Alexander Ya. Tretyak, Dr. Sc., Professor, M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132, Prosvesvcheniya street, Novocherkassk, 346400, Russian Federation. 13050465@mail.ru

Elena V. Sidorova, Cand. Sc., Associate Professor, M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132, Prosvesvcheniya street, Novocherkassk, 346400, Russian Federation. sidorova_ev@npi-tu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8898-0909>

Kirill V. Krivosheev, Student, M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132, Prosvesvcheniya street, Novocherkassk, 346400, Russian Federation. 210506.tbn@mail.ru

Received: 02.06.2025

Revised: 11.06.2025

Accepted: 30.06.2025