ISSN 2712-8008
Том / Volume 25 №4 2025
Домашняя страница журнала: https://ered.pstu.ru/index.php/geo
НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 622.24
Статья / Article
© ПНИПУ / PNRPU, 2025

Параметрический анализ эффективности замещения бурового раствора в процессе цементирования хвостовика с вращением при ненулевом эксцентриситете

Р.И. Шафигуллин[1], А.Х. Сафаров[2], Н.В. Дубиня[3,4], Е.В. Новикова[3], И.Г. Фаттахов[2], И.А. Васильев[3]

[1]ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина (Российская Федерация, 423450, г. Альметьевск, ул. Ленина, 75а)
[2]Институт «ТатНИПИнефть» ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина (Российская Федерация, 423462, г. Альметьевск, ул. Советская, 186А)
[3]Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН) (Российская Федерация, 123242, г. Москва, ул. Б. Грузинская, 10, стр. 1)
[4]Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет)
(Российская Федерация, 125190, г. Москва, Ленинский пр., 80, корп. 5)

Parametric Analysis of Drilling Fluid Displacement Efficiency during Liner Cementing with Rotation at Non-Zero Eccentricity

Rinat I. Shafigullin[1], Albert Kh. Safarov[2], Nikita V. Dubinya[3,4], Elena V. Novikova[3], Irik G. Fattakhov[2], Ivan A. Vasilev[3]

[1]PJSC TATNEFT named after V.D. Shashin (75a Lenina st., Almetyevsk, 423450, Russian Federation)
[2]TatNIPIneft R&D Institute of the PJSC TATNEFT named after V.D. Shashin (186a Sovetskaya st., Almetyevsk, 423462, Russian Federation)
[3]Schmidt Institute of physics of the Earth of the Russian academy of sciences (Build. 1, 10 B. Gruzinskaya st., Moscow, 123242, Russian Federation)
[4]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University) (Build. 5, 80 Leninsky av., Moscow, 125190, Russian Federation)

Получена / Received: 02.06.2025. Принята / Accepted: 31.10.2025. Опубликована / Published: 21.11.2025

Ключевые слова:
бурение, цемент, буровой раствор, центратор, вращение, аналитические решения.

Вытеснение или «продавка» бурового раствора является типовой и наиболее часто повторяющейся операцией в процессе крепления стенок скважины. Замещение бурового раствора цементным в затрубном пространстве осуществляется с соблюдением режима движения раствора, который характеризуется реологическими свойствами замещаемой и замещающей жидкостей, разницей плотностей между буровым и цементным растворами, конструкционными особенностями скважины, направлением ее ствола и применяемом буровом оборудовании, а также работой циркуляционной системы буровой установки. Для оптимизации процесса замещения многофазной неньютоновской жидкостью в данной статье представлен параметрический анализ эффективности замещения бурового раствора в ходе цементирования хвостовика с вращением при исследовании установившегося течения цементного раствора в области между двумя соосными цилиндрами, вращающимися относительно друг друга и вокруг своих осей. Изучено влияние следующих параметров на эффективность замещения бурового раствора цементным: эксцентриситета центратора, частоты его вращения вокруг своей оси и вокруг оси обсадной колонны, радиального смещения центратора, увеличения эффективного радиуса области движения растворов. Построены графики зависимости: эксцентриситета на эффективность замещения; эксцентриситета на эффективность замещения для одного радиуса скважины; частоты вращения центратора вокруг оси скважины на эффективность замещения; частоты вращения центратора вокруг собственной оси на эффективность замещения; вывалообразования на эффективность замещения. Представлено изменение критической частоты вращения центратора вокруг оси скважины от частоты вращения вокруг оси скважины. Выявлено, что центратор, вращающийся вокруг оси скважины, практически нечувствителен к движению в радиальном направлении. Подтвердились выводы об эффективности замещения бурового раствора цементным с вращением по сравнению со стандартным замещением без вращения.

Keywords:
drilling, cement, drilling mud, stabilizer, rotation, analytical solutions.

Displacement or "pushing" of drilling mud is a typical and most frequently repeated operation in the process of fixing borehole walls. The replacement of drilling mud with cement in the annular space is carried out in compliance with the regime of movement of the solution, which is characterized by the rheological properties of the substituted and replacement fluids, the density difference between drilling and cement mortars, the design features of the well, the direction of its trunk and the drilling equipment used, as well as the operation of the circulation system of the drilling rig. To optimize the replacement process with a multiphase non-Newtonian fluid, this article presents a parametric analysis of the effectiveness of drilling mud replacement during cementing of a rotating shank in the study of steady-state flow of cement mortar in the area between two coaxial cylinders rotating relative to each other and around their axes. The influence of the following parameters on the efficiency of replacing drilling mud with cement has been studied: the eccentricity of the centralizer, the frequency of its rotation around its axis and around the axis of the casing, the radial displacement of the centralizer, and an increase in the effective radius of the area of movement of the solutions. Graphs of the dependence of: eccentricity on substitution efficiency; eccentricity on substitution efficiency for one well radius; rotational speed of the centralizer around the axis of the well on substitution efficiency; rotational speed of the centralizer around its own axis on substitution efficiency are constructed.; dislocation affects the effectiveness of substitution. The change in the critical rotation frequency of the centralizer around the axis of the well from the rotation frequency around the axis of the well is presented. It was revealed that the centralizer rotating around the axis of the well is practically insensitive to movement in the radial direction. The conclusions about the effectiveness of replacing drilling mud with cement with rotation compared to standard replacement without rotation were confirmed.

Шафигуллин Ринат Ильдусович – заместитель генерального директора по ремонту, бурению скважин и повышению нефтеотдачи пластов (e-mail: shafigullin@tatneft.ru, тел.: +007 (855) 330 72 60).
Сафаров Альберт Хамитович – доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории разработки биотехнологий отдела интенсификации притока (e-mail: SafarovAH@tatnipi.ru, тел.: +007 (855) 331 08 00, доб. 53406).
Дубиня Никита Владиславович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией фундаментальных проблем нефтегазовой геофизики и геофизического мониторинга (202) (e-mail: Dubinya.NV@gmail.com, тел.: +007 (903) 789 57 07).
Новикова Елена Валерьевна – научный сотрудник лаборатории фундаментальных проблем нефтегазовой геофизики и геофизического мониторинга (202) (e-mail: helenvn97@gmail.com, тел.: +007 (964) 704 10 93).
Фаттахов Ирик Галиханович – доктор технических наук, доцент, директор по повышению нефтеотдачи пластов, волновым и биотехнологиям (e-mail: fattakhovig@tatneft.ru, тел.: +007 (855) 331 08 00, доб. 53221).
Васильев Иван Алексеевич – младший научный сотрудник лаборатории фундаментальных проблем нефтегазовой геофизики и геофизического мониторинга (202) (e-mail: Vasilev.ivan@phystech.edu, тел.: +007 (910) 113 98 97).

Rinat I. Shafigullin (Author ID in Scopus: 38661795100, ORCID: 0009-0002-4639-4650) Deputy General Director for Repair, Well Drilling and Enhanced Oil Recovery (tel.: +7 (855) 330 72 60, e-mail: shafigullin@tatneft.ru).
Albert Kh. Safarov (Author ID in Scopus: 7004636709, ORCID: 0000-0002-6275-3046, Doctor in Engineering, Associate Professor, Leading Researcher at the Biotechnology Development Laboratory of the Inflow Stimulation Department (tel.: +7 (855) 331 08 00, e-mail: SafarovAH@tatnipi.ru).
Nikita V. Dubinya (Author ID in Scopus: 57142625800, ORCID: 0000-0002-1599-8737) – PhD in Physics and Mathematics, Leading Researcher, Head of the Laboratory of Fundamental Problems of Oil and Gas Geophysics and Geophysical Monitoring (tel.: +7 (903) 789 57 07, e-mail: Dubinya.NV@gmail.com). The contact person for correspondence.
Elena V. Novikova (Author ID in Scopus: 57324010500, ORCID: 0000-0001-6354-4652) – Researcher at the Laboratory of Fundamental Problems of Oil and Gas Geophysics and Geophysical Monitoring (tel.: +7 (964) 704 10 93, e-mail: helenvn97@gmail.com).
Irik G. Fattakhov (Author ID in Scopus: 48560997700, ORCID: 0000-0002-3086-4323) – Doctor in Engineering, Associate Professor, Director of Enhanced Oil Recovery, Wave and Biotechnology (tel.: +7 (855) 331 08 00, e-mail: fattakhovig@tatneft.ru).
Ivan A. Vasilev (Author ID in Scopus: 57321697100, ORCID: 0009-0004-4564-9564) – Junior Researcher at the Laboratory of Fundamental Problems of Oil and Gas Geophysics and Geophysical Monitoring (tel.: +7 (910) 113 98 97, e-mail: Vasilev.ivan@phystech.edu).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Параметрический анализ эффективности замещения бурового раствора в процессе цементирования хвостовика с вращением при ненулевом эксцентриситете / Р.И. Шафигуллин, А.Х. Сафаров, Н.В. Дубиня, Е.В. Новикова, И.Г. Фаттахов, И.А. Васильев // Недропользование. – 2025. – Т.25, №4. – С. 315–322. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.4.5

Please cite this article in English as:
Shafigullin R.I., Safarov A.Kh., Dubinya N.V., Novikova E.V., Fattakhov I.G., Vasilev I.A. Parametric Analysis of Drilling Fluid Displacement Efficiency during Liner Cementing with Rotation at Non-Zero Eccentricity. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2025, vol.25, no.4, pp. 315-322. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.4.5

Введение

Для центрирования обсадной колонны при цементировании применяются центраторы. Цементирование обсадных колонн при вращении с центраторами позволяет замещать цементным раствором пространство, в которых содержится буровой раствор. В общем виде задача о бурении с центратором формулируется как задача о течении многофазной жидкости в области, ограниченной самим центратором и стенками скважины. Ключевыми компонентами жидкости, которые следует рассматривать в первую очередь, являются буровой и цементный раствор. Цементный раствор подается в рассматриваемую область с заданными параметрами (давлением и/или расходом), что приводит к замещению бурового раствора. Обе жидкости являются существенно нелинейными с точки зрения реологии, поэтому математическое описание процесса является достаточно сложным. Вопрос нелинейности реологии жидкостей при их перемешивании в задачах анализа эффективности цементирования с вращением подробно рассматривается в работе [1]. Аналитическое решение в постановке нелинейной реологии жидкости может быть рассмотрено в существенно упрощенной формулировке: вязкопластическое течение жидкости между двумя соосными круговыми цилиндрами, вращающимися с разными угловыми скоростями, в отсутствие массовых сил [2]. Нестационарные решения могут быть получены в отсутствии вращения [3]. Поскольку основным фокусом настоящей работы является перемешивание именно для случая несоосного вращения цилиндров, решение будет рассматриваться именно в постановке линейной реологии. Нелинейная реология может быть рассмотрена в дальнейшем с применением численных методов.

Схожая ситуация наблюдается с возможностью рассмотрения двухфазного течения. Несмотря на очевидную необходимость изучения таких задач для различных целей [4], в литературе отсутствуют примеры успешного аналитического решения задач в такой постановке. Преобладают работы, описывающие результаты лабораторных [5–7] и численных [8, 9] экспериментов. Согласно современным работам [10, 11], потенциалом для численного решения поставленной задачи обладает метод конечных объемов, в частности, может быть использована открытая интегрируемая платформа OpenFOAM [12].

Для анализа влияния многофазности и нелинейности реологии бурового и цементного растворов на эффективность замещения существуют различные подходы, однако в рамках настоящего исследования решается задача параметрического анализа эффективности бурения с вращением центратора с ненулевым эксцентриситетом. Такой анализ может быть с легкостью выполнен на основании аналитического решения, которое достаточно близко в терминах постановки задачи к решению задачи, рассмотренной в работе [6]. Общая задача сформулирована как определение эффективности (степени) замещения бурового раствора цементным как функции от набора контролируемых и неконтролируемых параметров, в числе которых: угловая скорость вращения центратора вокруг своей оси, угловая скорость вращения центратора вокруг оси скважины, соотношение между диаметрами центратора и скважины, линейная скорость восходящего потока, скорость закачивания цемента. Вызывает интерес ухудшение эффективности замещения вследствие искривления скважины, роста зенитного угла, образования вывалов при бурении, а также влияние реологии жидкостей на степень замещения. Как было отмечено выше, изменение реологии жидкости может быть рассмотрено только при проведении численного моделирования, тогда как вывалообразование может быть учтено путем искусственного завышения радиуса скважины по сравнению с проектным. Искривление траектории скважины и ее невертикальность также могут быть учтены только при численном моделировании и не будут рассматриваться в рамках теоретического исследования. Прочие перечисленные параметры могут быть успешно исследованы с использованием аналитического решения, представленного ниже.

Проведение параметрического анализа

Данное исследование посвящено параметрическому исследованию эффективности замещения бурового раствора в процессе цементирования хвостовика с вращением при ненулевом эксцентриситете. Один из методов такого исследования заключается в оценке степени завихренности течения. В качестве количественной характеристики завихренности естественно выбрать циркуляцию поля скоростей жидкости Ω по контуру, лежащему в поперечном сечении скважины, который включает: 1) компоненты скорости частиц жидкости при течении, вызванном вращением центратора вокруг своей оси, 2) компоненты скорости частиц жидкости при течении, вызванном вращением центратора вокруг оси скважины и 3) поступательное движение жидкости вдоль оси скважины, определяемое параметрами подачи цементного раствора. Следуя теореме Стокса, можно определить циркуляцию как:

$$\Omega = \iint_S rot\mathbf{w}\cdot\mathbf{n}dS = \\ = \iint_S \left(\frac{\partial\left(w_x\left(\omega_0\right)+w_x\left(U\right)\right)}{\partial y} - \frac{\partial w_y\left(\omega_0\right)+w_y\left(U\right)}{\partial x} \right) dS, \quad (1)$$

где интегрирование ведется по поперечному сечению.

Все скорости, входящие в выражение (1), могут быть представлены как аналитические функции от координат *x* и *y*, однако взятие производных в явном виде приводит к громоздким выражениям и представляется разумным выполнять это интегрирование численно. В явном виде указанные скорости выражаются через комплексную координату q:

$$q = \frac{x+iy+x_0-b}{x+iy+x_0+b},$$

$$где\ b = \frac{\sqrt{\left(\Delta x^2-\rho_1^2-\rho_0^2\right)^2-4\rho_1^2\rho_0^2}}{2\Delta x}, \quad r_1 = \frac{\sqrt{b^2+\rho_1^2}-b}{\rho_1}, \quad (2)$$

$$x_0 = b\frac{1+r_1^2}{1-r_1^2}, \qquad r_0 = \frac{\sqrt{b^2+\rho_0^2}-b}{\rho_0},$$

где ρ_1 – радиус скважины, ρ_0 – радиус центратора, Δx – расстояние между осями скважины и центратора (эксцентриситет). Вращение центратора можно разделить на две составляющие: движение со скоростью U_x по направлению к оси скважины и движение со скоростью U_y в тангенциальном направлении. Скорость U_y соответствует вращению центратора. Общее решение для поля скоростей (w_x – скорость потока к оси скважины, w_y – тангенциальная скорость потока) может быть представлено в виде:

$$w_x\left(U_x,\Delta x,\rho_0,\rho_1\right)=$$
$$=\frac{U_x}{2K_u}\left(-\frac{u_1\left(\sigma_{\mathrm{Re}}r-1\right)}{r^4\left(\left(\sigma_{\mathrm{Re}}r-1\right)^2+\left(\sigma_{\mathrm{Im}}r\right)^2\right)}+u_2\sigma_{\mathrm{Re}}\left(\frac{1-r^2}{r^3}\right)+\frac{u_3}{r^4}\right)+$$
$$+\frac{U_y}{2K_v}\left(\frac{v_1\left(\sigma_{\mathrm{Re}}r-1\right)}{r^4\left(\left(\sigma_{\mathrm{Re}}r-1\right)^2+\left(\sigma_{\mathrm{Im}}r\right)^2\right)}+v_2\sigma_{\mathrm{Re}}\left(\frac{1+r^2}{r^3}\right)+\frac{v_3}{r^4}\right),$$
$$w_y\left(U_x,\Delta x,\rho_0,\rho_1\right)= \qquad (3)$$
$$=\frac{U_x}{2K_u}\left(\frac{u_1\sigma_{\mathrm{Im}}r}{r^4\left(\left(\sigma_{\mathrm{Re}}r-1\right)^2+\left(\sigma_{\mathrm{Im}}r\right)^2\right)}+u_2\sigma_{\mathrm{Im}}\left(\frac{1+r^2}{r^3}\right)\right)+$$
$$+\frac{U_y}{2K_v}\left(-\frac{v_1\sigma_{\mathrm{Im}}r}{r^4\left(\left(\sigma_{\mathrm{Re}}r-1\right)^2+\left(\sigma_{\mathrm{Im}}r\right)^2\right)}+v_2\sigma_{\mathrm{Im}}\left(\frac{1-r^2}{r^3}\right)\right),$$

где $r = |q| = q_{Re}^2 + q_{Im}^2$, $\sigma = q/r = (q_{\mathrm{Re}} + iq_{Im})/r$ (нижний индекс Re соответствует действительной части комплексной переменной, Im – мнимой);

$$K_u=-r_0^2+r_1^2+\left(r_0^2+r_1^2\right)\ln\frac{r_0}{r_1},$$
$$u_1=\left(-1+r^2\right)^2\left(r^2-r_0^2\right)\left(r^2-r_1^2\right),$$
$$u_2=-\left(r^2-r_0^2\right)\left(r^2-r_1^2\right),$$
$$u_3=-\left[\left(r^2-r_0^2+2r^2r_0^2\right)\left(r^2-r_1^2\right)-2r^4\left(r_0^2+r_1^2\right)\ln\frac{r}{r_1}\right],$$
$$K_v=-\left(-1+r_0^2\right)\left(r_0^2-r_1^2\right)\left(-1+r_1^2\right)+$$
$$+\left(\left(-1+r_0^2\right)^2r_1^2+r_0^2\left(-1+r_1^2\right)^2\right)\ln\frac{r_0}{r_1}, \qquad (4)$$
$$v_1=\left(r^2-r_0^2\right)\left(r^2-r_1^2\right)\times$$
$$\times\left(1-r_0^2r_1^2+2r^2\left(-1+r_0^2\right)\left(-1+r_1^2\right)+r^4\left(-1+r_0^2r_1^2\right)\right),$$
$$v_2=\left(-r^2+r_0^2\right)\left(-1+r_0^2r_1^2\right)\left(r^2-r_1^2\right),$$
$$v_3=-\left(r^2-r_1^2\right)\times$$
$$\times\left[r_0^2-r_0^4r_1^2+r^2\left(-1-r_0^2\left(-2+r_1^2\right)+2r_0^4\left(-1+r_1^2\right)\right)\right]-$$
$$-2r^4\left(r_1^2+r_0^4r_1^2+r_0^2\left(1-4r_1^2+r_1^4\right)\right)\ln\frac{r_1}{r}.$$

Данные аналитические решения позволяют быстро провести параметрический анализ эффективности замещения с использованием центратора, вращающегося вокруг оси скважины. В качестве параметров для анализа можно выделить следующий набор величин, которые могут варьироваться для оптимизации замещения бурового раствора цементным.

Комплекс величин, необходимых для оптимизации процесса замещения

Первым параметром для анализа можно выбрать частоту вращения центратора вокруг своей оси n_0. Эта величина может быть пересчитана в параметры, указанные в предыдущем разделе следующим образом:

$$\omega_0 = 2\pi n_0 . \qquad (5)$$

Частота вращения n_0 принимает характерные значения 20, 40, 60 оборотов в минуту (1/3, 2/3, 1 Гц). Соответствующие значения ω_0: $2\pi/3$, $4\pi/3$, 2π.

В качестве второго параметра выбрана частота вращения центратора вокруг оси скважины n_1. Как было указано выше, это вращение соответствует комбинации поступательного движения внутреннего цилиндра в направлении оси y со скоростью U_y и вращения центратора вокруг своей оси с угловой скоростью ω_1. Эти параметры определяются частотой вращения и величиной эксцентриситета Δx:

$$U_y = 2\pi n_1 \Delta x, \quad \omega_1 = 2\pi n_1 . \qquad (6)$$

При этом для положительного значения U_y (вращение по часовой стрелке) вращение центратора вокруг своей оси также должно быть направлено по часовой стрелке.

Характерные значения частоты n_1 лежат в интервале от 5 до 10 оборотов в минуту.

Радиусы внутреннего ρ_0 и внешнего ρ_1 цилиндров можно считать третьим параметром для анализа. Радиус центратора задан постоянным и определяется принятым значением диаметра d_0 = 114 мм (ρ_0 = 0,0570 м). При стандартном анализе будут рассмотрены два диаметра скважины: d_1 = 143 и 156 мм (ρ_1 = 0,0715 и 0,0780 м). Тем не менее отдельный интерес вызывает снижение эффективности бурения в условиях вывалообразования. В этих условиях эффективный радиус скважины может возрасти на 5 – 10 %, что будет рассмотрено отдельно.

Четвертый параметр – безразмерный эксцентриситет e. Расстояние между осями скважины и центратора Δx может изменяться от 0 для случая совпадающих осей до величины $\rho_1 - \rho_0$ для условий, когда происходит касание центратором стенки скважины. Безразмерный эксцентриситет e принимает значение 0 для первого случая и 1 для второго. При таком определении расстояние между осями выражается как:

$$\Delta x = e\left(\rho_1 - \rho_0\right). \qquad (7)$$

Наконец, неидеальность работы центратора можно оценить, вводя пятый параметр: ненулевую скорость U_x, соответствующую движению центратора в направлении оси скважины. С введением такого параметра можно косвенно исследовать снижение эффективности замещения при искривлении траектории скважины.

Было проведено исследование влияния вариации перечисленных факторов на эффективность замещения, связанную с циркуляцией потока (15). Основное внимание было уделено эксцентриситету. На рис. 1, *а*, представлена зависимость циркуляции потока от эксцентриситета, меняющегося от 0 до 1.

Расчетная часть

Были проведены 12 серий расчетов. Они включали в себя варианты вычислений со следующими частотами вращения центратора вокруг своей оси: 20 (показаны на рис. 1, *а*, сплошными линиями), 40 (показаны на рис. 1, *а*, пунктирными линиями) и 60 (показаны на рис. 1, *а*, штрихпунктирными линиями) об/мин; а также со следующими частотами вращения центратора вокруг оси скважины: 5 (красные и оранжевые линии) и 10 (синие и зеленые линии) об/мин. Отдельно были рассмотрены диаметры скважины 143 (красные и синие линии) и 156 мм (оранжевые и зеленые линии).

Из рис. 1, *а*, можно заметить группировку результатов расчетов по нескольким признакам. Частота вращения центратора вокруг своей оси накладывается на частоту вращения вокруг оси скважины при малых эксцентриситетах, поэтому в левой части рисунка семейства расчетов со всеми

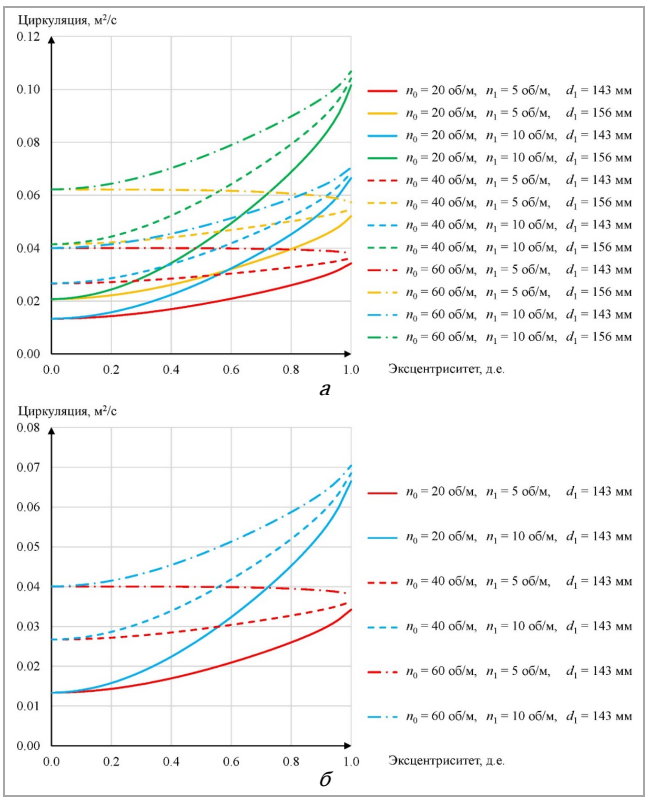


Рис. 1. Влияние эксцентриситета: *а* – на эффективность замещения; *б* – на эффективность замещения для одного радиуса скважины

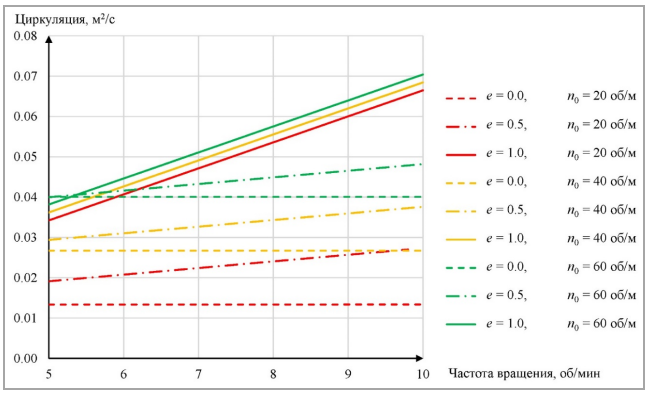


Рис. 2. Влияние частоты вращения центратора вокруг оси скважины на эффективность замещения

параметрами за исключением n_1 попарно накладываются друг на друга. Это с очевидностью следует из выражения (6), согласно которому скорость U_y, сильно влияющая на степень циркуляции, пропорциональна эксцентриситету. С ростом эксцентриситета роль частоты n_1 возрастает и начинает превалировать при его приближении к единице. В правой части рисунка влияние частоты вращения центратора вокруг своей оси n_0 становится пренебрежимо малым – друг к другу стремятся линии одних и тех же цветов.

Необходимо обратить внимание на нелинейный характер зависимости эффективности замещения от эксцентриситета. Видно, что хотя в большинстве случаев рост эксцентриситета ведет к повышению циркуляции, при отдельных комбинациях параметров (n_0 =60, n_1 = 5, диаметры 143 и 156 мм) наблюдается падение циркуляции. Из этого можно сделать важный вывод: рост эксцентриситета не всегда приводит к повышению эффективности замещения. Если частота вращения центратора вокруг своей оси высокая, а частота вращения вокруг центра скважины, напротив, низкая, эффект смещения центратора относительно оси скважины будет негативным, центратор будет мешать потоку.

Общие выводы из рис. 1, *а*, заключаются в том, что повышение частот вращения и увеличение диаметра скважины ведут к росту эффективности замещения. Частота вращения центратора вокруг оси скважины становится решающим фактором: можно заметить, что увеличение частоты вращения центратора вокруг оси скважины для случая диаметра скважины 143 мм с 5 до 10 оборотов в минуту (переход от красной линии к синей) позволяет достигнуть большей эффективности замещения, чем для скважины диаметром 156 мм с вращением центратора вокруг оси скважины, равным 5 оборотам в минуту, с сохранением частоты вращения центратора вокруг своей оси – пересечение семейств синих и оранжевых линий в области эксцентриситетов 0,8–0,9. Однако в целом наблюдается тенденция к тому, что рост диаметра скважины ведет к повышению эффективности замещения, что может быть связано с выбором выражения (1) в качестве метрики: увеличение площади интегрирования ведет к росту результата интегрирования.

Для наглядности на рис. 1, *б*, показаны семейства кривых, построенные только для диаметра скважины 143 мм.

Здесь можно оценить относительный вклад различных параметров в эффективность замещения. При нулевом эксцентриситете повышение частоты вращения центратора вокруг своей оси ведет к практически линейному росту эффективности замещения, что находится в качественном согласии с экспериментальными наблюдениями. Так, увеличение частоты вращения n_0 в три раза приводит к троекратному росту эффективности замещения. Однако увеличение эксцентриситета серьезно изменяет это влияние. По мере роста эксцентриситета эффективность замещения может как дополнительно возрасти в несколько раз для случая «быстрого» вращения центратора вокруг оси скважины (n_1 = 10 об/мин), а может практически не измениться или даже уменьшиться для «медленного» дополнительного вращения (n_1 = 5 об/мин).

Можно сделать вывод, что добавление эксцентриситета способно существенно повысить эффективность замещения, но только в случае достаточно быстрого вращения центратора вокруг оси скважины.

Такое наблюдение требует детального изучения. На рис. 2 представлены результаты серии 9 расчетов для варьируемой частоты вращения центратора вокруг оси скважины для набора параметров: диаметр скважины 143 мм, эксцентриситет e = 0,0; 0,5 и 1,0 (пунктирные, штрихпунктирные и сплошные линии), частота вращения центратора вокруг своей оси n_0 = 20, 40 и 60 оборотов в минуту (красные, оранжевые и зеленые линии).

Из этого рисунка можно сразу заметить, что рост частоты вращения центратора вокруг оси скважины ведет к повышению эффективности замещения, причем темпы роста практически не зависят от частоты вращения центратора вокруг своей оси: линии с равными значениями n_0 параллельны друг другу. В то же время практически везде чем выше эксцентриситет и частота вращения центратора вокруг своей оси, тем выше эффективность замещения. Однако это правило не универсально: можно обратить внимание на левую часть рисунка, в которой наблюдается пересечение зеленых линий. Это пересечение можно интерпретировать следующим образом: если частота вращения центратора вокруг оси скважины находится

левее точки пересечения, то вне зависимости от частоты вращения центратора вокруг собственной оси рост эксцентриситета приведет к понижению эффективности замещения. Иными словами, существует критическое значение частоты вращения центратора вокруг оси скважины. Если центратор вращается вокруг оси скважины с частотой меньше этой критической частоты, классическое бурение окажется эффективнее. На рис. 3 представлены результаты исследования этой критической частоты.

Представлены результаты расчетов для двух радиусов скважины – 143 и 156 мм. Численные эксперименты показывают, что линии равных частот на рис. 2 пересекаются близко друг к другу с некоторой погрешностью (точки пересечения отделены друг от друга на доли оборотов в минуту). Была проведена серия расчетов, в ходе которых были определены эти критические частоты – координаты пересечения линий равных частот на рис. 2, – рассчитана погрешность этих частот, вынесенная на рис. 3. Полученные кривые с точностью до погрешности аппроксимируются прямой:

$$n_1^{crit} = 0,0873 n_0 \ (d_1 = 143 \text{ мм}),$$
$$n_1^{crit} = 0,0902 n_0 \ (d_1 = 156 \text{ мм}). \quad (8)$$

Из этого результата следует, что с ростом частоты вращения центратора вокруг своей оси растет и минимально допустимая частота его вращения вокруг оси скважины, при превышении которой бурение с ненулевым эксцентриситетом будет эффективнее классического бурения. Область возможных комбинаций частот разделяется прямыми (8) на две подобласти, в одной из которых бурение с ненулевым эксцентриситетом эффективнее классического бурения (верхняя подобласть на рис. 3), а во второй классическое бурение оказывается эффективнее (нижняя подобласть на рис. 3).

Заслуживает внимания и влияние частоты вращения центратора вокруг собственной оси на эффективность замещения. По аналогии с рис. 2 на рис. 4 представлены результаты серии расчетов с изменяющейся частотой n_0. Использованный набор параметров: диаметр скважины 143 мм, эксцентриситет e = 0,0; 0,5 и 1,0 (красные, оранжевые и зеленые линии), частота вращения центратора вокруг оси скважины n_1 = 5 и 10 оборотов в минуту (пунктирные и сплошные линии).

Из этого рисунка можно заметить, что влияние частоты вращения центратора вокруг своей оси складывается с вращением вокруг оси скважины. При этом линии, соответствующие нулевому эксцентриситету, накладываются друг на друга. Зависимость эффективности замещения от частоты вращения центратора вокруг собственной оси линейная, угол наклона уменьшается с ростом эксцентриситета, однако в большинстве случаев повышение эксцентриситета, как можно было заметить и на рис. 1, приводит к более существенному росту эффективности замещения на малых частотах. Благодаря этому эффективность замещения в целом возрастает. Как и в предыдущем случае, такое наблюдается не всегда: возможна ситуация, при которой максимальный эксцентриситет не будет оптимальным.

Факторы, снижающие эффективность замещения жидкости

В завершение параметрического анализа представляет интерес исследование факторов, снижающих эффективность замещения жидкости. В качестве первого фактора можно рассмотреть движение центратора

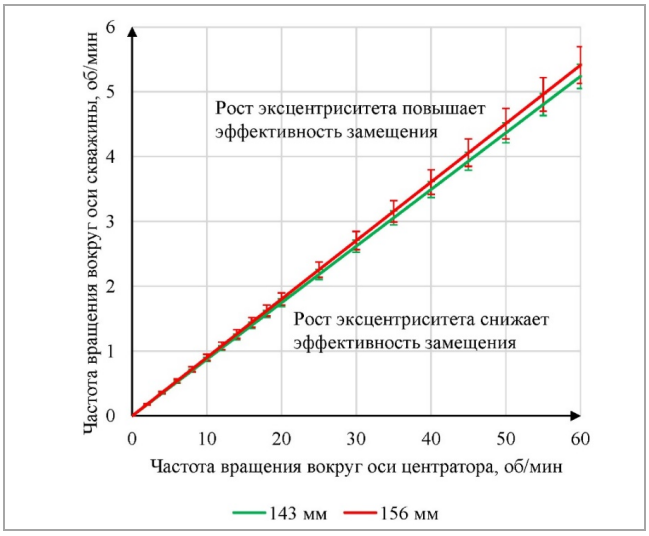


Рис. 3. Критическая частота вращения центратора вокруг оси скважины

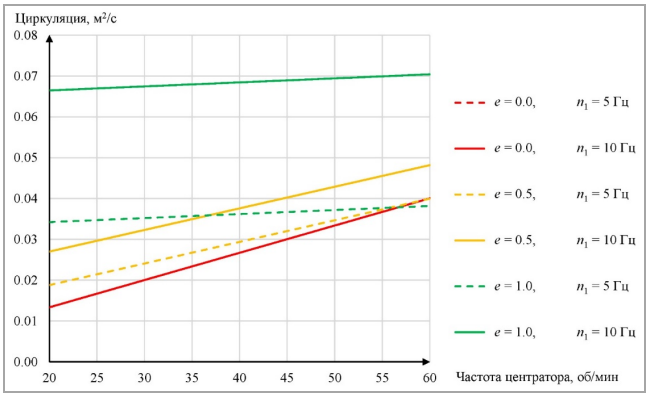


Рис. 4. Влияние частоты вращения центратора вокруг собственной оси на эффективность замещения

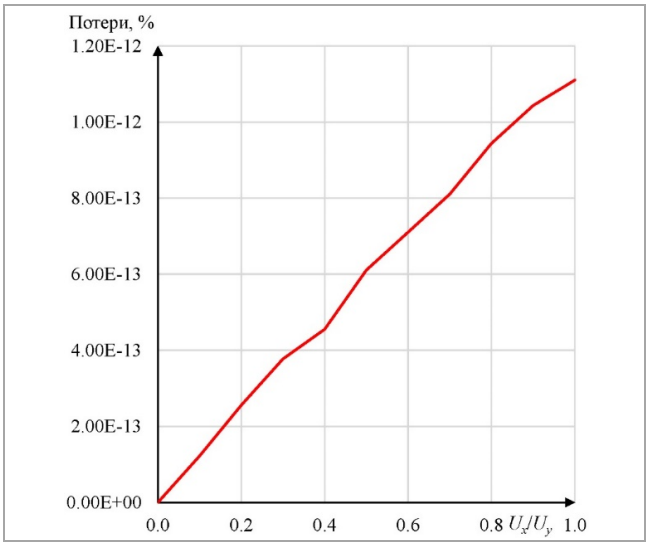


Рис. 5. Потери, вызванные движением центратора в радиальном направлении

в радиальном направлении – ненулевую скорость U_x. На рис. 5 представлены результаты расчетов для случая n_0 = 20 оборотов в минуту, n_1 = 10 оборотов в минуту, d_1 = 143 мм, e = 1 (из проведенной серии расчетов для этого случая потери были наиболее заметны). Для того чтобы продемонстрировать степень изменения эффективности замещения на рисунке, циркуляция, рассчитанная для каждого случая, была отнесена к случаю U_x/U_y = 0 (этот параметр изменялся

до экстремального значения, близкого к единице). Разница между циркуляцией каждого расчета и циркуляцией такого «беспроблемного» расчета была отнесена к циркуляции при $U_x/U_y = 0$ и выражена в процентах. Легко видеть, что эффект пренебрежимо мал (потери составляют 10^{-12} %), так что можно говорить, что центратор, вращающийся вокруг оси скважины, практически нечувствителен к движению в радиальном направлении. Можно говорить, что такие потери находятся на уровне погрешности численных расчетов, по крайней мере, для упрощенной постановки, имеющей аналитическое решение, рассмотренное в данной работе.

Вторым негативным фактором можно выбрать вывалообразование – эффективное увеличение диаметра скважины вследствие превышения сдвиговыми напряжениями критических значений в породах околоскважинной зоны. Характерные увеличения диаметра могут составлять 5–10 %. При этом реальный эксцентриситет центратора остается связанным с диаметром ненарушенного ствола. В результате «эффективный» эксцентриситет уменьшается.

На рис. 6 продемонстрированы результаты серии расчетов циркуляции потока для условий: $n_0 = 20$ оборотов в минуту, $n_1 = 10$ оборотов в минуту, диаметр ненарушенной скважины 143 мм, вывал постепенно увеличивается до 14 мм. На графике по горизонтальной оси отложено отношение глубины вывала к диаметру ненарушенного ствола скважины.

Можно заметить, что для трех серий расчетов с фиксированными эксцентриситетами 0,0; 0,5 и 1,0 (при этом в выражении (4) по-прежнему используется диаметр ненарушенного ствола скважины) наблюдается линейное снижение эффективности замещения с развитием вывала. Необходимо констатировать, что темпы снижения эффективности растут с повышением эксцентриситета, однако этих темпов в технологических условиях оказывается недостаточно для того, чтобы перекрыть позитивный эффект от вращения центратора вокруг ствола скважины.

Представленные результаты демонстрируют количественную оценку повышения эффективности замещения бурового раствора цементным при использовании центратора, вращающегося вокруг оси скважины. Полученные зависимости и ограничения могут быть применены для оптимизации технологии, однако должны быть проверены с использованием результатов численного моделирования и экспериментальных работ. Необходимо понимать, что перечисленные результаты получены в упрощенной постановке – установившийся ламинарный поток однофазной линейно вязкой несжимаемой жидкости в отсутствии массовых сил, – далекой от условий, наблюдающихся на практике. Тем не менее можно говорить, что полученные результаты согласуются с литературными данными и обладают достаточно высокой степенью физичности. Более того, полученное аналитическое решение следует использовать для валидации модели, которая в дальнейшем может быть использована для численных расчетов и их верификации.

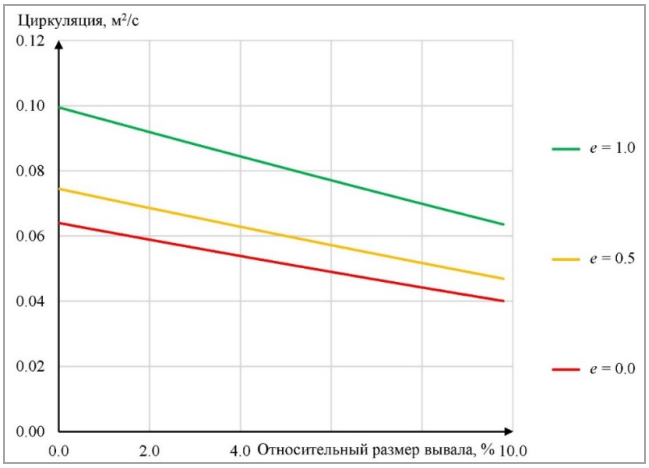


Рис. 6. Влияние вывалообразования на эффективность замещения

Заключение

По результатам проведенного исследования было обнаружено, что повышение эксцентриситета позитивно влияет на эффективность замещения, причем этот эффект тем заметнее, чем выше частота вращения центратора вокруг оси скважины. Отмечен нелинейный характер такой зависимости. Кроме того, было обнаружено, что при специфических условиях, когда частота вращения центратора вокруг своей оси более чем в 10 раз превышает скорость его вращения вокруг оси скважины, наблюдается обратная картина: классическое бурение оказывается более эффективным. Нахождение критической частоты, ниже которой не следует опускать частоту вращения центратора вокруг оси скважины при заданной частоте его вращения вокруг своей оси, можно отнести к практически значимым результатам данной работы. Интересно отметить, что в пределах допустимых погрешностей зависимость критической частоты от частоты вращения центратора вокруг своей оси описывается линейным законом.

Таким образом, можно сформулировать основной результат проделанной теоретической работы: использование упрощенных аналитических моделей замещения бурового раствора в условиях вращения демонстрирует повышенную эффективность замещения бурового раствора цементным по сравнению со стандартным замещением без вращения.

Несмотря на успешное решение упрощенной теоретической задачи, представляется естественным дополнить это исследование результатами численного моделирования и лабораторных и полевых экспериментов. Можно говорить, что эти направления являются приоритетными для дальнейшей работы.

Библиографический список

1. Петров, А.Г. Точные решения задачи нестационарного течения вязкопластичной среды в круглой трубе / А.Г. Петров, Л.В. Черепанов // Изв. РАН МЖГ. – 2003. – № 2. – С. 13–24.
2. Серов, А.Ф. Энергетика пульсаций течения Куэтта-Тейлора в зазорах оппозитных многоцилиндровых роторов / А.Ф. Серов, В.Н. Мамонов, А.Д. Назаров // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2017. – Т. 159. кн. 3. – С. 364–373.
3. Zhao, J. Two-phase flow patterns in a square mini-channel / J. Zhao, G. Liu, B. Li // J. Therm. Sci. – 2004. – Vol. 13. – P. 174–178.
4. Hubacz, R. Classification of flow regimes in gas-liquid horizontal Couette-Taylor flow using dimensionless criteria / R. Hubacz // J. Hydrodyn. – 2015. – Vol. 27. – P. 773–781.
5. Effect of bubble's arrangement on the viscous torque in bubbly Taylor-Couette flow / G.N. Fokoua, C. Cabillet, A. Aubert, C. Colin // Physics of Fluids. – 2015. – Vol. 27. – P. 034105.
6. Morenko, I.V. Viscous fluid flow in a wide annular gap of two rotating coaxial cylinders / I.V. Morenko // J. Phys.: Conf. Ser. 1588 012034. – 2020.
7. Моренко, И.В. Двухфазное течение в узком кольцевом канале между неподвижным и вращающимся цилиндрами / И.В. Моренко // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2021. – Т. 163, кн. 2. – С. 143–152.

8. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques / H.G. Weller, G. Tabor, H. Jasak, C. Fureby // Comp.Phys. – 1998. – Vol. 12, no. 6.
9. Фаттахов, И.Г. Совершенствование способа приготовления тампонажного состава на основе синтетических смол для ремонтно-изоляционных работ в скважинах / И.Г. Фаттахов, Р.Р. Кадыров, Р.Г. Маркова // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12–10. – С. 2131–2134.
10. Оценка технологической эффективности ремонта скважин / Р.Р. Хуснутдинова, И.Г. Фаттахов, Р.Р. Степанова, А.С. Жиркеев, А.К. Сахапова, И.Н. Рахманов, А.А. Пименов // Нефтепромысловое дело. – 2024. – № 1 (661). – С. 54–57.
11. Климов, Д.М. Вязкопластические течения: динамический хаос, устойчивость, перемешивание / Д.М. Климов, А.Г. Петров, Д.В. Георгиевский. – М.: Наука, 2004. – 238 с.
12. Рейнер ,М. Реология / М. Рейнер. – М.: Наука, 1965. – 224 с.
13. Фаттахов, И.Г. Расчет эффективности применения соляно-кислотной обработки по характеристикам вытеснения / И.Г. Фаттахов, Д.В. Новоселова // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12-6. – С. 1186–1190.
14. Effect of mullite whiskers and graphite flakes blending on the mechanical properties of oil well cement / L. He, J. Zhao, X. Wang, L. Jiao, B. Liu, W. Yang, B. Zhang, M. Li // Results in Engineering. – 2025. – Vol. 26. – P. 104967. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.104967
15. Microbiological mineralization for self-healing cement sheath in oil and gas wells: A study on the integrity and sealing mechanisms of interface cracks / L. Li, T. Liu, G. Jiang, Sh. Zheng, G. Yang, Ch. Tang // Case Studies in Construction Materials. – 2025. – Vol. 22. – P. e04546. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04546
16. Шамсутдинов, Н.М. Технология заканчивания скважины с горизонтальным окончанием с последующим проведение МГРП / Н.М. Шамсутдинов, Д.С. Леонтьев // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 9-й Международной научнопрактической конференции, Донецк, 23–25 мая 2023 года. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2023. – С. 10–14.
17. Курбасов, Е.Г. О техническом решении для надежного спуска колонны-хвостовика в горизонтальный ствол скважины / Е.Г. Курбасов, С.Н. Бастриков, Э.Б. Гусейнов // Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений и транспорта трудноизвлекаемых запасов углеводородов: Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Ухта, 02–03 ноября 2023 года. – Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2023. – С. 173–175.
18. Corrigendum to “Cementing displacement efficiency analysis in long horizontal wells: An optimized numerical simulation approach” [J. Petrol. Sci. Eng. Vol. 208 (Part A) (January 2022), 109393] / H. Hu, X. Liang, M. Zhang, H. Fan // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Vol. 210. – P. 110090. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.110090
19. Паршукова, Л.А. К вопросу устойчивости ствола скважины при бурении в терригенных породах / Л.А. Паршукова // Экспозиция Нефть Газ. – 2024. – № 4(105). – С. 28-31. DOI: 10.24412/2076-6785-2024-4-28-31
20. Современные модификации цементировочных головок / В.Л. Дробов, А.Е. Нижник, М.О. Ашрафьян, А.К. Куксов // Бурение и нефть. – 2012. – № 1. – С. 56–58.
21. Патент № 2559255 C2 Российская Федерация, МПК E21B 29/00, E21B 33/10. Устройство и способы герметизации ствола подземной скважины и выполнения на тросе других скважинных операций вращения: № 2012103898/03: заявл. 05.07.2010: опубл. 10.08.2015 / Б.Э. Танджет.
22. Impact of endospore-forming bacterial co-culture on the long-term self-healing efficiency and hardened properties of cement mortar / Y. Javeed, Y. Goh, S. Poh Yap, K. Hung Mo, B. Fen Leo // Construction and Building Materials. – 2025. – Vol. 472. – P. 140756. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.140756
23. Опыт крепления горизонтальных скважин с неустойчивыми отложениями на месторождениях ПАО «Татнефть» / А.Я. Вакула, А.Р. Ибрагимов, А.Ф. Стрыхарь, А.А. Забегайло // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2016. – № 10. – С. 41–44.
24. Мозговой, Г.С. Особенности заканчивания горизонтальной скважины по технологии sagd / Г.С. Мозговой, А.С. Мякишев // Ашировские чтения. – 2016. – Т. 1, № 2(8). – С. 229–237.
25. Патент № 2689933 C2 Российская Федерация, МПК E21B 29/00. Совместимая с кабелем и управляемая безвышечным способом, выполненная с возможностью взаимодействия с межтрубными пространствами система для использования и ликвидации подземной скважины: № 2014103793: заявл. 05.07.2012: опубл. 29.05.2019 / Б.Э. Танджет.
26. Хузина, Л.Б. К вопросам о методах повышения качества крепления нефтяных и газовых скважин / Л.Б. Хузина, Р.И. Фазлыева // Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института. – 2016. – Т. 15. – С. 24–30.
27. Cement waste-integrated bismuth phosphate Glasses: Gamma irradiation, structural optimization, and enhanced shielding efficiency against alpha/proton radiation / Hesham M.H. Zakaly, Shams A.M. Issa, Moustafa A. Darwish, H.A. Saudi, M.M. Abou Halaka, H. Hashim // Ceramics International. – 2025. DOI: 10.1016/j.ceramint.2025.05.395
28. Optimized composite lime cement plasters with phase change materials for enhanced building energy efficiency and comfort / T. Skalar, M. Dovjak, M. Marinšek, N. Čelan Korošin, V. Bokan Bosiljkov, P. Štukovnik // Ceramics International. – 2025. DOI: 10.1016/j.ceramint.2025.06.277
29. Determination of optimal density difference for improving cement displacement efficiency in deviated wells / Y. Bu, Zh. Li, Ch. Wan, H. Andy Li // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2016. – Vol. 31. – P. 119–128. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.03.008
30. Muniz Moreira, R.P. Displacement efficiency modeling and performance evaluation in annular geometries for foamed cementing applications / R.P. Muniz Moreira, M. Feijó Naccache // Geoenergy Science and Engineering. – 2025. – Vol. 254. – P. 214035. DOI: 10.1016/j.geoen.2025.214035
31. Study on plugging removal acid system of acid-soluble cement in oil and gas wells: Based on organic solid acid / H. Liu, Y. Zhang, W. Huang, X. Liu, Zh. Tao, L. Yang, M. Chai, J. Li // Geoenergy Science and Engineering. – 2025. – Vol. 254. – P. 214044. DOI: 10.1016/j.geoen.2025.214044
32. Санжапов, И.И. Цементирование с вращением / И.И. Санжапов, С.В. Любимова // Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции молодых ученых, Альметьевск, 26 ноября 2021 года. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2021. – С. 214–216.
33. Патент № 2775628 C1 Российская Федерация, МПК E21B 43/26, E21B 33/13. Способ заканчивания скважины с горизонтальным окончанием с последующим проведением многостадийного гидравлического разрыва пласта: № 2021105970: заявл. 09.03.2021: опубл. 05.07.2022 / Н.М. Шамсутдинов, А.Ю. Мильков, А.С. Елшин, Д.С. Леонтьев.
34. Прохоров, В.В. О возможности проведения процесса цементирования эксплуатационной колонны с вращением / В.В. Прохоров, С.Е. Чернышов // Нефтяная провинция. – 2025. – № 1(41). – С. 227–245. DOI: 10.25689/NP.2025.1.227-245
35. Актуальные проблемы и инновации в области строительства и ремонта скважин: сборник тезисов докладов научно-практической конференции, посвященной юбилею Изиля Галимзяновича Юсупова, Бугульма, 17 мая 2022 года. – Бугульма: Татарский научно-исследовательский и проектный институт нефти открытого акционерного общества «Татнефть» имени В.Д. Шашина, 2022. – 56 с.
36. Нижник, А.Е. Совершенствование некоторых элементов технологической оснастки, направленных на повышение качества крепления скважин / А.Е. Нижник // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2008. – № 11. – С. 3-436.
37. Effect of casing rotation on displacement efficiency of cement slurry in highly deviated wells / Y. Bu, L. Tian, Zh. Li, R. Zhang, Ch. Wang, X. Yang // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2018. – Vol. 52. – P. 317–324. DOI: 10.1016/j.jngse.2018.01.040
38. Using particle image velocimetry to evaluate the displacement efficiency of drilling mud in horizontal well cementing / B. Xu, Sh. Zhou, F. He, F. Wang, J. Guo // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – Vol. 195. – P. 107647. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107647
39. Self-healing efficiency of EVA-modified cement for hydraulic fracturing wells / B. Yuan, Y. Yang, Y. Wang, K. Zhang // Construction and Building Materials. – 2017. – Vol. 146. – P. 563–570. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.128
40. Патент № 2745147 C1 Российская Федерация, МПК E21B 33/14. Способ крепления потайной обсадной колонны ствола с вращением и цементированием зоны выше продуктивного пласта: № 2020141176: заявл. 14.12.2020: опубл. 22.03.2021 / С.П. Антипов, А.М. Лебедев, К.М. Марданшин, Э.А. Шарафетдинов; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "НАБЕРЕЖНОЧЕЛНИНСКИЙ ТРУБНЫЙ ЗАВОД".
41. Performance enhancement and mechanism analysis of low-carbon cement-stabilized macadam based on vibratory mixing method / M. Zhao, H. Liu, Q. Wang, M. Wang, Zh. Chen, X. Wang // Case Studies in Construction Materials. – 2025. – Vol. 23. – P. e04990. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04990
42. Recent advancements in durable and self-healing oil well cement: A pathway to secure carbon sequestration / Y. Xie, M. Tiong, Q. Liu, T. Wu, W. Xue, Ch. Wang // Journal of CO_2 Utilization. – 2025. – Vol. 92. – P. 103036. DOI: 10.1016/j.jcou.2025.103036
43. Rheology control of low-density geopolymer paste for well cementing application: Synergistic effects of precursor fineness and sodium gluconate / Ch. Sun, X. Gao, J. Kong, H. Zhang, H. Chen, H. Sun, L. Xue, Ch. Ma, Z. Zhang // Case Studies in Construction Materials. – 2025. – Vol. 22. – P. e04905. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04905
44. Insights into self-healing capacity of cement matrix containing high-efficiency bacteria under challenging conditions / O. Šovljanski, T. Milović, V. Bulatović, T. Erceg, J. Stanojev, B. Bajac, A. Tomić // Journal of Building Engineering. – 2024. – Vol. 98. – P. 111094. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.111094

References

1. Petrov A.G., Cherepanov L.V. Tochnye resheniia zadachi nestatsionarnogo techeniia viazkoplastichnoi sredy v krugloi trube [Exact solutions of the problem of unsteady flow of a viscoplastic medium in a round pipe]. *Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 2003, no. 2, pp. 13-24.
2. Serov A.F., Mamonov V.N., Nazarov A.D. Energetika pul'satsii techeniia Kuetta-Teilora v zazorakh oppozitnykh mnogotsilindrovykh rotorov [Pulsation energy of the Couette–Taylor flow in gaps of multicylinder counter-rotating rotors]. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki*, 2017, vol. 159, book 3, pp. 364-373.
3. Zhao J., Liu G., Li B. Two-phase flow patterns in a square mini-channel. *J. Therm. Sci.*, 2004, vol. 13, pp. 174-178. DOI: 10.1007/s11630-004-0028-1
4. Hubacz R. Classification of flow regimes in gas-liquid horizontal Couette-Taylor flow using dimensionless criteria. *J. Hydrodyn*, 2015, vol. 27, pp. 773-781. DOI: 10.1016/S1001-6058(15)60539-X
5. Fokoua G.N., Cabillet C., Aubert A., Colin C. Effect of bubble’s arrangement on the viscous torque in bubbly Taylor-Couette flow. *Physics of Fluids*, 2015, vol. 27, 034105 p. DOI: 10.1063/1.4915071
6. Morenko I.V. Viscous fluid flow in a wide annular gap of two rotating coaxial cylinders. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1588 012034, 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1588/1/012034
7. Morenko I.V. Dvukhfaznoe techenie v uzkom kol'tsevom kanale mezhdu nepodvizhnym i vrashchaiushchimsia tsilindrami [Two-phase flow in a narrow annular channel between stationary and rotating cylinders]. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki*, 2021, vol. 163, book 2, pp. 143-152. DOI: 10.26907/2541-7746.2021.2.143-152
8. Weller H.G., Tabor G., Jasak H., Fureby C. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. *Comp.Phys.*, 1998, vol. 12, no. 6. DOI: 10.1063/1.168744

9. Fattakhov I.G., Kadyrov R.R., Markova R.G. Sovershenstvovanie sposoba prigotovleniia tamponazhnogo sostava na osnove sinteticheskikh smol dlia remontno-izoliatsionnykh rabot v skvazhinakh [Improvement of the method of preparation oilwell composition based on synthetic resins for the repair and insulation operations in boreholes]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2014, no. 12-10, pp. 2131-2134.
10. Khusnutdinova R.R., Fattakhov I.G., Stepanova R.R., Zhirkeev A.S., Sakhapova A.K., Rakhmanov I.N., Pimenov A.A. Otsenka tekhnologicheskoi effektivnosti remonta skvazhin [Assessment of technological efficiency of wells repair]. *Neftepromyslovoe delo*, 2024, no. 1 (661), pp. 54-57.
11. Klimov D.M., Petrov A.G., Georgievskii D.V. Viazkoplasticheskie techeniia: dinamicheskii khaos, ustoichivost', peremeshivanie [Viscoplastic flows: dynamic chaos, stability, mixing]. Moscow: Nauka, 2004, 238 p.
12. Reiner M. Reologiia [Rheology]. Moscow: Nauka, 1965, 224 p.
13. Fattakhov I.G., Novoselova D.V. Raschet effektivnosti primeneniia soliano-kislotnoi obrabotki po kharakteristikam vytesneniia [Calculation of the efficiency of hydrochloric acid treatment on the characteristics of extrusion]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2014, no. 12-6, pp. 1186-1190.
14. He L., Zhao J., Wang X., Jiao L., Liu B., Yang W., Zhang B., Li M. Effect of mullite whiskers and graphite flakes blending on the mechanical properties of oil well cement. *Results in Engineering*, 2025, vol. 26, 104967 p. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.104967
15. Li L., Liu T., Jiang G., Zheng Sh., Yang G., Tang Ch. Microbiological mineralization for self-healing cement sheath in oil and gas wells: A study on the integrity and sealing mechanisms of interface cracks. *Case Studies in Construction Materials*, 2025, vol. 22, e04546 p. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04546
16. Shamsutdinov N.M., Leont'ev D.S. Tekhnologiia zakanchivaniia skvazhiny s gorizontal'nym okonchaniem s posleduiushchim provedenie MGRP [Well completion technology with horizontal completion followed by multistage hydraulic fracturing]. *Innovatsionnye perspektivy Donbassa. Materialy 9-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Donetsk, 23-25 May 2023*. Donetsk: Donetskii natsional'nyi tekhnicheskii universitet, 2023, pp. 10-14.
17. Kurbasov E.G., Bastrikov S.N., Guseinov E.B. O tekhnicheskom reshenii dlia nadezhnogo spuska kolonny-khvostovika v gorizontal'nyi stvol skvazhiny [On a technical solution for the reliable lowering of a liner string into a horizontal wellbore]. *Problemy geologii, razrabotki i ekspluatatsii mestorozhdenii i transporta trudnoizvlekaemykh zapasov uglevodorodov. Materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Ukhta, 02-03 November 2023*. Ukhta: Ukhtinskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2023, pp. 173-175.
18. Hu H., Liang X., Zhang M., Fan H. Corrigendum to “Cementing displacement efficiency analysis in long horizontal wells: An optimized numerical simulation approach” [J. Petrol. Sci. Eng. Vol. 208 (Part A) (January 2022), 109393]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 210, 110090 p. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.110090
19. Parshukova L.A. K voprosu ustoichivosti stvola skvazhiny pri burenii v terrigennykh porodakh [On the issue of borehole stability during drilling in terrigenous rocks]. *Ekspozitsiia Neft' Gaz*, 2024, no. 4 (105), pp. 28-31. DOI: 10.24412/2076-6785-2024-4-28-31
20. Drobov V.L., Nizhnik A.E., Ashraf'ian M.O., Kuksov A.K. Sovremennye modifikatsii tsementirovochnykh golovok [Modern modifications of cementing heads]. *Burenie i neft'*, 2012, no. 1, pp. 56-58.
21. Tandzhet B.E. Ustroistvo i sposoby germetizatsii stvola podzemnoi skvazhiny i vypolneniia na trose drugikh skvazhinnykh operatsii vrashcheniia [Device and methods for sealing the shaft of an underground well and performing other well rotation operations on a cable]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2559255 C2 (2015).
22. Javeed Y., Goh Y., Poh Yap S., Hung Mo K., Fen Leo B. Impact of endospore-forming bacterial co-culture on the long-term self-healing efficiency and hardened properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 2025, vol. 472, 140756 p. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.140756
23. Vakula A.Ia., Ibragimov A.R., Strykhar' A.F., Zabegailo A.A. Opyt krepleniia gorizontal'nykh skvazhin s neustoichivymi otlozheniiami na mestorozhdeniiakh PAO “Tatneft'” [Experience of horizontal wells cementing with unstable deposits obtained at the oil fields of PJSC "Tatneft"]. *Stroitel'stvo neftianykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2016, no. 10, pp. 41-44.
24. Mozgovoi G.S., Miakishev A.S. Osobennosti zakanchivaniia gorizontal'noi skvazhiny po tekhnologii sagd [Features of horizontal well completion using SAGD technology]. *Ashirovskie chteniia*, 2016, vol. 1, no. 2 (8), pp. 229-237.
25. Tandzhet B.E. Sovmestimaia s kabelem i upravliaemaia bezvyshechnym sposobom, vypolnennaia s vozmozhnost'iu vzaimodeistviia s mezhtrubnymi prostranstvami sistema dlia ispol'zovaniia i likvidatsii podzemnoi skvazhiny [A cable-compatible, rigless, inter-tube capable system for the use and abandonment of an underground well]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2689933 C2 (2019).
26. Khuzina L.B., Fazlyeva R.I. K voprosam o metodakh povysheniia kachestva krepleniia neftianykh i gazovykh skvazhin [On the questions about methods for improving the quality of oil and gas well casing]. *Uchenye zapiski Al'met'evskogo gosudarstvennogo neftianogo instituta*, 2016, vol. 15, pp. 24-30.
27. Hesham M.H. Zakaly, Shams A.M. Issa, Moustafa A. Darwish, Saudi H.A., M.M. Abou Halaka, Hashim H. Cement waste-integrated bismuth phosphate Glasses: Gamma irradiation, structural optimization, and enhanced shielding efficiency against alpha/proton radiation. *Ceramics International*, 2025. DOI: 10.1016/j.ceramint.2025.05.395
28. Skalar T., Dovjak M., Marinšek M., Čelan Korošin N., Bokan Bosiljkov V., Štukovnik P. Optimized composite lime cement plasters with phase change materials for enhanced building energy efficiency and comfort. *Ceramics International*, 2025. DOI: 10.1016/j.ceramint.2025.06.277
29. Bu Y., Li Zh., Wan Ch., Li Andy H. Determination of optimal density difference for improving cement displacement efficiency in deviated wells. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 31, pp. 119-128. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.03.008
30. Muniz Moreira R.P., Feijó Naccache M. Displacement efficiency modeling and performance evaluation in annular geometries for foamed cementing applications. *Geoenergy Science and Engineering*, 2025, vol. 254, 214035 p. DOI: 10.1016/j.geoen.2025.214035
31. Liu H., Zhang Y., Huang W., Liu X., Tao Zh., Yang L., Chai M., Li J. Study on plugging removal acid system of acid-soluble cement in oil and gas wells: Based on organic solid acid. *Geoenergy Science and Engineering*, 2025, vol. 254, 214044 p. DOI: 10.1016/j.geoen.2025.214044
32. Sanzhapov I.I., Liubimova S.V. Tsementirovanie s vrashcheniem [Rotational cementing]. *Energiia molodezhi dlia neftegazovoi industrii. Sbornik materialov VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh, Al'met'evsk, 26 November 2021*. Al'met'evsk: Al'met'evskii gosudarstvennyi neftianoi institut, 2021, pp. 214-216.
33. Shamsutdinov N.M., Mil'kov A.Iu., Elshin A.S., Leont'ev D.S. Sposob zakanchivaniia skvazhiny s gorizontal'nym okonchaniem s posleduiushchim provedeniem mnogostadiinogo gidravlicheskogo razryva plasta [A method of completing a well with a horizontal completion followed by multi-stage hydraulic fracturing]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2775628 C1 (2022).
34. Prokhorov V.V., Chernyshov S.E. O vozmozhnosti provedeniia protsessa tsementirovaniia ekspluatatsionnoi kolonny s vrashcheniem [About the possibility of carrying out the process of cementing a production string with rotation]. *Neftianaia provintsiia*, 2025, no. 1 (41), pp. 227-245. DOI: 10.25689/NP.2025.1.227-245
35. Aktual'nye problemy i innovatsii v oblasti stroitel'stva i remonta skvazhin [Current issues and innovations in well construction and repair]. *Sbornik tezisov dokladov nauchno-prakticheskoi konferentsii, posviashchennoi iubileiu Iusupova Izilia Galimzianovicha, Bugul'ma, 17 May 2022*. Bugul'ma: Tatarskii nauchno-issledovatel'skii i proektnyi institut nefti otkrytogo aktsionernogo obshchestva “Tatneft'” imeni V.D. Shashina, 2022, 56 p.
36. Nizhnik A.E. Sovershenstvovanie nekotorykh elementov tekhnologicheskoi osnastki, napravlennykh na povyshenie kachestva krepleniia skvazhin [Improvement of some elements of technological equipment aimed at improving the quality of well casing]. *Stroitel'stvo neftianykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2008, no. 11, pp. 34-36.
37. Bu Y., Tian L., Li Zh., Zhang R., Wang Ch., Yang X. Effect of casing rotation on displacement efficiency of cement slurry in highly deviated wells. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, vol. 52, pp. 317-324. DOI: 10.1016/j.jngse.2018.01.040
38. Xu B., Zhou Sh., He F., Wang F., Guo J. Using particle image velocimetry to evaluate the displacement efficiency of drilling mud in horizontal well cementing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 195, 107647 p. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107647
39. Yuan B., Yang Y., Wang Y., Zhang K. Self-healing efficiency of EVA-modified cement for hydraulic fracturing wells. *Construction and Building Materials*, 2017, vol. 146, pp. 563-570. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.128
40. Antipov S.P., Lebedev A.M., Mardanshin K.M., Sharafetdinov E.A. Sposob krepleniia potainoi obsadnoi kolonny stvola s vrashcheniem i tsementirovaniem zony vyshe produktivnogo plasta [A method for securing a countersunk casing string by rotating and cementing the zone above the productive formation]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2745147 C1 (2021).
41. Zhao M., Liu H., Wang Q., Wang M., Chen Zh., Wang X. Performance enhancement and mechanism analysis of low-carbon cement-stabilized macadam based on vibratory mixing method. *Case Studies in Construction Materials*, 2025, vol. 23, e04990 p. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04990
42. Xie Y., Tiong M., Liu Q., Wu T., Xue W., Wang Ch. Recent advancements in durable and self-healing oil well cement: A pathway to secure carbon sequestration. *Journal of CO_2 Utilization*, 2025, vol. 92, 103036 p. DOI: 10.1016/j.jcou.2025.103036
43. Sun Ch., Gao X., Kong J., Zhang H., Chen H., Sun H., Xue L., Ma Ch., Zhang Z. Rheology control of low-density geopolymer paste for well cementing application: Synergistic effects of precursor fineness and sodium gluconate. *Case Studies in Construction Materials*, 2025, vol. 22, e04905 p. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04905
44. Šovljanski O., Milović T., Bulatović V., Erceg T., Stanojev J., Bajac B., Tomić A. Insights into self-healing capacity of cement matrix containing high-efficiency bacteria under challenging conditions. *Journal of Building Engineering*, 2024, vol. 98, 111094 p. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.111094

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.