

УДК 504.61–536.252
DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4468

Транспорт шлама буровым раствором в горизонтальных скважинах. Часть 2. Численные результаты бурения при оптимальных реологических свойствах раствора

С.Н. Харламов^{1✉}, М. Джанхорбани¹, А.Г. Чернов²

¹ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск*

² *АО «ТомскНИПИнефть», Россия, г. Томск*

✉ kharsn@mail.ru

Аннотация

Актуальность исследования связана с обеспечением эффективности функционирования технологического оборудования в процессе бурения скважин с произвольной ориентацией их стволов. В частности, поиск продуктивных пластов углеводородного сырья требует бурения более глубоких скважин с протяженными горизонтальными участками, для которых удаление шламовой постели составляет ключевую проблему современного бурения. **Цель** работы заключается в: *изучении* особенностей и *установлении* закономерностей процесса движения шлама через межтрубное эксцентричное пространство, образованное бурильной колонной и стенками скважины при разнообразных режимах (*in-situ*) и условиях бурения в рамках современных математических моделей гидродинамики, численных алгоритмов и подходов, реализованных в ANSYS CFD; *оптимизации* параметров, определяющих процесс бурения, таких как угол наклона, среднemasсовая скорость и морфология входного вязкого потока для формирования максимально допустимой скорости бурения при разнообразных сочетаниях эффективной вязкости раствора и скорости течения смеси; *выдаче* практических рекомендаций инженерам к сокращению временных затрат и материальных ресурсов по техническому обслуживанию и интенсификации очистки скважин. **Объект** исследования представляет собой скважину с эксцентричным ядром и протяженной горизонтальной секцией, функционирующей в режимах и условиях, близких к реальному бурению. **Методы** исследования соответствуют комплексному физико-математическому анализу и численному моделированию гидродинамики и массопереноса в гомогенных и гетерогенных сплошных средах, широко апробированных на классе внутренних реологически сложных течений, верификация которых осуществлена в соответствующих условиях, выполненных другими авторами при решении задач бурения и очистки скважин. **Результаты.** Представлены результаты численного исследования гидродинамики дисперсного потока реологически сложной вязкой смеси бурового раствора со свойствами жидкости типа Гершеля–Балкли и частиц песка в скважинах с произвольной образующей ее ствола в эксцентричном пространстве с целью выяснения особенностей, сопровождающих прямооточное и закрученное течение (методом подвижной стенки), выявления закономерностей в таких режимах, учет которых позволяет проводить эффективную очистку межтрубного пространства. Расчеты выполнены в рамках современных математических моделей RANS-метода и эйлерово-лагранжевого подхода к описанию движения гетерогенных сред, реализованного в ПО ANSYS CFD, и эффективных численных алгоритмов по определению внутри- и межфазных процессов переноса массы и импульса в смесях. Установлено, что при бурении вертикального участка самым эффективным параметром с точки зрения контроля очистки выступает эффективная вязкость раствора; самыми проблематичными конфигурациями для очистки являются скважины с наклонными участками при углах близких к вертикали; при бурении горизонтального участка эксцентричность бурильной колонны создаёт «мёртвую» зону течения и затрудняет процесс очистки. Эту зону рекомендуется убрать посредством создания условий закрученного течения за счет сравнительно слабого вращения бурильной колонны (30–60 об/мин). Показано, что при бурении наклонных участков необходимо уменьшать вязкость раствора (желательно до уровня пресной воды) и увеличивать скорость течения (в данном случае до 2 м/с или выше). Определено, что при бурении горизонтального участка рекомендуется раствор с вязкостью, близкой к пресной воде, при скоростях его течения на входе в скважину порядка 2 м/с (или 640 гал/мин) и максимальной скоростью бурения 9 м/ч.

Ключевые слова: скважина, горизонтальный участок, эксцентричность, бурение, моделирование, гидродинамика, реология, шлам, очистка.

Для цитирования: Харламов С.Н., Джанхорбани М., Чернов А.Г. Транспорт шлама буровым раствором в горизонтальных скважинах. Часть 2. Численные результаты бурения при оптимальных реологических свойствах раствора // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 11. – С. 7–24. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4468

UDC 504.61-536.252

DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4468

Transportation of cuttings by drilling mud in horizontal wells. Part 2. Numerical results of drilling at optimal rheological properties of mud

S.N. Kharlamov^{1✉}, M. Janghorbani¹, A.G. Chernov²

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² Scientific Secretary, TomskNIPIneft, Tomsk, Russian Federation

✉ kharsn@mail.ru

Abstract

The relevance. Ensuring technological equipment operation efficiency when drilling wells with an arbitrary orientation of their wellbores. In particular, the search for productive hydrocarbon reservoirs requires drilling deeper wells with extended horizontal sections, for which removal of the cuttings bed is the key problem of modern drilling. **The aim.** Study the features and establish the patterns of cuttings movement through the annulus eccentric space formed by a drill string and well walls under various modes (*in-situ*) and drilling conditions within the framework of modern mathematical models of hydrodynamics, numerical algorithms and approaches implemented in ANSYS CFD. Optimize the parameters that determine drilling, such as an inclination angle, mass-average velocity and morphology of the inlet rheologically complex viscous flow to form the maximum allowable drilling velocity for various combinations of mud effective viscosity and mixture flow rate. Give practical recommendations for engineers to reduce time, costs and material resources for maintenance and optimization of well cleaning. **The object.** A well with an eccentric core and an extended horizontal section operating in modes and conditions close to real drilling. **The methods.** Complex of physical and mathematical analysis and numerical modeling of hydrodynamics and mass transfer in homogeneous and heterogeneous continuous media. The media were widely tested on the class of internal rheological complex flows, the verification of which was carried out under appropriate conditions, performed by other authors when solving problems of drilling and cleaning wells. **The results.** The paper presents the results of a numerical study of hydrodynamics of a dispersed flow of a rheological complex viscous mixture of a drilling fluid with the properties of a Herschel–Bulkley type fluid and sand particles in wells with an arbitrary generatrix of its wellbore in an eccentric space. The results are required to clarify the features that accompany direct-flow and swirling flow (the moving wall method), identify the patterns in such modes, accounting for which allows for effective cleaning of the annulus. The calculations were performed within the framework of modern mathematical models of the RANS-method and the Euler–Lagrangian approach to describing the motion of heterogeneous media, implemented in the ANSYS CFD software and efficient numerical algorithms for determining intra- and interfacial processes of mass and momentum transfer in mixtures. The authors have determined that when drilling a vertical section, the most effective parameter in terms of cleaning control is the effective viscosity of the mud; the most problematic configurations for cleaning are wells with sloping sections at angles close to the vertical. When drilling a horizontal section, the eccentricity of the drill string creates “the dead” zone of flow and complicates cleaning. This zone should be removed by creating swirling flow conditions through relatively weak rotation of a drill string (30–60 rpm). When drilling inclined sections, it is necessary to reduce a solution viscosity (preferably to the level of fresh water) and increase the flow rate (in this case, to 2 m/s or higher). When drilling a horizontal section, a mud with a viscosity close to fresh water is recommended at flow rates of about 2 m/s (or 640 gpm) at the well inlet and a maximum drilling velocity of 9 m/h.

Keywords: well, horizontal section, eccentricity, drilling, modeling, hydrodynamics, rheology, cuttings, cleaning.

For citation: Kharlamov S.N., Janghorbani M., Chernov A.G. Transportation of cuttings by drilling mud in horizontal wells. Part 2. Numerical results of drilling at optimal rheological properties of mud. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 11, pp. 7–24. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4468

Введение

В статье приводятся результаты детальных численных исследований процесса транспорта шлама буровым раствором с оптимальными реологическими свойствами по протяженному горизонтальному стволу скважины при гидродинамических

условиях, соответствующих режиму *in situ* функционирования специального оборудования. Эти данные дополняют и придают большую ценность результатам по гидротранспорту, представленным в [1], опирающимся на оригинальную вычислительную методику, сведения о которой составили

материал части 1 решения указанных проблем и отмечены, например, в [2]. При систематизации рассматриваемых проблем и анализе имеющихся библиографических данных следует отметить, что при обзоре литературы основное внимание будет уделено исследованиям гидротранспорта со сложной вязкой природой буровых растворов с выраженными реологическими свойствами и высокими значениями угла отклонения ствола скважины от вертикальной оси. Это крайне важно для установления факторов, определяющих экономичность бурения с надлежащим удалением шлама. Хорошо известно, что чрезмерное накопление твердых частиц в кольцевом пространстве скважины часто сопровождается прихват бурильной трубы, создает технологические препятствия на пути к стандарту процедуры бурения и завершения работ. Это усиливает потребности практики в исследовании процессов переноса импульса, массы и теплоты в буровом растворе для определения условий качественной очистки. Детальное изучение особенностей очистки весьма *актуально* для режимов *in situ*, требует анализа многих факторов и параметров, определяющих гидродинамику, а также тепло- и массоперенос в смеси. В их числе такие, как зенитный угол, рео- и теплофизические, химико- и механические, а также структурные характеристики как горных пород, так и строения смеси флюидов с частицами шлама. Заметим, что вязкая структура буровых растворов, а также нелинейности, обусловленные возмущениями тепловой и вихревой природы, сопровождающие их движение по стволу, приводят к необходимости детального моделирования изменений теплодинамической и диффузионной структуры течения смеси в полях действия всего спектра внутренних и внешних сил. В зависимости от поставленной цели и точности задача гидротранспорта и поиска путей рациональной очистки горизонтальных участков скважины заставляет исследователей обращаться к комплексным физико-математическим, механистическим, корреляционным и эмпирическим моделям и численным методам, опирающимся на положения механики гетерогенных неоднородных сплошных сред [1–4].

Отдельные библиографические данные о моделировании течений бурового раствора и очистки ствола скважины

Следует кратко упомянуть основные работы других исследователей, касающиеся существа рассматриваемой проблемы, достаточно полно представленной в [1–4]. Так, в последние десятилетия поле сложного сдвигового течения смеси в скважинах исследовалось достаточно широко экспериментально [5–14] и теоретически в разнообразных со-

четаниях факторов, отвечающих: прихвату бурильной трубы, неэффективному удалению бурового шлама из бурового/скважинного кольцевого пространства, определению инженерных принципов увеличения среднемассовой скорости рабочей среды [10, 15–21], управлению углом наклона [7, 10, 22–29], размерами и структурой твердых частиц [5, 6, 10, 11, 13, 29–32], реофизическими свойствами раствора, способствующими очистке [22–24, 31, 33–38]. В большинстве таких исследований ставилась задача установления разумного компромисса между обеспечением безопасности и эффективности бурения за счет оптимального выбора условий течения смеси и точного прогнозирования критической скорости (например, скорости транспортирующей жидкости/шлама, критической скорости потока, минимальной и критической скорости формирования суспензионного состояния смеси и т. д.). Причем все эти параметры ориентированы на определение динамического условия, при котором может формироваться минимальная средняя скорость течения раствора для предотвращения седиментации частиц шлама и формирования его плотного «постельного» слоя. Стоит отметить, что в рамках подхода, основанного на использовании механистических моделей (например, [10, 15–21]), установление минимальной скорости представляется довольно приближенным в силу проблем: с одной стороны, поиска корректной формулировки механического равновесия между статической силой, силами сопротивления, трения, плавучести, пластических деформаций и давления; с другой, записи соотношений массового баланса между накапливаемой на дне и транспортируемой по пространству скважины массы шлама. Причем основная проблема данного подхода связана с точностью определения замыкаемых это балансовое соотношение коэффициентов, ответственных за процессы сопротивления, подъем и деформацию частиц смеси, а также наклон скважины.

Другое популярное в практике приложений направление решения задач очистки связано с определением процессов/эффектов, ответственных за увеличение скорости бурового раствора. Здесь сравнительно перспективными представляются методы контроля образования шлама за счет изменения реологии раствора, организации режимов вращения бурильной трубы. Однако в условиях прямоточно-закрученного сдвигового течения прогноз изменений в пространственной динамической и диффузионной структуре дисперсной смеси достаточно сложен. Его рекомендуется осуществлять с привлечением современных моделей и методов математического моделирования в рамках механики неоднородных сплошных сред. Нетривиальность данного подхода отмечалась в [1–4], где со-

общалось, что проблемы гидротранспорта вполне успешно решаются при детальном моделировании вращающихся потоков (методом подвижной стенки бурильной трубы) подобно тому, как, представлено, например, в [39–48], а также с учетом изменений структуры и размеров частиц, опираясь на модели, реализованные в ПО ANSYS CFD. Выводы о возможностях Эйлера-Эйлера (ЭЭ) и Эйлера-Лагранжева (ЭЛ) подходов позволяют говорить о перспективности данного направления и статистических моделей второго порядка с дифференциальными уравнениями в частных производных для описания локальных свойств турбулентных вихрей и напряжений Рейнольдса при транспорте раствора и твердых частиц шлама. Также заметим, что в [1–4] подробно обсуждаются возможности применения предлагаемой вычислительной методики в решении задач очистки.

Опираясь на полученные заключения о возможностях ЭЛ-подхода и обоснования вычислительной методики на классе внутренних течений дисперсных сред, авторы статьи выполнили моделирование и расчет процесса накопления шлама при бурении с помощью лагранжева подхода в неустановившемся режиме с привлечением алгоритма (strong coupling), учитывающего детали внутри- и межфазного взаимодействия между частицами капельной жидкости и шламом. Стоит отметить, что детали формулировки определяющих уравнений математической модели гидротранспорта, ее физические допущения к построению численного решения, особенности задания краевых условий подробно изложены в [1–4], а в настоящей работе опущены.

Важные детали построения численного решения задачи и ее основные параметры

Расчеты выполнены с учетом задания следующей геометрической конфигурации пространства скважины и условий течения дисперсной смеси: горизонтальный участок скважины представляет собой кольцевой канал с соосным расположением труб с параметрами: $D=20$ см, $d=12$ см – внешний и внутренней диаметры труб, что соответствует обычным размерам долот и бурильных труб в России и за рубежом для горизонтальных участков; длина скважины $L=6$ м, которая отвечает протяженности порядка $60 D_{гд}$ с целью исключения влияния на течение возмущений со входа, где $D_{гд}$ – гидравлический диаметр; эксцентricность $e=75\%$, что также характерно для горизонтальных участков и условий, когда бурильная труба лежит на своих муфтах на нижней стенке скважины (рис. 1).

Разностная сетка представлена на рис. 2 и включает общее число восьмиугольных ячеек порядка 325000 для горизонтальных участков и 305600 для

всех остальных случаев. Причем принимается, что погрешность расчета локальных значений полей скорости при увеличении числа ячеек не превышает 2 %.

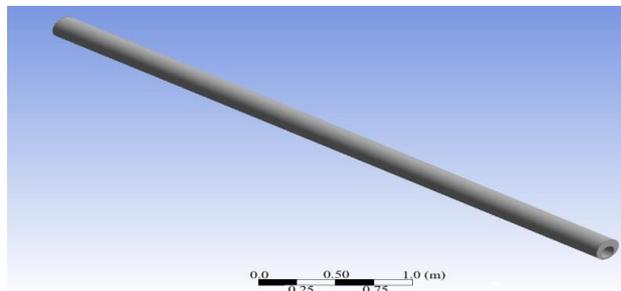


Рис. 1. Геометрия скважины с эксцентричной бурильной трубой

Fig. 1. Geometry of a well with an eccentric drill pipe

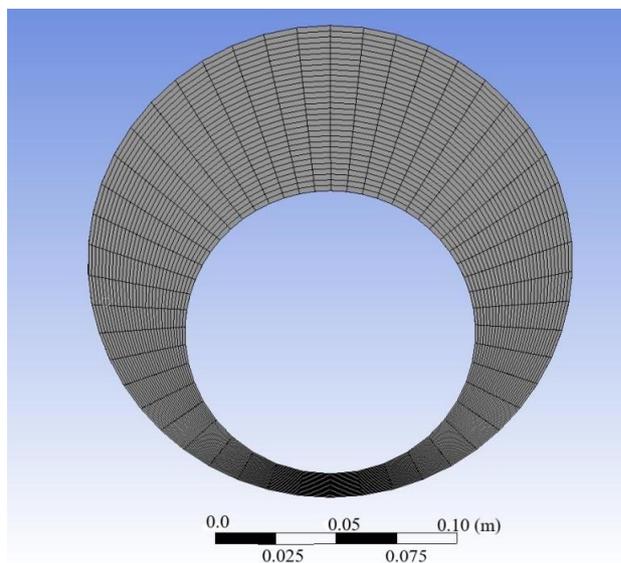


Рис. 2. Разностная сетка в поперечном сечении межтрубного пространства

Fig. 2. Difference grid in a cross-section of a space annulus

Для достижения требуемой точности интегрирования уравнений вводится соответствующий критерий малости между решениями, получаемыми на двух последних итерациях ($m, m+1$) для соответствующих пространственных изменений искомых локальных динамических параметров ($\Phi = \{\mathbf{v}_f, \mathbf{v}_p, \overline{v'_i v'_j}, k, \varepsilon, \omega, L\}$) и их интегральных значений (например, $\Phi_{wf} = \tau_{wf}$ – сопротивления трения) в рамках RANS-метода и RSS- $k\omega$ -модели турбулентности, отвечающих виду:

$$\max_{i,j,k} \left\{ \frac{|\Phi_{i,j,k}^{m+1} - \Phi_{i,j,k}^m|}{\Phi_{i,j,k}^{m+1}} \right\} \leq \Delta_\Phi, \quad \Delta_\Phi = O(10^{-3}), \quad \%$$

При определении поля давления используется стандартная процедура PISO (расширение алгоритма SIMPLE [49, 50]), а также алгоритм Strong Coupling, ПО ANSYS CFD [49], учитывающий детали внутри- и межфазного взаимодействия между капельной жидкостью и твердыми частицами.

Предполагается, что реология раствора описывается моделью Гершеля–Балкли. Плотность буровых растворов имеет широкий диапазон. Но при выполнении сравнений и установлении особенностей гидродинамики растворов принимается, что плотность раствора соответствует плотности пресной воды (1000 кг/м^3). Твердую фазу представляли моно-размерные шарообразные частицы (песка) с плотностью $\rho_p=2650 \text{ кг/м}^3$ и диаметром $d_p=6 \text{ мм}$. Считалось, что в области входа скорости частиц равны нулю. Скорость бурения породы – $R=10...12 \text{ м/ч}$. Число частиц, загружаемых в эксцентричное пространство для случая горизонтального участка скважины, равно 825, для всех остальных геометрических конфигураций – 800, что в рамках принятых значений их плотности и диаметра соответствует массе порядка 1,98 и 1,92 кг, соответственно. Важно отметить, что указанные значения частиц и их общая масса эквивалентны буровой выработке 0,024 и 0,023 м горной породы с долотом диаметра 20 см. Более того, допускаем, что пористость породы пренебрежимо мала (и это считается наихудшей ситуацией с точки зрения очистки скважин). В расчетах смоделированы сценарии входа раствора в скважину со скоростями входа: 1 м/с (или 320 гал/мин для данной геометрии); 1,5 м/с (480 гал/мин); 2 м/с (640 гал/мин); 2,5 м/с (800 гал/мин) и 3 м/с (960 гал/мин). Все эти данные весьма характерны для бурения и с учетом задания вязкостей и морфологии раствора соответствуют режимам течения смеси при числах Рейнольдса в диапазоне $Re=2000...240000$. Кроме того, допускается, что углы отклонения ствола скважины от вертикали соответствуют значениям: 0° ; 15° ; 30° ; 45° ; 60° ; 75° и 90° . Гидродинамическая конфигурация соответствует условиям прямоочного течения. Вращение труб не рассматривается, чтобы прогнозировать самые худшие случаи с точки зрения очистки скважин. Также важно подчеркнуть, что указанные условия встречаются при *слайдинге*, когда долото вращается только с помощью забойного двигателя для изменения угла наклона ствола.

Численное решение строится по алгоритму с отработкой следующих блоков: 1. Рассчитывается течение жидкой фазы с привлечением блока Coupled; 2. Определяется динамика частиц твердой фазы с выполнением глобальных итераций по линеаризации эффектов в расчетах фаз, обусловленных переменностью физических свойств и конвективно-диффузионными внутри- и межфазными

процессами. Это сопровождается линеаризацией решения с порядка 800 итерациями на каждом временном слое и достижением погрешности в параметрах, определяющих процессы переноса массы и импульса, меньше 10^{-5} . Расчеты выполнены в рамках ПО ANSYS FLUENT 2021 R1. Важно отметить, что контроль за эффективностью процесса очистки связан с анализом параметра, ответственного за время, в течение которого все частицы проходят рассматриваемую геометрию и выходят из ствола скважины. С практической точки зрения исследование этого параметра важно с целью оптимизации очистки скважин. Для этого организуются мероприятия и рекомендации персоналу для уменьшения его значений. Также для практики важны сценарии уменьшения параметра, ответственного за время прохождения частицами межтрубного пространства. Так, если при течении смеси возникают процессы, при которых время пребывания частиц в межтрубном меньше или равно времени течения жидкой фазы (например, для рассмотренных скоростей течения формируются значения 6, 4, 3, 2,4 и 2 с), частицы пробуренной породы выносятся раствором из геометрии. Однако, если с течением времени возникают режимы движения частиц, при которых это время превосходит время течения жидкой фазы, следует ожидать, что частицы будут накапливаться в донной части, причем тем интенсивнее, чем больше будет величина их времени пребывания. Такая ситуация требует оперативной остановки процесса бурения и проведения более частых операций по удалению загрязнений и очистке скважин от шлама.

Результаты и их анализ

Данные расчета процессов в вертикальных скважинах. Хорошо известно [51], что при бурении вертикальных участков вязкость оказывает определяющее влияние на транспорт смеси и очистку, поскольку способна существенно уменьшать скорость скольжения частиц в глубину скважины. В таких ситуациях практически ценно для эффективности бурения, что чем больше вязкость раствора, тем эффективнее частицы поднимаются потоком и выносятся из рабочего пространства скважины. Данные на рис. 3 подтверждают суть этих эффектов.

Из рис. 3. видно, что транспорт частиц раствором с высокой вязкостью в условиях интенсификации течения (посредством увеличения его скорости на входе) обеспечивает эффективность выноса шлама в сравнении с данными о течении растворов с меньшей вязкостью в соответствующих условиях. Другими словами, течение высоковязких растворов является предпочтительным для осуществления операций очистки, т. к. обеспечивает уменьшение

времени пребывания частиц с увеличением входной скорости раствора.

Такая тенденция важна для практики, т. к. всегда можно связать время пребывания частиц в межтрубном пространстве со скоростью бурения и попытаться полностью очистить скважину. С этой целью необходимо ограничить скорость бурения, чтобы уже забуренные частицы успевали покинуть межтрубное пространство скважины. Стоит отметить, что для заданной геометрической и гидродинамической конфигурации задачи очистки настоящие расчеты позволяют рекомендовать в практику значения скорости бурения U_{dr} , [м/ч], которые можно определить в виде: $U_{dr} = L_{drock} / T_{rt}$, где $L_{drock} = 0,023$ м – продольная длина области пробуренной породы, T_{rt} – время пребывания частиц в скважине. На рис. 4. приведены распределения скорости бурения U_{dr} в зависимости от изменений характерной скорости входа раствора в скважину при различных значениях эффективной вязкости μ .

Наклонная часть скважины. Заметим, что процессы переноса импульса и массы в таких конфи-

гурациях существенно отличаются от своих аналогов для вертикальной области течения. Результаты расчетов показывают, что с увеличением вязкости раствора в таких геометриях время пребывания T_{rt} заметно увеличивается. Это связано с тем, что увеличение вязкости вызывает повышение силы сопротивления, не позволяя частицам двигаться с потоком, вынуждая их накапливаться в донной части и непосредственно на стенках скважины, где скорость течения минимальна. В этой области частицы не скользят вниз и не поднимаются вверх. Данные на рис. 5 иллюстрируют особенности такого течения. Здесь представлено распределение траектории движения одиночной твердой частицы и значение ее осевой компоненты вектора скорости при течении дисперсной смеси (раствора и шлама) по межтрубному пространству скважины с наклонным участком. Расчеты выполнены при следующих значениях параметров течения: скорость входа раствора – 1 м/с; угол отклонения от вертикали – 30°; эффективная вязкость – 40 сПз.

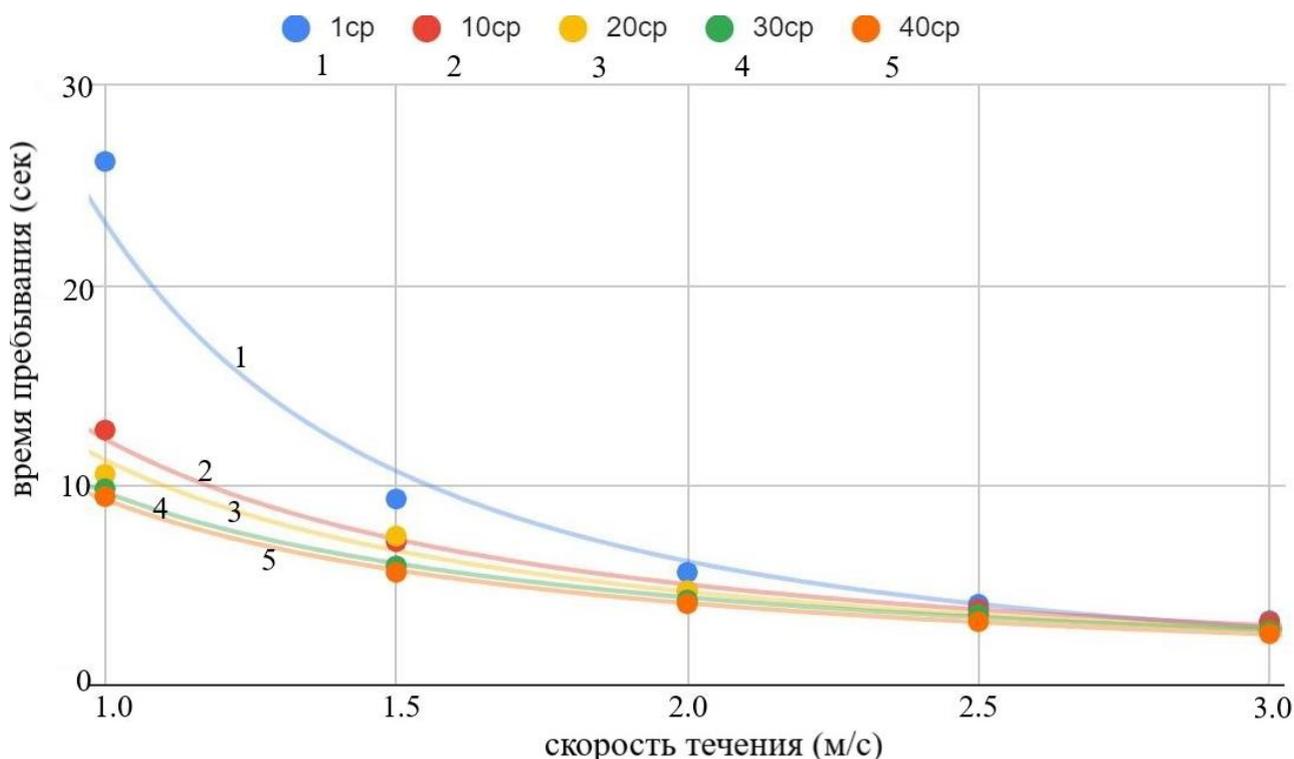


Рис. 3. Распределения времени пребывания частиц буровой выработки в зависимости от скорости входа в скважину раствора с различной вязкостью. Сплошные линии (1)–(5) – аппроксимационные кривые результатов расчетов (значки), соответствующие эффективной вязкости μ , [сПз]=1 (линия 1), 10 (2), 20 (3), 30 (4), 40 (5)

Fig. 3. Distributions of the residence time of drill floor particles depending on an entry velocity of a mud with different viscosity into a well. Solid lines (1)–(5) are the approximation curves of the calculation results (icons) corresponding to the effective viscosity μ , [cp]=1 (line 1), 10 (2), 20 (3), 30 (4), 40 (5)

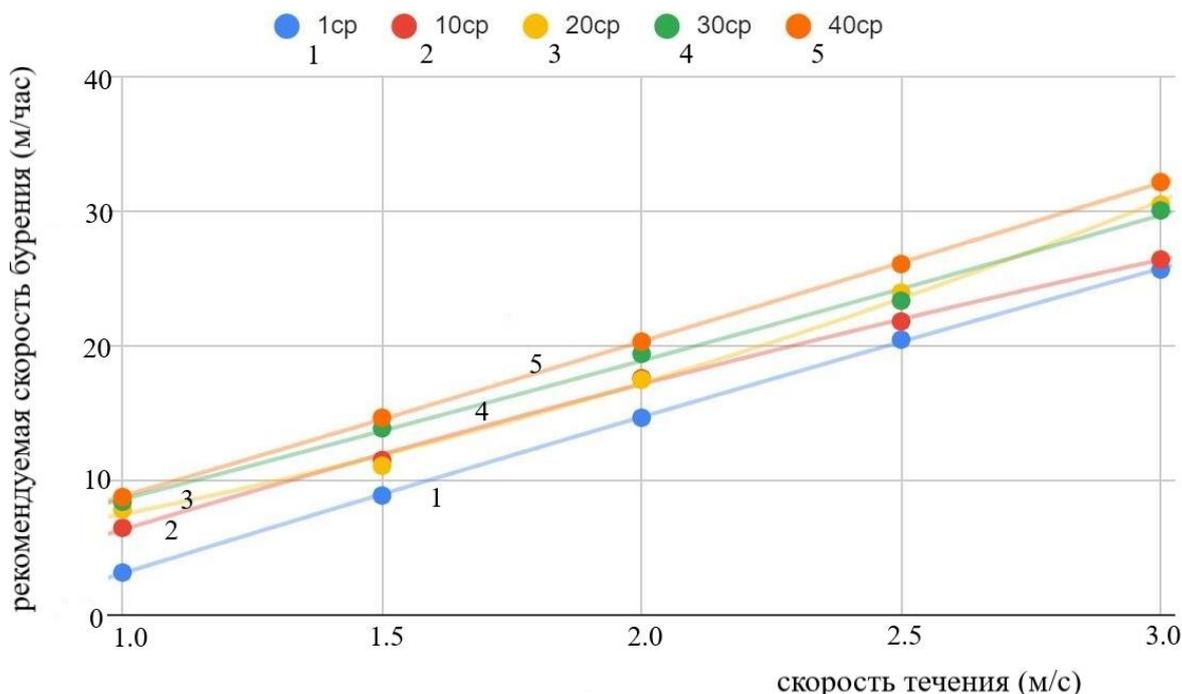


Рис. 4. Распределения рекомендуемой скорости бурения в зависимости от изменений скорости входа раствора при различных значениях его эффективной вязкости. Сплошные линии (1)–(5) – аппроксимационные кривые результатов расчета (значки), соответствующие эффективной вязкости μ , [сПз]=1 (линия 1), 10 (2), 20 (3), 30 (4), 40 (5)

Fig. 4. Distributions of the recommended drilling speed depending on changes in the mud entry velocity at different values of its effective viscosity. Solid lines (1)–(5) are the approximation curves of the calculation results (icons) corresponding to the effective viscosity μ , [ср]=1 (line 1), 10 (2), 20 (3), 30 (4), 40 (5)

Результаты расчетов указывают, что кроме случая, когда раствор имеет очень низкую вязкость (по условиям задачи равную вязкости пресной воды (1 сПз)), течение раствора с другими (более высоки-

ми) значениями вязкости сопровождается процессами, при которых возникает картина течения смеси с минимальной скоростью в донной части скважины при разных углах ее отклонения от вертикали.

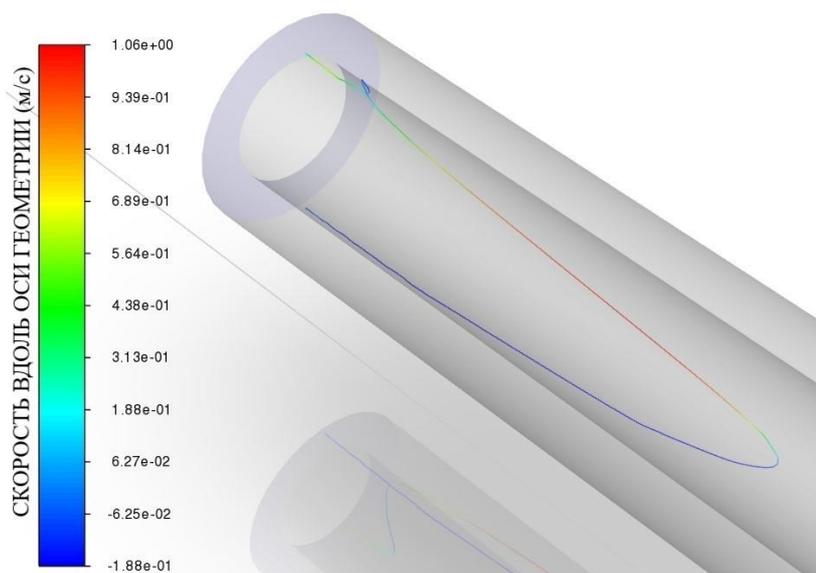


Рис. 5. Распределение траектории движения отдельной твердой частицы и значение ее осевой компоненты вектора скорости при течении дисперсной смеси (раствора и шлама) по межтрубному пространству

Fig. 5. Distribution of the trajectory of an individual solid particle movement and the value of its axial component of a velocity vector at the dispersed mixture (mud and sludge) flow through the annulus

В таких ситуациях частицы имеют возможность перемещаться по пространству скважины и не осаждаются на стенку. А это приводит к тому, что случай, иллюстрированный данными на рис. 5, не возникает. Кроме того, детальные расчеты показывают: 1. Минимальная скорость транспорта смеси будет: 2,5 м/с (при течении раствора с вязкостью $\mu=10, 20$ и 30 сПз; при углах отклонения от вертикали $15^\circ, 30^\circ$ и 45°); 2,0 м/с (для 60°); 1,5 м/с (для 75°); 2. При течении раствора с вязкостью $\mu=40$ сПз и углом отклонения 15° возникает картина течения с минимальной скоростью, равной 3 м/с .

Таким образом, видно, что при течении раствора в скважине с углом наклона, стремящимся к нулю, возникает ситуация, осложняющая очистку скважины. Однако корректным, с точки зрения очистки, следует считать течение в условиях снижения вязкости и увеличения скорости течения. Расчеты этого режима иллюстрируют данные, представленные на рис. 6. Здесь приведены распределения времени пребывания частиц в межтрубном пространстве скважины в зависимости от изменений вязкости раствора при различных значениях угла отклонения, где сплошные линии – аппроксимационные кривые результатов расчетов (значки), соответствующие значениям угла отклонения: $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$.

Из рис. 6 следует, что картина увеличения времени пребывания с ростом вязкости возможна в ситуациях, при которых угол отклонения стремится к нулю (участок ближе к вертикали).

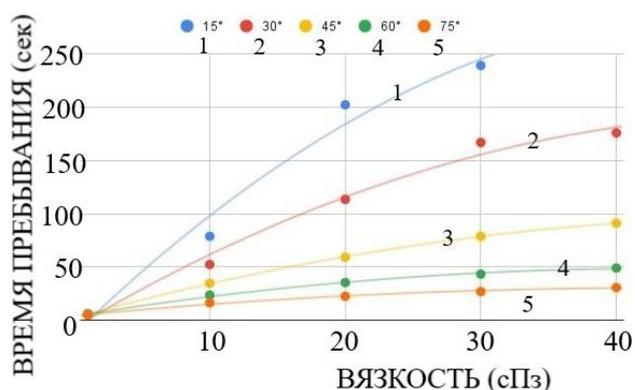


Рис. 6. Распределения времени пребывания частиц в межтрубном пространстве скважины в зависимости от изменений вязкости раствора при различных значениях угла отклонения (линии 1–5). Расчеты отвечают скорости входа раствора 2,5 м/с

Fig. 6. Distributions of a residence time of particles in a well annulus depending on changes in a solution viscosity at different values of a deviation angle (lines 1–5). The calculations correspond to the mud entry velocity 2.5 m/s

Установлено, что в таких конфигурациях минимальная скорость бурения существенно зависит от вязкости. Как следует из рис. 7, необходимо поддерживать её значение $\mu < 10$ сПз (и даже $\mu < 5$ Пз) или скорость бурения следует уменьшать до неэкономических величин ($U_{dr} < 1$ м/ч). В противном случае технологический процесс бурения будет сопровождаться плохой очисткой.

Горизонтальная часть скважины. В таких конфигурациях проявляется влияние ещё одного параметра – эксцентricности. Заметим, что численное значение и влияние эксцентricности бурильной трубы относительно оси скважины нельзя распространить на соответствующие процессы в наклонной части. В таких ситуациях возникают специфические эффекты, зависящие от многих факторов. Однако для горизонтальных участков скважины можно с уверенностью сказать, что эксцентricность существует и соответствует 75 %, так как в областях, удаленных от калибраторов, элементы бурильной колонны лежат на своих муфтах. Как видно из рис. 8, влияние эксцентricности на время пребывания частиц в межтрубном пространстве скважины может быть очень существенным.

Такая картина течения возникает в силу того, что эксцентricность создаёт некую «мёртвую» зону в нижней части скважины, где течение почти отсутствует. Специфику такого движения иллюстрируют данные, представленные на рис. 9.

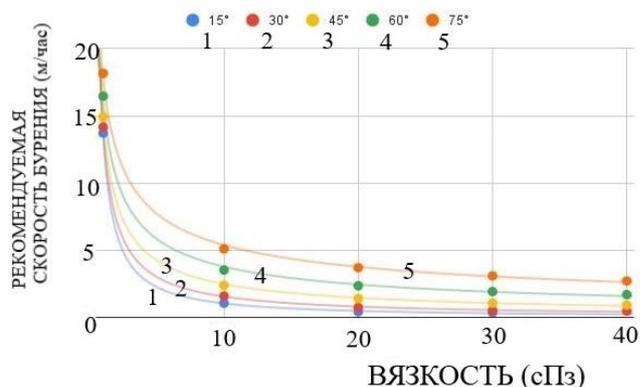


Рис. 7. Распределения рекомендуемой скорости бурения U_{dr} и ее максимальных значений при изменении вязкости раствора в скважинах с разными значениями углов наклона (линии 1–5): 15° (линия 1), 30° (2), 45° (3), 60° (4), 75° (5). Расчеты отвечают скорости раствора на входе 2,5 м/с

Fig. 7. Distributions of the recommended U_{dr} drilling speed and its maximum values, when the mud viscosity changes in wells with different inclination angles (lines 1–5): 15° (line 1), 30° (2), 45° (3), 60° (4), 75° (5). The calculations correspond to the mud velocity at the inlet 2.5 m/s

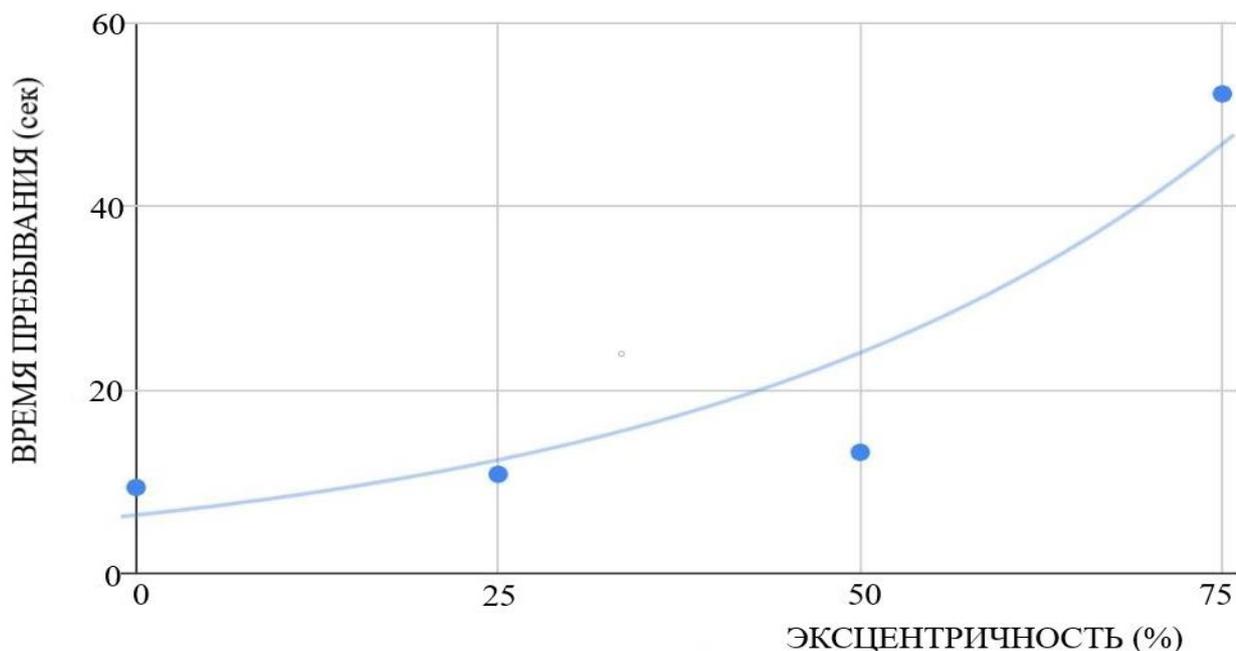
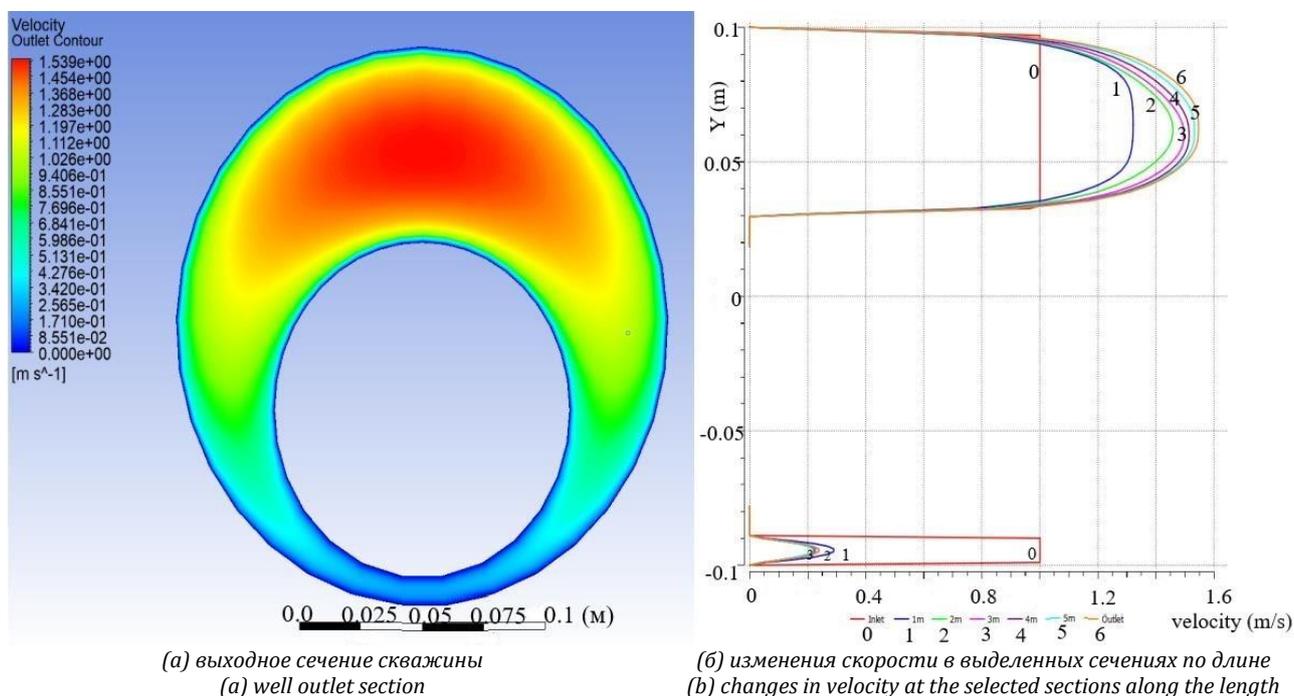


Рис. 8. Распределение времени пребывания частиц в межтрубном пространстве в зависимости от эксцентricности скважины. Расчеты выполнены при: $\mu=1$ сПз; $U_0=1$ м/с

Fig. 8. Distribution of residence time of particles in the annulus depending on well eccentricity. The calculations were performed at: $\mu=1$ sP; $U_0=1$ m/s



(а) выходное сечение скважины
 (a) well outlet section

(б) изменения скорости в выделенных сечениях по длине
 (b) changes in velocity at the selected sections along the length

Рис. 9. Картины радиальных распределений осевой компоненты вектора скорости раствора в области выхода (а) и в отдельных по длине сечениях (б) согласно данным линий (0)–(6). Расчеты соответствуют: $\mu=10$ сПз; $U_0=1$ м/с, $e=75\%$; 0 линия ($x=0$ м – вход), 1 (1), 2 (2), 3 (3), 4 (4), 5 (5), 6 ($x=6$ м – выход)

Fig. 9. Patterns of radial distributions of the axial component of the mud velocity vector in the exit area (a) and in the selected sections (b) along the length according to lines (0)–(6). The calculations correspond to: $\mu=10$ sP; $U_0=1$ m/s, $e=75\%$; 0 line ($x=0$ m – inlet), 1 (1), 2 (2), 3 (3), 4 (4), 5 (5), 6 ($x=6$ m – outlet)

Наш опыт исследования гидродинамики внутреннего дисперсного течения и очистки эксцентричных областей показывает [3, 4, 52, 53], что одним из эффективных методов блокирования не только самой зоны, но и механизмов ее генерации является организация мероприятий по вращению бурильной колонны. В таких режимах течения смеси даже слабое вращение при числах Россби $Ro \approx O(10^{-1})$ ($Ro = W_w/U_0$, где $W_w = \Omega r_1$) представляется весьма эффективным. Об этом свидетельствуют данные, представленные на рис. 10, соответствующие прямоточно-закрученному движению реологически сложной вязкой смеси при $Ro \leq 0,15$. Детали верификации математической модели и численного алгоритма расчета вязкостно-инерционно-гравитационных ламинарных и турбулентных внутренних течений в трубах со сложной конфигурацией поверхности/геометрии ствола скважины, а также гидродинамических эффектов в гетерогенной смеси подробно описаны в отдельных публикациях (например, [53–58]).

Из рис. 10 следует, что в диапазоне значений $\Omega = 30 \dots 60$ об/мин (или $Ro = (2 \dots 6) \cdot 10^{-2}$) вращение сопровождается нелинейным характером уменьшения времени пребывания частиц в скважине.

Однако последующий рост величины крутящего момента вызывает увеличение напряжения на бурильную трубу, причем из-за комплексных процессов от вращения бурильной трубы как вдоль своей собственной оси, так и вдоль продольной оси скважины возникают удары трубы о стенки скважины, что серьезно интенсифицирует накопление шлама.

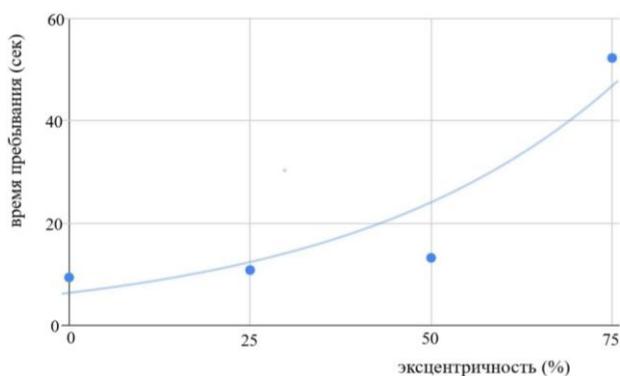


Рис. 10. Распределение времени пребывания частиц в межтрубном пространстве скважины в зависимости от изменений скорости вращения (Ω) бурильной трубы диаметром d_1 . Расчеты соответствуют $\mu = 1$ сПз; $U_0 = 1$ м/с, $e = 75$ %, $d_1 = 0,12$ м

Fig. 10. Distribution of residence time of particles in a well annulus depending on changes in rotation velocity (Ω) of the drill pipe with diameter d_1 . The calculations correspond to $\mu = 1$ sP; $U_0 = 1$ m/s, $e = 75$ %, $d_1 = 0.12$ m

В силу этих причин рекомендуется ограничивать скорость вращения до значений, меньших 60 об/мин (или $Ro \leq 0,06$). Стоит отметить, что такой режим прямоточно-вращательного течения не всегда возможен, особенно в технологиях типа *слайдинга* (при попытках изменить или скорректировать направление скважины). Наряду с этим, выдача рекомендаций по работе оборудования в отмеченных условиях важна, поскольку представляет наихудший сценарий с точки зрения очистки и поэтому рассматривается в настоящем исследовании.

Данные на рис. 11 демонстрируют влияние скорости течения раствора на входе в скважину с горизонтальным участком при разных значениях его вязкости на время пребывания частиц. Здесь, так же как и в случае с наклонной частью трубы, видно, что с увеличением вязкости раствора (μ) его течение при более высоких скоростях на входе (U_0) сопровождается уменьшением времени пребывания частиц в межтрубном пространстве скважины.

Здесь, как и в случае с вертикальной частью скважины, можно предложить в практику значение рекомендуемой скорости бурения, $U_{dr} = L_{drock}/T_r$, где $L_{drock} = 0,024$ м – продольная длина области пробуренной породы, соответствующая 825 частицам с $d_p = 6$ мм, T_r – время пребывания частиц в скважине. На рис. 12. приведены данные максимально допустимой скорости бурения с точки зрения очистки. Видно, что для беспроблемного бурения с экономичной скоростью необходимо уменьшать вязкость до уровней пресной воды, иначе придется бурить со скоростью меньше 1 м/ч. Либо сталкиваться с проблемами, обусловленными некачественной очисткой.

Результаты анализа данных на рис. 12 приводят к вопросу: будет ли бурение скважин с произвольным изменением образующей ее ствола эффективным при применении растворов со свойствами пресной воды? Это важный вопрос, так как при бурении горизонтальной части скважины частицам приходится проходить через все пространство скважины так, чтобы избежать процесса накопления.

В этом отношении важны результаты, представленные на рис. 13, где изображены распределения значений времени пребывания частиц в межтрубном пространстве скважины от изменений скорости входа раствора при различных значениях угла отклонения рабочего участка от вертикали. Видно, что самым проблематичным участком выступает участок с углом 15° . Но это соответствует только потоку при низких скоростях течения на входе. Причем установлено, что, когда условия течения в скважинах соответствуют $U_0 = 2$ м/с, влияние от изменений угла наклона на время пребывания частиц в межтрубном пространстве весьма незначительное.

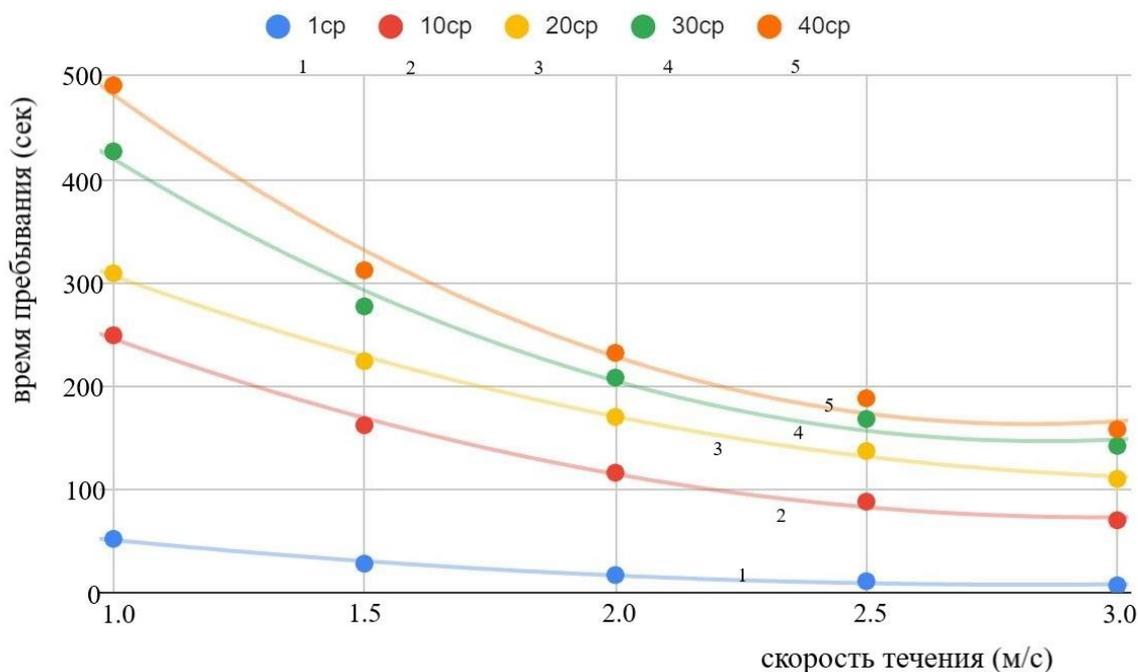


Рис. 11. Распределения времени пребывания в межтрубном пространстве скважины в зависимости от изменений скорости входа раствора при различных значениях его вязкости. Сплошные линии (1)–(5) – аппроксимационные кривые результатов расчетов (символы), соответствующих параметрам: μ , [сПз]=1 (линия 1), 10 (2), 20 (3), 30 (4), 40 (5)

Fig. 11. Distributions of residence time of particles in a well annulus depending on changes in the entry velocity of the mud at different values of its viscosity. Solid lines (1)–(5) are the approximation curves of the calculation results (symbols) corresponding to parameters: μ , [sP]=1 (line 1), 10 (2), 20 (3), 30 (4), 40 (5)

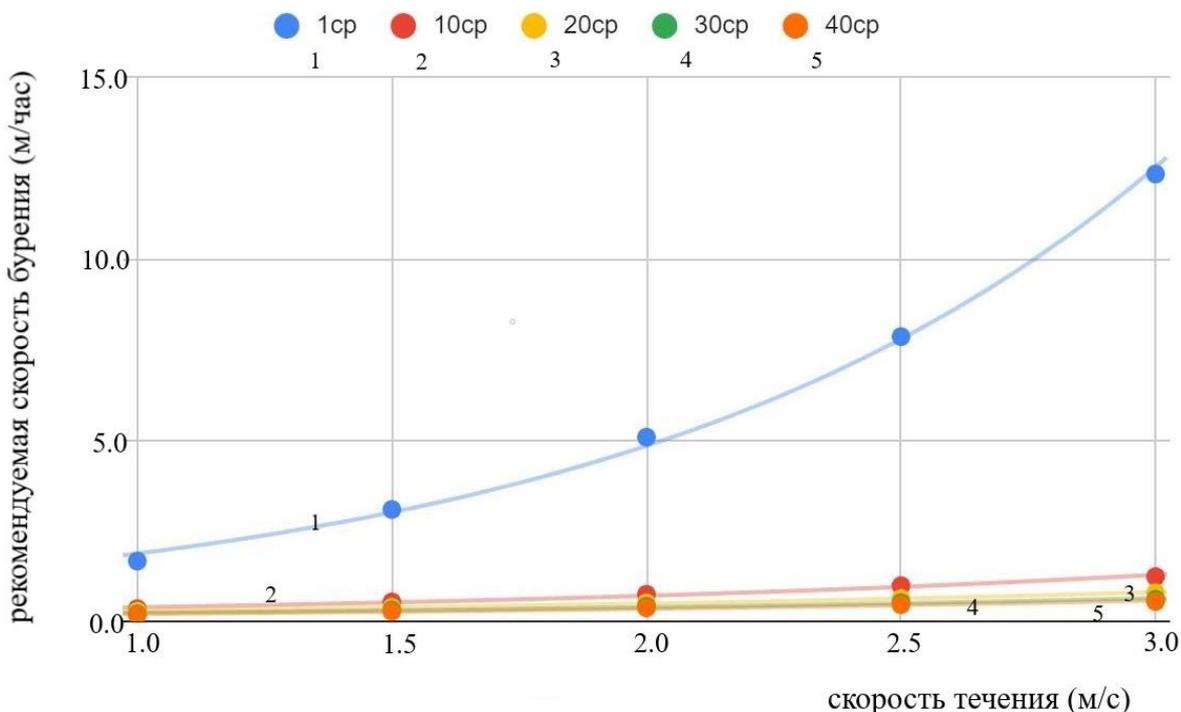


Рис. 12. Распределения максимально рекомендуемой скорости бурения в зависимости от изменений скорости раствора на входе при различных значениях его вязкости (линии (1)–(5)): μ , [сПз]=1 (линия 1), 10 (2), 20 (3), 30 (4), 40 (5)

Fig. 12. Distributions of the maximum recommended drilling velocity depending on changes in the mud inlet velocity at various values of its viscosity (lines (1)–(5)): μ , [cp]=1 (line 1), 10 (2), 20 (3), 30 (4), 40 (5)

Данные рис. 14 показывают распределения максимально рекомендуемой скорости бурения при течении раствора со свойствами пресной воды в скважинах с произвольным значением угла наклона. Из результатов расчета следует, что если выбрать скорость течения раствора на входе порядка 2 м/с, то следует бурить со скоростью 9 м/ч, что хорошо соответствует сценарию бурения горизонтальных

участков. Если требуется повысить скорость бурения, придётся увеличить скорость течения до 2,5 м/с (или 13 м/ч) или до 3 м/с (18 м/ч). Такие решения приводят к необходимости учета особенностей и эффектов в технологическом процессе из-за увеличения перепада давления (рис. 15), которые во многих случаях, преимущественно в длинных горизонтальных участках, недопустимы и опасны.

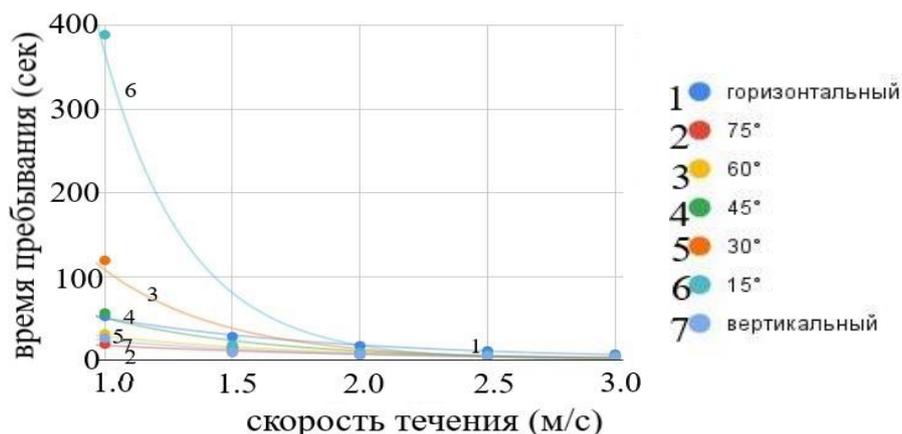


Рис. 13. Распределения времени пребывания частиц в межтрубном пространстве скважины в зависимости от изменений скорости входа раствора (со свойствами пресной воды) при различных значениях угла отклонения рабочего участка от вертикали. Сплошные линии (1)–(7) – аппроксимационные кривые результатов расчетов (символы), соответствующие различным значениям угла наклона

Fig. 13. Distributions of residence time of particles in a well annulus depending on changes in the entry velocity of the mud (with fresh water properties) at different values of the working section deviation angle from the vertical. Solid lines (1)–(7) are the approximation curves of the calculation results (symbols) corresponding to different values of the slope angle

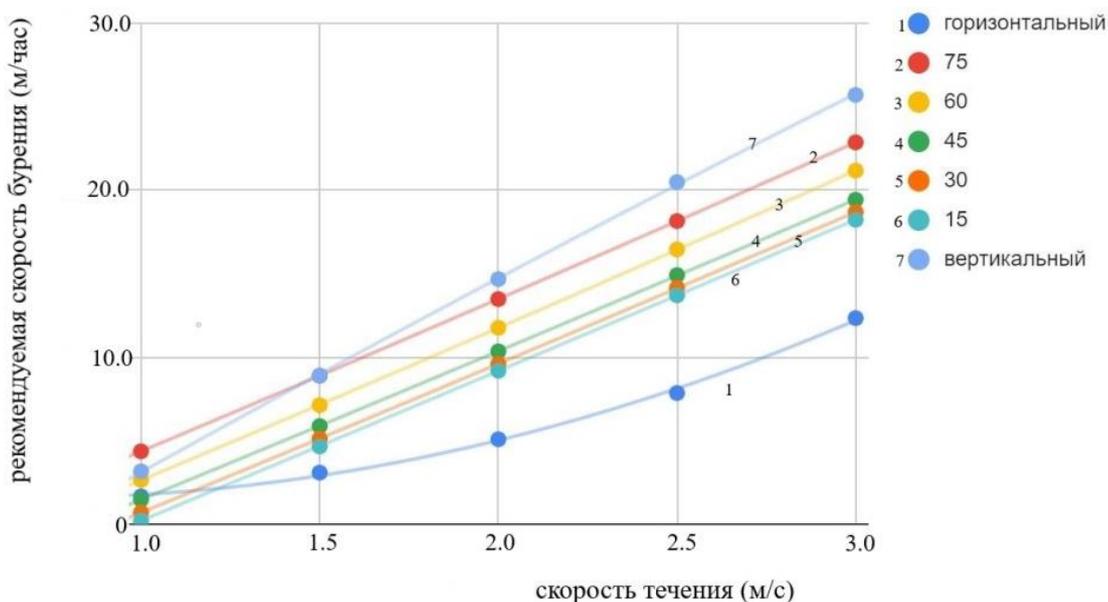


Рис. 14. Распределения максимально рекомендуемой скорости бурения при течении раствора со свойствами пресной воды в скважинах с различным значением угла наклона (линии и символы (1)–(7))

Fig. 14. Distributions of the maximum recommended drilling velocity during the flow of the mud with the fresh water properties in wells with different inclination angle values (lines and symbols (1)–(7))

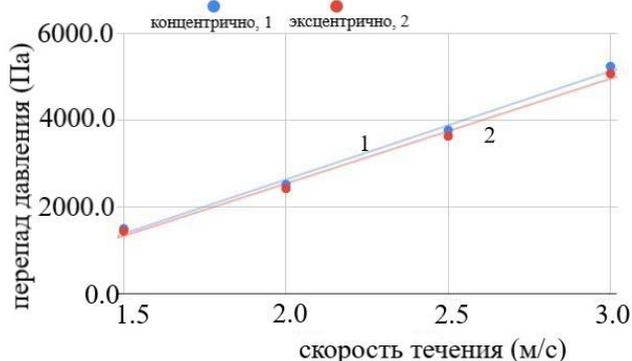


Рис. 15. Распределение перепада давления в зависимости от изменений скорости входа раствора в скважину при течении в коаксиальном (линия (1) и ее символ) и эксцентричном (линия (2) и ее символ) пространстве. Расчеты соответствуют углу наклона 90°

Fig. 15. Distribution of pressure drop depending on changes of the mud entry velocity into the well during flow in coaxial (line (1) and its symbol) and eccentric (line (2) and its symbol) space. The calculations correspond to the inclination angle 90°

Из данных рис. 15 видно, что наблюдается рост значений перепада давления с увеличением скорости течения раствора со свойствами пресной воды как в концентричной, так и в эксцентричной конфигурациях скважины. Это замечание ценно для практики исследований процессов очистки.

Заключение

В данной работе представлены результаты численного исследования гидродинамики дисперсного потока реологически сложной вязкой смеси бурового раствора со свойствами жидкости типа Гершеля–Балкли и частиц песка в скважинах с произвольной образующей ее ствола в эксцентричном пространстве с целью выяснения особенностей, сопровождающих прямоочное и закрученное течение (методом подвижной стенки), выявления закономерностей в таких режимах, учет которых позволяет проводить эффективную очистку межтрубного пространства. Расчеты выполнены в рамках современных математических моделей RANS-метода, эйлерово-лагранжева подхода к описанию движения гетерогенных сред, реализованного в ПО ANSYS CFD, и эффективных численных алгоритмов по определению внутри- и межфазных процессов переноса массы и импульса в смесях. Причем анализ особенностей и закономерностей гидротранспорта, деталей формирования «мертвой» зоны отвечает сценариям входа раствора в скважину при скоростях [гал/мин]: 320; 480; 640; 800 и 960. Все эти данные весьма характерны для бурения при задании вязкостей и морфологии раствора типа Гершеля–Балкли и соответствуют режимам тече-

ния смеси при числах Рейнольдса в диапазоне $Re=(0,02\dots2,4)\cdot 10^5$, а также изменению зенитного угла скважины в диапазоне $(0\dots90)^\circ$. Принимается, что скорость бурения породы соответствует 10...12 м/ч, а число загружаемых частиц для гидротранспорта на горизонтальных участках скважины соответствует массе порядка 1,98 кг.

С целью рекомендаций результатов расчета в практику приложений процессов бурения и очистки скважин рассматривалась скважина с горизонтальным участком. Проведена работа по оптимизации параметров бурения для установления условий эффективной очистки. Изучение особенностей течений и очистки скважин с произвольным наклоном ствола привело к следующим выводам.

1. При бурении вертикального участка самым эффективным параметром с точки зрения контроля очистки выступает эффективная вязкость раствора и смеси в целом.
2. Самыми проблематичными конфигурациями для очистки являются скважины с наклонными участками при углах близких к вертикали.
3. При бурении горизонтального участка эксцентricность бурильной колонны относительно оси скважины создаёт «мёртвую» зону течения и таким образом серьезно затрудняет процесс очистки. Наши расчеты демонстрируют, что условия для формирования «мёртвой» зоны определяются суперпозицией механизмов, сопровождающих течение смеси в зоне с высокой вязкостью, и вследствие изменения эксцентricности межтрубного пространства. В таком процессе движение частиц интенсифицируется в зоне высокой вязкости и снижается в донной части. Последнее способствует образованию постельного слоя шлама на дне скважины. Следовательно, чем шире зона высокой вязкости, тем больше процентов частиц транспортируется потоком.
4. Анализ вязкостно-инерционно-гравитационного течения смеси в заданном диапазоне $(0\dots90)^\circ$ значений изменений зенитного угла скважины позволяет утверждать, что до тех пор, пока не меняется режим течения вследствие изменения скорости потока, инерционные механизмы не оказывают заметного влияния на гидротранспорт частиц. Это характерно как для течений на горизонтальных участках, так и на трубах с большой эксцентricностью. Отмечается, что общее изменение скорости на входе заметно влияет на перепад поля давления и является главным инерционным механизмом гидротранспорта на вертикальных участках.
5. Расчеты показывают, что «мёртвую» зону можно убрать посредством создания условий закрученного течения за счет сравнительно слабого

вращения буровой трубы (30...60 об/мин). Однако установлено, что увеличение скорости вращения незначительно влияет на очистку пространства скважин от шлама.

6. При бурении наклонных участков необходимо уменьшать вязкость раствора (желательно до уровня пресной воды) и увеличивать скорость течения (в данном случае до 2 м/с или выше)
7. Среди неньютоновских жидкостей самыми эффективными с точки зрения очистки являются те, которые имеют сильные тиксотропные свойства: их вязкость существенно уменьшается с увеличением скоростей деформаций. Это позволяет отметить, что в режимах, когда насосы отключены, раствор может поддерживать частицы в суспензии.
8. Вычислительная методика демонстрирует, что в рамках ПО ANSYS CFD вполне успешно можно предсказать максимально допустимую скорость бурения и другие параметры в разных областях скважины. Например, в рассмотренной в данной работе конфигурации течения при бурении горизонтального участка рекомендуется раствор с

вязкостью, близкой к пресной воде, при скоростях на входе в скважину порядка 2 м/с (или 640 гал/мин) и максимальной скорости бурения, равной 9 м/ч. Полученные результаты соответствуют всесторонней верификации алгоритма расчета гидродинамики внутренних изотермических пространственных движений двухфазных смесей (капельной жидкости с частицами песка) в эксцентричных кольцевых трубах при использовании современных реологических моделей (типа Гершеля–Балкли) и передовых технологий и подходов (Эйлера–Эйлера/Эйлера–Лагранжа, RANS-метода) для описания структуры течений уравнениями законов сохранения массы, импульса и энергии составляющих смеси. Это определяет преимущества представленной вычислительной технологии в сравнении с имеющимися инженерными методиками и обоснованно демонстрирует возможность улучшения очистки горизонтальных участков скважины от пробуренного шлама.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kharlamov S.N., Janghorbani M., Bryksin M.R. Aspects of computer simulation of transport and cleaning processes from cuttings in horizontal well sections // *Mathematical Models and Computer Simulations*. – 2023. – V. 15. – № 3. – P. 502–519.
2. Харламов С. Н., Джангхорбани М., Брыксин М.Р. К проблеме установления продолжительности бурения скважин в условиях отсутствия вращения буровой колонны // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 7–26.
3. Харламов С.Н., Джангхорбани М. Численный прогноз движения смеси вязкой капельной жидкости с твердыми частицами во входной области эксцентричных кольцевых труб и их очистки от шлама // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 6. – С. 18–41.
4. Харламов С.Н., Джангхорбани М. Оптимизация реологических свойств бурового раствора, интенсифицирующих транспорт и очистку горизонтальных скважин от шламов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 8. – С. 91–108.
5. An experimental study of transport of drilling cuttings in a horizontal well / H.G. Wang, X.S. Liu, H.Q. Li, G. Ding // *Acta Petrolei Sinica*. – 1995. – V. 16. – № 4. – P. 125–132.
6. Bassal A.A. The effect of drillpipe rotation on cuttings transport in inclined wellbores. MS Thesis. – Tulsa, Oklahoma, USA, 1996. – 110 p.
7. Sifferman T.R., Becker T.R. Hole cleaning in full-scale inclined wellbores // *SPE Drilling Engineering*. – 1992. – V. 7. – № 2. – P. 115–120.
8. Sorgun M. Modelling of Newtonian fluids and cuttings transport analysis in high inclination wellbores with pipe rotation. Thesis. – Ankara, Turkey, 2010. – 177 p.
9. Effect of pipe rotation on hole cleaning for water-based drilling fluids in horizontal and deviated wells / M.E. Ozbayoglu, A. Saasen, M. Sorgun, K. Svanes // *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition*. – Jakarta, Indonesia, 25–27 August 2008. – P. 1–21.
10. Peden J.M., Ford J.T., Oyenyin M.B. Comprehensive experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined wells including the effects of rotation and eccentricity // *European Petroleum Conference*. – The Hague, Netherlands, 21–24 October 1990. – P. 1–15.
11. Effect of drillpipe rotation on hole cleaning during directional-well drilling / R.A. Sanchez, J.J. Azar, A.A. Bassal, A.L. Martins // *SPE Journal*. – 1999. – V. 4. – № 2. – P. 101–108.
12. Bilgesu H.I., Mishra N., Ameri S. Understanding the effects of drilling parameters on hole cleaning in horizontal and deviated wellbores using computational fluid dynamics // *Eastern Regional Meeting*. – Lexington, USA, 17–19 October 2007. – 23 p.
13. Transport of small cuttings in extended reach drilling / M.Q. Duan, S. Miska, M.J. Yu, N. Takach, R. Ahmed // *SPE Drilling Completion*. – 2008. – V. 23. – № 3. – P. 258–265.
14. Simulation on the effect of drillstring rotation on hole cleaning for extended reach well / M. Li, Y.F. Jv, Z.Q. Wang, B.Y. Hao, Y.K. Hong // *West-china Exploration Engineering*. – 2010. – № 5. – P. 51–54.
15. Hole cleaning performance of light-weight drilling fluids during horizontal underbalanced drilling / M.E. Ozbayoglu, M. Sorgun, A. Saasen, K. Svanes // *Journal of Canadian Petroleum Technology*. – 2010. – V. 49. – № 4. – P. 21–26.
16. Clark R.K., Bickham K.L. A mechanistic model for cuttings transport // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. – New Orleans, Louisiana, 25–28 September 1994. – 15 p.

17. Larsen T.I., Pilehvari A.A., Azar J.J. Development of a new cuttings transport model for high- angle wellbores including horizontal wells // SPE Drilling Completion. – 1997. – V. 12. – № 2. – P. 129–136.
18. Critical conditions for effective sand-sized solids transport in horizontal and high-angle wells / M.Q. Duan, S. Miska, M.J. Yu, N. Takach, R. Ahmed, C. Zettner // SPE Drilling Completion. – 2009. – V. 24. – № 2. – P. 229–238.
19. Luo Y.J., Bern P.A., Chambers B.D. Flow-rate predictions for cleaning deviated wells // SPE/IADC Drilling Conference. – New Orleans, USA, 18–21 February 1992. – P. 1–18.
20. Mirhaj S.A., Shadizadeh S.R., Fazaelizadeh M. Cuttings removal simulation for deviated and horizontal wellbores // SPE Middle East Oil and Gas Show and conference. – Bahrain, 11–14 March, 2007. – P. 1–12.
21. Mohammadsalehi M. Malekzadeh N. Optimization of hole cleaning and cuttings removal in vertical, deviated and horizontal wells // Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. – Jakarta, Indonesia, 20–22 September 2011. – P. 21–34.
22. Seeberger M.H., Matlock R.W., Hanson P.M. Oil muds in large diameter, highly deviated wells: solving the cuttings removal problem // SPE/IADC Drilling Conference. – New Orleans, USA, 28 February – 3 March 1989. – P. 1–16.
23. Okrajni S.S., Azar J.J. The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells // SPE Drilling Engineering. – 1986. – V. 1. – № 4. – P. 297–308.
24. Impact of drilling fluid viscosity, velocity and hole inclination on cuttings transport in horizontal and highly deviated wells / P. Ali, I. Issham, Y. Zulkefli, B. Parham, S. Ahmad // Journal of the Petroleum Exploration and Production Technology. – 2012. – № 2. – P. 149–156.
25. Yang S.R., Zhang J.F., Shen J.N. Experimental study on the law of drilling fluid carrying cuttings in highly-deviated wells // Journal of Daqing Petroleum Institute. – 1997. – V. 21. – № 1. – P. 126–129.
26. Brown N.P., Bern P.A., Weaver A. Cleaning deviated holes: new experimental and theoretical studies // SPE/IADC Drilling Conference. – New Orleans, USA, 28 February – 3 March 1989. – P. 1–17.
27. Zamora M., Hanson P. Rules of thumb to improve high-angle hole cleaning // Petroleum Engineer International. – 1991. – № 1 (January). – P. 44–51.
28. Becker T.E., Azar J.J. Okrajni S.S. Correlations of mud rheological properties with cuttings- transport Performance in directional drilling // SPE Drilling Engineering. – 1991. – V. 6. – № 1. – P. 16–24.
29. Mishra N. Investigation of hole cleaning parameters using computational fluid dynamics in horizontal and deviated wells. M.S. Thesis. – West Virginia, USA, 2007. – 76 p.
30. Ali M.W. A parametric study of cutting transport in vertical and horizontal wells using Computational Fluid Dynamics (CFD). M.S Thesis. – West Virginia, USA, 2002. – 174 p.
31. Walker S., Li J. The effects of particle size, fluid rheology, and pipe eccentricity on cuttings transport // SPE/ICoTA Coiled Tubing Roundtable. – Houston, USA, 5–6 April 2000. – P. 1–25.
32. Optimizing cuttings circulation in horizontal drilling / A.L. Martins, C.H.M. Sa, A.M.F. Lourenco, W Campos. // International Petroleum Conference and Exhibition of Mexico. – Villahermosa, Mexico, 5–7 March 1996. – 11 p.
33. Hareland G., Azar J.J., Rampersad P.R. Comparison of cuttings transport in directional drilling using low-toxicity invert emulsion mineral-oil-based and water-based muds // Low Permeability Reservoirs Symposium. – Denver, USA, 26–28 April 1993. – 21 p.
34. Meano W.J. Experimental study of shale cuttings transport in an inclined annulus using mineral oil-base mud. M.S. Thesis. – Tulsa, Oklahoma, USA, 1987. – 23 p.
35. Kelessidis V.C., Bandelis G.E. Flow of dilute solid-liquid mixtures in horizontal concentric and eccentric annuli // Journal of Canadian Petroleum Technology. – 2007. – V. 46. – № 5. – P. 56–61.
36. Experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined boreholes / J.T. Ford, J.M. Peden, M.B. Oyeneyin, Gao Erhu, R. Zarrough // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – New Orleans, USA, 23–26 September 1990. – V. 37. – P. 1–20.
37. Experimental study of effective hole cleaning using "sweeps" in horizontal wellbores / S.G. Valluri, S.Z. Miska, R. Ahmed, M. Yu, N.E. Takach // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – San Antonio, USA, 24–27 September 2006. – P. 1–26.
38. Selecting drilling fluid properties and flow rates for effective hole cleaning in high-angle and horizontal wells / B.A. Rishi, M. Stefan, K. Ergun, B. Peter, S. Arild // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Dallas, USA, 1–4 October 2000. – P. 23–41.
39. Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool to study cutting transport in wellbores / H.I. Bilgesu, M.W. Ali, K. Aminian, S. Ameri // The Eastern Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers. – Lexington, Kentucky, USA, October, 2002. – 27 p.
40. Solid-liquid hydrodynamics in a slim hole drilling annulus / S.-M. Han, H. Young-Kyu, W. Nam-Sub, K. Young-Ju // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2010. – V. 70. – № 3–4. – P. 308–319.
41. Effect of drillpipe rotation on cuttings transport using computational fluid dynamics (CFD) in complex structure wells / S. Xiaofeng, K. Wang, T. Yan, S. Shao, J. Jiao // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2014. – V. 4. – № 3. – P. 255–261.
42. Ofei T.N., Irawan S., Pao W. CFD method for predicting annular pressure losses and cuttings concentration in eccentric horizontal wells // Journal of Petroleum Engineering. – 2014. – № 4. – P. 110–120.
43. Hole-cleaning performance comparison of oil-based and waterbased drilling fluids / S. Sneha, B. Lund, J.D. Ytrehus, A. Saasen // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 159. – P. 49–57.
44. Heydari Omid, Eghbal Sahraei, Pål Skalle. Investigating the impact of drillpipe's rotation and eccentricity on cuttings transport phenomenon in various horizontal annuluses using computational fluid dynamics (CFD) // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 156. – P. 801–813.
45. Numerical prediction of flow behavior of cuttings carried by Herschel-Bulkley fluids in horizontal well using kinetic theory of granular flow / Pang Boxue, Shuyan Wang, Guodong Liu, Xiaoxue Jiang, Huilin Lu, Zhenjie Li // Powder Technology. – 2018. – V. 329. – P. 386–398.
46. Gidaspow D. Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions. – Sand Diego: Academic press, 1994. – 467 p.

47. Syamlal Madhava, O'Brien T.J. The derivation of a drag coefficient formula from velocity-voidage correlations // Technical Note. – Morgantown, WV: US Department of energy, Office of Fossil Energy, NETL, 1987. – P. 1–11.
48. Mme U., Pål Skalle. CFD calculations of cuttings transport through drilling annuli at various angles // International Journal of Petroleum Science and Technology. – 2012. – V. 6. – № 2. – P. 129–141.
49. Ansys Fluent Users Guide 13. Fluent Incorporated, ANSYS Inc. – Canonsburg: PA, USA, 2010. – 230 p.
50. Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. – New York: McGraw-Hill, 1980. – 150 p.
51. Харламов С.Н., Джангхорбани М. Процессы транспорта шлама при очистке скважин с произвольной ориентацией буровых труб, содержащих эксцентрично расположенное круглое ядро с подвижной стенкой: проблемы, результаты, перспективы (обзор) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 131–149.
52. Харламов С.Н., Джангхорбани М. Численное моделирование течений вязких смесей бурового шлама и потока сырой нефти на горизонтальных участках скважин с эксцентричными бурильными трубами // Новые вызовы фундаментальной и прикладной геологии нефти и газа – XXI век: Материалы Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых, посвященную 150-летию акад. АН СССР И.М. Губкина и 110-летию акад. АН СССР и РАН А.А. Трофимука. Секция 2. Геология нефти и газа. Подсекция 3. Нефтегазопромысловая геология. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2021. – С. 221–224. DOI: 10.25205/978-5-4437-1248-2-221-224
53. Харламов С.Н., Джангхорбани М., Филиппов К.А. Математическое моделирование и методы исследования гидродинамической очистки горизонтальных скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 8. – С. 53–73.
54. Бубенчиков А.М., Харламов С.Н. Математические модели неоднородной анизотропной турбулентности во внутренних течениях. – Томск: Томский государственный университет, 2001. – 448 с.
55. Харламов С.Н., Джангхорбани М. Численное исследование вязкостно-инерционного ламинарного закрученного течения в круглой трубе с эксцентричным круглым ядром // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 7–21.
56. Busch A. On particle transport and turbulence in wellbore flows of non-Newtonian fluids –findings from cuttings transport process analysis by means of computational fluid dynamics, rheometry and dimensional analysis. PhD Diss. – Norway, 2020. – 187 p.
57. Харламов С.Н., Фатъянов Д.С. Моделирование пространственных течений вязких сред в системе каналов с участками соединений сложной формы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 5. – С. 70–88.
58. Харламов С.Н., Фатъянов Д.С. Исследование структуры турбулентного потока природного сырья в трубопроводах с секцией переменного по длине поперечного сечения конфузорно-диффузорного типа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 8. – С. 53–67.

REFERENCES

1. Kharlamov S.N., Janghorbani M., Bryksin M.R. Aspects of computer simulation of transport and cleaning processes from cuttings in horizontal well sections. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 502–519.
2. Kharlamov S.N., Janghorbani M., Bryksin M.R. On the issue of establishing the duration of well drilling without the drill string rotation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 9, pp. 7–26. In Rus.
3. Kharlamov S.N., Janghorbani M. Numerical prediction of flow of viscous drip liquid mixture with solid particles in inlet field of eccentric annular tubes and cleaning them from sludge. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 6, pp. 18–41. In Rus.
4. Kharlamov S.N., Janghorbani M. Optimization of rheological properties of drilling mud intensifying transportation and cleaning of horizontal wells from cuttings. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 8, pp. 91–108. In Rus.
5. Wang H.G., Liu X.S., Li H.Q., Ding G. An experimental study of transport of drilling cuttings in a horizontal well. *Acta Petrolei Sinica*, 1995, vol. 16, no. 4, pp. 125–132.
6. Bassal A.A. *The effect of drillpipe rotation on cuttings transport in inclined wellbores*. MS Thesis. Tulsa, Oklahoma, USA, 1996. 110 p.
7. Sifferman T.R., Becker T.R. Hole cleaning in full-scale inclined wellbores. *SPE Drilling Engineering*, 1992, vol. 7, no. 2, pp. 115–120.
8. Sorgun M. *Modelling of Newtonian fluids and cuttings transport analysis in high inclination wellbores with pipe rotation*. Thesis. Ankara, Turkey, 2010. 177 p.
9. Ozbayoglu M.E., Saasen A., Sorgun M., Svanes K. Effect of pipe rotation on hole cleaning for water-based drilling fluids in horizontal and deviated wells. *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition*. Jakarta, Indonesia, 25–27 August 2008. pp. 1–21.
10. Peden J.M., Ford J.T., Oyenev M.B. Comprehensive experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined wells including the effects of rotation and eccentricity. *European Petroleum Conference*. The Hague, Netherlands, 21–24 October 1990. pp. 1–15.
11. Sanchez R.A., Azar J.J., Bassal A.A., Martins A.L. Effect of drillpipe rotation on hole cleaning during directional-well drilling. *SPE Journal*, 1999, vol. 4, no. 2, pp. 101–108.
12. Bilgesu H.I., Mishra N., Ameri S. Understanding the effects of drilling parameters on hole cleaning in horizontal and deviated wellbores using computational fluid dynamics. *Eastern Regional Meeting*. Lexington, USA, 17–19 October 2007. 23 p.
13. Duan M.Q., Miska S., Yu M.J., Takach N., Ahmed R. Transport of small cuttings in extended reach drilling. *SPE Drilling Completion*, 2008, vol. 23, no. 3, pp. 258–265.
14. Wang Z.Q., Hao B.Y., Hong Y.K. Simulation on the effect of drillstring rotation on hole cleaning for extended reach well. *West-china Exploration Engineering*, 2010, no. 5, pp. 51–54.

15. Ozbayoglu M.E., Sorgun M., Saasen A., Svanes K. Hole cleaning performance of light-weight drilling fluids during horizontal underbalanced drilling. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2010, vol. 49, no. 4, pp. 21–26.
16. Clark R.K., Bickham K.L. A mechanistic model for cuttings transport. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. New Orleans, Louisiana, 25–28 September 1994. 15 p.
17. Larsen T.I., Pilehvari A.A., Azar J.J. Development of a new cuttings transport model for high-angle wellbores including horizontal wells. *SPE Drilling Completion*, 1997, vol. 12, no. 2, pp. 129–136.
18. Duan M.Q., Miska S., Yu M.J., Takach N., Ahmed R., Zettner C. Critical conditions for effective sand-sized solids transport in horizontal and high-angle wells. *SPE Drilling Completion*, 2000, vol. 24, no. 2, pp. 229–238.
19. Luo Y.J., Bern P.A., Chambers B.D. Flow-rate predictions for cleaning deviated wells. *SPE/IADC Drilling Conference*. New Orleans, USA, 18–21 February 1992. pp. 1–18.
20. Mirhaj S.A., Shadizadeh S.R., Fazelizadeh M. Cuttings removal simulation for deviated and horizontal wellbores. *SPE Middle East Oil and Gas Show and conference*. Bahrain, 11–14 March, 2007. pp. 1–12.
21. Mohammadsalehi M., Malekzadeh N. Optimization of hole cleaning and cuttings removal in vertical, deviated and horizontal wells. *Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. Jakarta, Indonesia, 20–22 September 2011. pp. 21–34.
22. Seeberger M.H., Matlock R.W., Hanson P.M. Oil muds in large diameter, highly deviated wells: solving the cuttings removal problem. *SPE/IADC Drilling Conference*. New Orleans, USA, 28 February – 3 March 1989. pp. 1–16.
23. Okrajni S.S., Azar J.J. The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells. *SPE Drilling Engineering*, 1986, vol. 1, no. 4, pp. 297–308.
24. Ali P., Issham I., Zulkefli Y., Parham B., Ahmad S. Impact of drilling fluid viscosity, velocity and hole inclination on cuttings transport in horizontal and highly deviated wells. *Journal of the Petroleum Exploration and Production Technology*, 2012, no. 2, pp. 149–156.
25. Yang, S.R., Zhang J.F., Shen J.N. Experimental study on the law of drilling fluid carrying cuttings in highly-deviated wells. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 1997, vol. 21, no. 1, pp. 126–129.
26. Brown N.P., Bern P.A., Weaver A. Cleaning deviated holes: new experimental and theoretical studies. *SPE/IADC Drilling Conference*. New Orleans, USA, 28 February – 3 March 1989. pp. 1–17.
27. Zamora M., Hanson P. Rules of thumb to improve high-angle hole cleaning. *Petroleum Engineer International*, 1991, no. 1 (January), pp. 44–51.
28. Becker T.E., Azar J.J., Okrajni S.S. Correlations of mud rheological properties with cuttings-transport Performance in directional drilling. *SPE Drilling Engineering*, 1991, vol. 6, no. 1, pp. 16–24.
29. Mishra N. *Investigation of hole cleaning parameters using computational fluid dynamics in horizontal and deviated wells*. M.S. Thesis. West Virginia, USA, 2007. 76 p.
30. Ali M.W. *A parametric study of cutting transport in vertical and horizontal wells using Computational Fluid Dynamics (CFD)*. M.S Thesis. West Virginia, USA, 2002. 174 p.
31. Walker S., Li J. The effects of particle size, fluid rheology, and pipe eccentricity on cuttings transport. *SPE/ICoTA Coiled Tubing Roundtable*. Houston, USA, 5–6 April 2000. pp. 1–25.
32. Martins A.L., Sa C.H.M., Lourenco A.M.F., Campos W. Optimizing cuttings circulation in horizontal drilling. *International Petroleum Conference and Exhibition of Mexico*. Villahermosa, Mexico, 5–7 March 1996. 11 p.
33. Hareland G., Azar J.J., Rampersad P.R. Comparison of cuttings transport in directional drilling using low-toxicity invert emulsion mineral-oil-based and water-based muds. *Low Permeability Reservoirs Symposium*. Denver, USA, 26–28 April 1993. 21 p.
34. Meano W.J. *Experimental study of shale cuttings transport in an inclined annulus using mineral oil-base mud*. M.S. Thesis. Tulsa, Oklahoma, USA, 1987. 23 p.
35. Kelessidis V.C., Bandelis G.E. Flow of dilute solid-liquid mixtures in horizontal concentric and eccentric annuli. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2007, vol. 46, no. 5, pp. 56–61.
36. Ford J.T., Peden J.M., Oyenyin M.B., Gao Erhu, Zarrough R. Experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined boreholes. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. New Orleans, USA, 23–26 September 1990. Vol. 37, pp. 1–20.
37. Valluri S.G., Miska S.Z., Ahmed R., Yu M., Takach N.E. Experimental study of effective hole cleaning using "sweeps" in horizontal wellbores. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. San Antonio, USA, 24–27 September 2006. pp. 1–26.
38. Rishi B.A., Stefan M., Ergun K., Peter B., Arild S. Selecting drilling fluid properties and flow rates for effective hole cleaning in high-angle and horizontal wells. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Dallas, USA, 1–4 October 2000. pp. 23–41.
39. Bilgesu H.I., Ali M.W., Aminian K., Ameri S. Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool to study cutting transport in wellbores. *The Eastern Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers*. Lexington, Kentucky, USA, October, 2002. 27 p.
40. Han S.-M., Young-Kyu H., Nam-Sub W., Young-Ju K. Solid-liquid hydrodynamics in a slim hole drilling annulus. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, vol. 70, no. 3–4, pp. 308–319.
41. Xiaofeng S., Wang K., Yan T., Shao S., Jiao J.. Effect of drillpipe rotation on cuttings transport using computational fluid dynamics (CFD) in complex structure wells. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 255–261.
42. Ofei T.N., Irawan S., Pao W. CFD method for predicting annular pressure losses and cuttings concentration in eccentric horizontal wells. *Journal of Petroleum Engineering*, 2014, no. 4, pp. 110–120.
43. Sneha S., Lund B., Ytrehus J.D., Saasen A. Hole-cleaning performance comparison of oil-based and waterbased drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 159, pp. 49–57.
44. Heydari Omid, Eghbal Sahraei, Pål Skalle. Investigating the impact of drillpipe's rotation and eccentricity on cuttings transport phenomenon in various horizontal annuluses using computational fluid dynamics (CFD). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 156, pp. 801–813.
45. Pang Boxue, Shuyan Wang, Guodong Liu, Xiaoxue Jiang, Huilin Lu, Zhenjie Li. Numerical prediction of flow behavior of cuttings carried by Herschel-Bulkley fluids in horizontal well using kinetic theory of granular flow. *Powder Technology*, 2018, vol. 329, pp. 386–398.

46. Gidaspow D. *Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions*. Sand Diego, Academic press, 1994. 467 p.
47. Syamlal Madhava, O'Brien T.J. The derivation of a drag coefficient formula from velocity-voidage correlations. *Technical Note*. Morgantown, WV, US Department of energy, Office of Fossil Energy, NETL, 1987. pp. 1–11.
48. Mme U., Pål Skalle. CFD calculations of cuttings transport through drilling annuli at various angles. *International Journal of Petroleum Science and Technology*, 2012, vol. 6, no. 2, pp. 129–141.
49. *Ansys Fluent Users Guide 13*. Fluent Incorporated, ANSYS Inc. Canonsburg PA, USA, 2010. 230 p.
50. Patankar S.V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. New York, McGraw-Hill, 1980. 150 p.
51. Kharlamov S.N., Janghorbani M. Cuttings transport in hole cleaning considering well orientation, pipe eccentricity and pipe rotation: Problems, results, prospects (survey). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 7, pp. 131–149. In Rus.
52. Kharlamov S.N., Janghorbani M. Chtislennoe modelirovanie techeniy vyazkikh smesey burovogo shlama i potoka syroy nefi na gorizontalnykh uchastkakh skvazhin s ekstsentrichnymi burilnymi trubami [Numerical modeling of the currents of viscous mixtures of drilling sludge and the flow of crude oil on horizontal sections of wells with eccentric drilling pipes]. *Novye vyzovy fundamentalnoy i prikladnoy geologii nefi i gaza – XXI vek. Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s uchastiem inostrannykh uchenykh, posvyashchennoy 150-letiyu akademika AN SSSR I.M. Gubkina i 110-letiyu akademika AN SSSR i RAN A.A. Trofimuka*. Sectsiya 2. Geologiya nefi i gaza. Podsektiya 3. Neftepromyslovaya geologiya [New challenges of fundamental and applied geology of oil and gas–XXI century. Materials of the All-Russian Scientific Conference with the participation of foreign scientists, dedicated to the 150th anniversary I.M. Gubkin, the Academy of Sciences of the USSR and the 110th anniversary acad. A.A. Trofimuk. Section 2. Geology of oil and gas. Subsection 3. Oil and gas geology]. Novosibirsk, CPI NSU, 2021. pp. 221–224. DOI: 10.25205/978-5-4437-1248-2-221-224
53. Kharlamov S.N., Janghorbani M., Filippov K.A. Mathematical modeling and research methods of horizontal wells hydrodynamic cleaning. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 8, pp. 53–73. In Rus.
54. Bubenchikov A.M., Kharlamov S.N. *Matematicheskie modeli neodnorodnoy anizotropnoy turbulentnosti vo vnutrennikh sistemakh* [Mathematical models of inhomogeneous anisotropic turbulence at the internal flows]. Tomsk, Tomsk State University of Publ. House, 2001. 448 p.
55. Kharlamov S.N., Janghorbani M. Numerical simulation of viscous – inertial laminar swirling flow in a circular tube with an eccentric round core. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 7–21. In Rus.
56. Busch A. *On particle transport and turbulence in wellbore flows of non-Newtonian fluids –findings from cuttings transport process analysis by means of computational fluid dynamics, rheometry and dimensional analysis*. PhD Diss. Norway, 2020. 187 p.
57. Kharlamov S.N., Fatyanov D.S. Simulation of viscous media spatial flows in the system of channels with sections of complex form junctions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 5, pp. 70–88. In Rus.
58. Kharlamov S.N., Fatyanov D.S. Investigation of natural raw materials turbulent flow structure in pipelines at confuser-diffuser section. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 8, pp. 53–67. In Rus.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сергей Николаевич Харламов, профессор, доктор физико-математических наук, профессор отделения нефтегазового дела, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, пр. Ленина, 30. kharsn@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-4362-2511>; шифр специальностей ВАК: 2.8.2; 05.13.18; 01.02.05; 2.8.5; 01.01.07.

Мехран Джанхорбани, аспирант, отделение нефтегазового дела, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, пр. Ленина, 30. mehnan.janghorbani@gmail.com

Артем Геннадиевич Чернов, кандидат технических наук, ученый секретарь, АО «ТомскНИПИнефть», Россия, 634027, г. Томск, пр. Мира 72. ChernovAG@tomsknipi.ru

Поступила в редакцию: 10.05.2023

Поступила после рецензирования: 14.05.2023

Принята к публикации: 28.05.2023

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey N. Kharlamov, Dc. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation. kharsn@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-4362-2511>

Mehran Janghorbani, Postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation, mehnan.janghorbani@gmail.com

Artem G. Chernov, Cand. Sc., Scientific Secretary, Joint Stock Company of the TomskNIPIneft, Tomsk, Russian Federation, ChernovAG@tomsknipi.ru

Received: 10.05.2023

Revised: 14.05.2023

Accepted: 28.05.2023