



РАЗВЕДКА И РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

УДК 622.243.24

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-285-293>



Показатели эффективности удаления шлама при бурении наклонно направленных скважин

Анатолий Иванович Ламбин^а

^а*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

Резюме. Очистка ствола по-прежнему является серьезной проблемой для большинства наклонно направленных скважин, несмотря на значительный прогресс, достигнутый в области буровых растворов, инструментов и полевой практики, а также развитие университетских и отраслевых исследований. Недостаточная очистка скважины вызывает нежелательные явления, проявляющиеся в виде различного рода осложнений. В связи с этим целью проведенного исследования являлось представление основных корреляций, определяющих характер и степень очистки кольцевого эксцентричного пространства скважины, а также анализ этих корреляций, представленных в виде показателей, с целью их улучшения. Объектом исследования в данном случае стала механика удаления шлама из наклонной или горизонтальной скважины. Механика в исследованиях математически отображается в виде показателей, фиксирующих ту или иную физическую сущность процесса удаления шлама. Методика исследования заключалась в анализе состава показателей, оценке значимости составляющих элементов показателя, выявлении количественного вклада показателя в степень очистки кольцевого пространства наклонно направленной скважины от продуктов разрушения в процессе углубления ее забоя. В результате исследования автором представлены такие показатели, как эквивалентная плотность циркуляции, скорость скольжения и индекс выноса шлама, проиллюстрирована физическая сущность показателей в их математической форме. Больше внимание уделено скорости скольжения. Определение данной скорости, устоявшееся среди специалистов, указывает на скорость омывания буровым раствором частиц шлама в процессе его транспортирования на дневную поверхность. Этот показатель является одним из основных элементов, определяющих гидродинамику процесса транспорта шлама. С целью упрощения его вычисления предложено использование безразмерного критерия Лященко.

Ключевые слова: скважина, буровой раствор, скорость, гидравлическое сопротивление, частицы шлама

Для цитирования: Ламбин А. И. Показатели эффективности удаления шлама при бурении наклонно направленных скважин // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 3. С. 285–293. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-285-293>.

EXPLORATION AND DEVELOPMENT OF MINERAL DEPOSITS

Original article

Indicators of cutting removal efficiency when drilling directional wells

Anatoly I. Lambin^а

^а*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

Abstract. Borehole cleaning is still a major challenge for most directional wells despite a significant progress achieved in drilling fluids, tools and field practice, as well as in the development of academic and industry research. Insufficient cleaning of the borehole causes undesirable phenomena in the form of various complications. Therefore, the purpose of the conducted research was to present the main correlations that determine the nature and cleaning degree of the annular eccentric space of the well and to analyze these correlations presented in the form of indicators in order to improve them. The object of the research is the mechanics of cuttings removal from an inclined or horizontal well. In the frameworks of this research mechanics is mathematically displayed in the form of indicators reflecting one or another physical aspect of the

© Ламбин А. И., 2022



cuttings removal process. The research methodology consists in the analysis of the composition of indicators, evaluation of the significance of the indicator constituents, identification of the quantitative contribution of the indicator to the cleaning degree of the annular space of the directional well from destruction products while sinking the borehole. The study resulted in the introduction of the following indicators: equivalent circulation density, slip velocity and cuttings removal index. The physical essence of indicators in their mathematical form is shown with the focus on the slip velocity. The definition of the latter, which is widely accepted among the specialists indicates the rate of washing of cutting particles by the drilling fluid during its transportation to the day-light surface. This indicator is one of the main ones that determine the hydrodynamics of the cuttings transport process. To simplify the calculation of the indicator, it is proposed to use the dimensionless Lyashchenko criterion.

Keywords: well, drilling fluid, velocity, hydraulic resistance, particles of cuttings

For citation: Lambin A. I. Indicators of cutting removal efficiency when drilling directional wells. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(3):285-293. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-285-293>.

Введение

Удаление продуктов разрушения при бурении наклонно направленных скважин с горизонтальным окончанием производится потоком бурового раствора и отличается своими особенностями по сравнению с бурением вертикальных скважин. Если при промывке вертикальных скважин частицы шлама распределены достаточно равномерно в поперечном сечении потока и направление силы тяжести их прямо противоположно потоку жидкости, то механизм удаления шлама в наклонных или горизонтальных скважинах иной. Направление действия силы тяжести перпендикулярно потоку жидкости, и протяженность этого действия несравнима с протяженностью в вертикальной скважине (если ориентироваться на площади горизонтального сечения скважин). Отсюда неравномерность содержания шлама в сильно наклонном или горизонтальном потоке по сравнению с вертикальным.

В связи с вышеизложенным цель данного исследования заключалась в том, чтобы представить основные корреляции, разработанные многочисленными исследователями на основе физических законов, экспериментальных подходов, математического моделирования с численными решениями его результатов, которые определяют характер и степень очистки скважины при бурении наклонно направленных скважин с горизонтальным окончанием, и показать существующие параметры, используемые для оптимизации процесса очистки скважины.

Ключевой функцией любого бурового раствора является очистка ствола скважины за счет непрерывной транспортировки шлама из-под долота на поверхность. Определяю-

щими факторами транспортировки шлама, в свою очередь, являются сам буровой раствор и скорость шлама, зависящая от скорости бурового раствора. Скорость раствора зависит от реологических параметров жидкости, ее плотности, производительности насоса и геометрии кольцевого пространства скважины [1]. Скорость потока раствора представляется определяющим фактором в очистке ствола скважины. Можно было бы создать такую скорость, при которой удалялся бы весь шлам, поступающий в скважину, однако в скважине существуют условия, при которых окно между поровым давлением и давлением гидроразрыва стенок ствола может быть узким, что приводит к трещинообразованию и поглощению бурового раствора, также стенки скважины могут подвергаться абразивному размыву. Подобные моменты усложняют мониторинг очистки скважины.

Факторы, влияющие на очистку ствола скважины, разделяют на три группы [2]. Первая группа объединяет параметры жидкости, такие как вязкость жидкости, плотность жидкости и скорость потока жидкости. Вторая группа состоит из параметров шлама, которые включают плотность частиц, размер и их форму, а также концентрацию шлама в затрубном пространстве. Третья группа представляет собой операторные факторы и состоит из характеристик бурильной колонны с устройствами завихрения потока жидкости и эксцентричного ее расположения в стволе, а также наклона самого ствола скважины.

На степень очистки наклонно направленных скважин влияют те же факторы, что и в случае вертикальных скважин, но из-за наличия угла наклона ствола скважины на нижней



ее стенке формируются слои шлама, выпавшего в осадок. При промывке в наклонных скважинах основное внимание уделяется удалению из слоев осевшего шлама его частиц и их переводу в суспензию. В зависимости от поведения шлама при циркуляции жидкости в наклонно направленной скважине ее профиль подразделяется на три участка [3]: с углом наклона до 30° (вертикальный), с углом наклона от 30 до 65° (переходный), а также с углом наклона от 65 до 90° (горизонтальный). При бурении вертикального участка проблем с очисткой не возникает. В переходном участке шлам оседает на нижнюю стенку и, накапливаясь, может сдвигаться вниз по стволу в объеме, меньшем, чем объем осевшего шлама в целом. При проходке горизонтального участка слои шлама становятся плотными, в связи с чем их труднее всего разрушить, используя кинетику потока жидкости.

Общий объем шлама в транспортирующей его жидкости не должен превышать 5 % [4], в противном случае могут возникнуть проблемы со стволами. Некоторые исследователи уменьшают этот предел до 4 %.

Материалы и методы исследования

Транспортирование шлама. Скорость жидкости является критическим параметром, контролирующим способность системы транспортировать частицы разрушенной породы.

Транспортирование шлама на разных участках проходит по-разному из-за различий в природе слоев шлама. Различают два механизма транспортирования шлама: перемещение в движущемся слое и движение в суспензии. На вертикальном участке, как отмечалось выше, шлам в растворе распределен равномерно и его концентрация в жидкости постоянна. С ростом угла наклона крупный шлам оседает на стенку, двигаясь вверх по стволу суспензионно с изменяющейся концентрацией. При достижении углов в 55–65° сформировавшийся слой может скатываться вниз по стенке обсадной колонны. При углах свыше 65° шлам удаляется в виде суспензии с изменяющейся концентрацией, но уже над сформировавшимся слоем шлама на нижней стенке скважины. С дальнейшим увеличением

угла шламовой слой становится устойчивым. Таким образом, удаление шлама в виде суспензии является наиболее эффективным механизмом. Тем не менее для превращения этого слоя в суспензию требуется высокая скорость бурового раствора, которая ограничивается эквивалентной циркуляционной плотностью, восприимчивостью к эрозии открытого участка скважины и недостаточностью гидравлической мощности буровой установки.

При такой обстановке требуется индикация эффективности очистки ствола в реальном времени с целью контроля условий ствола и постоянного его мониторинга, особенно в критических скважинах.

В удалении продуктов разрушения отмечают ключевые факторы, такие как скорость оседания шлама, образование пласта шлама на нижней стенке наклонно направленной скважины и его эрозия [5].

Основные показатели, определяющие эффективность транспорта шлама. Шлам, образующийся в скважине, испытывает нисходящее движение под действием силы тяжести, что приводит к отрицательной скорости относительно скорости жидкости. Скорость обтекания частиц в потоке бурового раствора характеризуется разностью скоростей несущей (непрерывной) и транспортируемой (дискретной) фаз. При расчетах используют среднюю величину этой разницы, называемой скоростью скольжения V_{sl} , которая является ключевым фактором в определении транспорта шлама. Движение шлама вверх по затрубному пространству определяется скоростью, называемой скоростью перемещения шлама, V_t – это разница между скоростью жидкости в кольцевом пространстве V_a и скоростью скольжения шлама V_{sl} [6]:

$$V_t = V_a - V_{sl}. \quad (1)$$

Скорость скольжения может быть определена в зависимости от типа жидкости и режима течения. Что касается ламинарных течений, здесь существуют разные отношения для ньютоновских и неньютоновских жидкостей в зависимости от их реологических свойств. В турбулентном потоке реологические свойства не влияют на скорость скольжения [7]. В горизонтальном потоке скорость



скольжения инициирует силы, действующие на частицу в направлении, перпендикулярном гидродинамической оси потока. Гидродинамическая подъемная сила действует в направлении, перпендикулярном средней скорости потока, и имеет тенденцию поднимать твердые частицы со стационарного слоя. Эти силы возникают в результате давления и напряжения сдвига, что может быть получено путем интегрирования давления и напряжения сдвига по поверхности частицы.

На основе скорости скольжения формируется такой показатель, как транспортное отношение F_T [8]:

$$F_T = \frac{\bar{v}_T}{\bar{v}_a}. \quad (2)$$

Подставив в данную формулу \bar{v}_T из формулы (1), получим

$$F_T = 1 - \frac{\bar{v}_{sl}}{\bar{v}_a}. \quad (3)$$

Транспортное отношение – это мера того, как шлам оседает или рециркулирует в затрубном пространстве относительно единицы бурового раствора, движущегося вверх по стволу скважины.

Количество шлама в кольцевом пространстве может четко отражать эффективность транспортировки шлама. В исследованиях, осуществляемых с помощью поверхностных гидравлических схем (петель), это количество отображают с помощью таких показателей, как высота шламовой постели h , концентрация шлама C_f , площадь контура поперечного

сечения шламовой постели A_{mb} (рисунок) и соотношение масс взвешенных частиц и начальной массы отложенного шлама RMC [2].

Результирующая концентрация бурового шлама в затрубном пространстве определяется как

$$C_c = \frac{Q_c}{Q_c + Q_m}, \quad (4)$$

где Q_m – объемный расход бурового раствора; Q_c – объемный расход шлама, который зависит от размера долота и скорости бурения [9].

$$Q_c = \frac{\pi(1-\varphi)d^2}{4} ROP. \quad (5)$$

Здесь φ – пористость породы; d – диаметр долота или скважины; ROP – механическая скорость бурения.

Предполагается, что взвешенный шлам равномерно распределяется по площади, открытой для потока. Очевидно, это предположение имеет большое значение, и фактическое распределение, вероятно, является функцией геометрии ствола скважины, свойств бурового раствора, свойств выбуренной породы и операционных условий.

Средняя скорость переноса шлама определена в источнике [10] выражением

$$\bar{v}_c = \frac{Q_c}{A_{an}C_f}, \quad (6)$$

где A_{an} – площадь поперечного сечения кольцевого пространства скважины.

Средняя скорость бурового раствора в затрубном пространстве определяется как функция расхода бурового раствора:

$$\bar{v}_{an} = \frac{Q_m}{A_{an}(1-C_f)}. \quad (7)$$

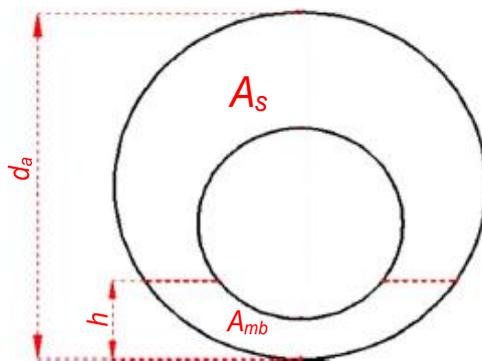


Схема поперечного сечения горизонтальной части скважины:

A_{mb} – площадь сечения пласта шлама, образующегося в процессе углубления ствола скважины;
 A_s – площадь сечения потока бурового раствора, несущего шлам; h – высота шламового слоя (шламовая постель); d_a – диаметр скважины или внутренний диаметр обсадных труб

Diagram of the cross section of the horizontal part of the well:

A_{mb} – cross-sectional area of the cuttings formation resulting from the borehole sinking;
 A_s – cross-sectional area of the drilling fluid flow carrying cuttings; h – height of the cutting bed;
 d_a – borehole diameter or casing inner diameter



При использовании пластических бингамовских жидкостей в скважинах с большим наклоном в источнике [11] C_f определена следующим образом:

$$C_f = 0,01778ROP + 0,505. \quad (8)$$

Выражая C_f в процентах и подставляя в формулу (6), получим

$$\bar{v}_{an} = \frac{100Q_m}{A_{an}(100-C_f)}.$$

Подставив \bar{v}_{an} и C_f , получим

$$\bar{v}_{an} = \frac{127,324Q_m}{(D_{hol}^2 - D_{pipe}^2)(99,5 - 0,01778ROP)},$$

где D_{hol} – диаметр скважины; D_{pipe} – диаметр бурильной колонны.

В источнике [12] величина \bar{v}_{an} выражена в футах через кольцевой зазор ($A_{cl} = D_{hol} - D_{pipe}$):

$$\bar{v}_{an} = \frac{40,8528Q_m}{(99,5 - 0,01778ROP)(2D_{pipe} + A_{cl})A_{cl}}. \quad (9)$$

Данное выражение позволяет регулировать давление в затрубном пространстве путем изменения механической скорости бурения и клиренса эксцентричного пространства скважины.

В зависимости от режима течения и модели вязкости имеют место и другие корреляции скорости движения жидкости в затрубном пространстве [13–15].

Кроме скорости бурового раствора в затрубном пространстве, которую считают одним из оптимизационных параметров очистки скважины, существуют и другие параметры, к примеру плотность бурового раствора и его вязкость. Эти параметры можно регулировать непосредственно на буровой установке. Результаты регулирования оценивают по эмпирической зависимости, называемой индексом выноса шлама CCI [13, 16]:

$$CCI = \frac{K \cdot AV \cdot MW}{400000}, \quad (10)$$

где K – вязкость при низкой скорости сдвига; AV – скорость в кольцевом пространстве скважины; MW – плотность бурового раствора. Величина 400000 является просто нормализующей константой и не является коэффициентом пересчета¹. Назначение этой константы заключается в получении значения CCI , соизмеримого с единицей. Значение $CCI \geq 1$ соот-

ветствует отсутствию проблем с очисткой, значение же < 1 указывает на более высокий риск очистки скважины.

Скорость в кольцевом пространстве определяется по формуле

$$AV = \frac{24,5Q}{D_h^2 - D_p^2}. \quad (11)$$

Применение CCI дает представление о чистоте рассматриваемой секции скважины, но не о производительности бурения. Использование C_f устанавливает предел максимальной скорости бурения, не вызывая проблем со стволом скважины или скоплением шлама.

При установлении параметров очистки скважины необходимо отслеживать давление в скважине, которое определяется, с одной стороны, гидростатическим давлением P , а с другой – эквивалентной циркуляционной плотностью ECD .

$$P = MV \cdot TVD \cdot 0,052,$$

где TVD – глубина скважины.

ECD же, согласно источнику [17], находится следующим образом:

$$ECD = ESD(1 - C_f) + (\rho_p C_f + \frac{\Delta p}{g \cdot 10^{-3} H})^a, \quad (12)$$

где ESD – эквивалентная статическая плотность; ρ_p – плотность частиц шлама; Δp – потери давления в кольцевом пространстве; H – глубина скважины по вертикали; g – гравитационное ускорение, равное $9,8 \text{ м/с}^2$; a – постоянная с учетом единиц измерения, равная $8,345$.

Мониторинг ECD будет определять условия устойчивости ствола, а также крутящий момент, сопротивление и объем шлама. Полученные показатели по результатам скважинного мониторинга, в свою очередь, будут определять, насколько чиста скважина. Основными компонентами, влияющими на ECD , являются шлам в кольцевом пространстве, выраженный как ESD , и параметры, связанные с буровым раствором.

В процессе бурения используют инструменты, содержащие датчики давления, которые могут измерять забойное давление скважины независимо от факторов, контролируемых ECD [18], кажущаяся вязкость бурового раствора уменьшается с увеличением враще-

¹ Rheology and hydraulics of oil-well drilling: API recommended practice 13D [Электронный ресурс]. URL: <https://studylib.net/doc/8889356/rheology-and-hydraulics-of-oil-well-drilling-fluids> (14.02.2022).



ния трубы, следовательно, общие потери на трение также уменьшаются. Инструменты могут дать точные показания для *ESD* и *ECD* по общему давлению, действующему на забой скважины во время циркуляции. Сравнение *ESD* с измеренным забойным давлением дает четкое представление о причинах изменений в *ECD* [19].

Реологический фактор выноса шлама. Рассмотренные показатели очистки скважины в процессе непосредственного углубления забоя скважины дают общее представление об этапах процесса очистки скважины. Не все модели и корреляции многочисленных исследователей, изучающих механизмы удаления продуктов разрушения, здесь показаны. Сложность воздействия потока бурового раствора на частицы шлама определяется различием типа жидкостей, применяемых в качестве бурового раствора, их режимов течения, различием размеров, формы и веса самих частиц, рассматриваемых моделей состояния системы «жидкость – твердое».

Для увеличения производительности выноса выбуренной породы из кольцевого пространства скважины используют вращение буровой колонны, которую оснащают иногда специальными элементами, повышающими механическое воздействие колонны на осевший пласт шлама в части скважины с большим углом наклона. Эффективность выноса шлама повышают посредством введения в буровой раствор «плавающих» частиц в виде бусинок из пластика, то есть частиц, имеющих плотность, меньшую или равную плотности раствора, а также введения волокнистого материала.

Результаты исследования

Несмотря на вышеизложенное, для контроля *ECD* в любом случае требуется определение сопротивления движению суспензии в кольцевом пространстве скважины, которое зависит от режима течения раствора. Для каждого режима определяется гидравлический коэффициент сопротивления s , который для ламинарного потока равен $24/Re$, для переходного режима – $24/Re^{0,75}$, для турбулент-

ного режима составляет 1,12. В ходе вычисления гидравлического коэффициента сопротивления требуется определение числа Рейнольдса Re , которое, как известно, имеет следующее выражение:

$$Re = \frac{V_s d \rho_f}{\eta} \quad (13)$$

Здесь V_s – скорость обтекания частицы; d – диаметр частицы; η – динамическая вязкость жидкости; ρ_f – плотность жидкости.

Скорость обтекания частиц в потоке бурового раствора характеризуется разностью скоростей несущей (непрерывной) и транспортируемой (дискретной) фаз. При расчетах используют среднюю величину скорости скольжения, которую выбирают также исходя из режима течения для ламинарного режима по формуле Стокса:

$$V_s = \frac{2}{9} \frac{r^2 g (\rho_p - \rho_f)}{\eta} \quad (14)$$

где r – радиус частицы; g – ускорение свободного падения.

Для переходного и турбулентного режимов используют формулу Риттингера:

$$V_s = k \left[g d \left(\frac{\rho_f}{\rho_p} \right) \right]^{1/2}, \quad k = 2(3c)^{-1/2} \quad (15)$$

Эти две формулы подставляются в формулу (13) числа Re , причем вязкость при ламинарном режиме должна уточняться с учетом формулы Эйнштейна

$$\eta = \eta_{бр} (1 + 2,5 \cdot \varphi) \quad (16)$$

где $\eta_{бр}$ – вязкость приготавливаемого бурового раствора; φ – объемная концентрация твердой фазы (шлама) в буровом растворе.

Для расчета режима обтекания используется полуэмпирическая зависимость с критериями Ar и Re^2 :

$$Re = \frac{u_B d_{ч}}{\nu} = \frac{Ar}{18 + 0,6 Ar^{0,5}} \quad (17)$$

в которой число Архимеда

$$Ar = \frac{d^3 g (\rho_p - \rho_f)}{\nu_f^2 \rho_f}$$

Здесь ν_f – скорость сплошной фазы; u_B – скорость обтекания; ν – кинематическая вязкость.

$$u_B = 1,71 \left[\frac{d_{ч} g \rho_{ч}}{\rho} \right]^{1/2}$$

Коэффициент сопротивления среды зависит не только от критерия Рейнольдса, но и от

² Лаптев А. Г., Фарахов М. И. Гидромеханические процессы в нефтехимии и энергетике: пособие к расчету аппаратов. Казань: Изд-во КГУ, 2008. 729 с.



Параметры аппроксимации критерия Лященко [20]
Approximation parameters of the Lyashchenko criterion [20]

Диапазон изменения $Re^2\phi$	Диапазон изменения Re	A	m
$8 \cdot 10^{-3} \dots 3$	$< 10^{-3}$	0,133	1
$3 \dots 1,2 \cdot 10^2$	$10^{-3} \dots 10$	0,1	0,943
$1,2 \cdot 10^2 \dots 3,5 \cdot 10^3$	$10 \dots 10^2$	0,269	0,69
$3,5 \cdot 10^3 \dots 10^5$	$10^2 \dots 8 \cdot 10^2$	1,112	0,575
$10^5 \dots 3 \cdot 10^9$	$8 \cdot 10^2 \dots 1,2 \cdot 10^5$	7,95	0,493

фактора формы Φ , то есть
 $C = f(Re, \Phi)$.

Для определения режима обтекания по формуле (13) существует необходимость применения итерационного подхода, так как неизвестен режим обтекания частицы и невозможно выбрать коэффициент сопротивления среды. Для исключения такой процедуры предлагается использовать критерий Лященко, который не зависит от искомой скорости движения частицы:

$$Re^2\phi = f(Re).$$

Этот критерий не включает в явном виде коэффициент сопротивления ϕ , который определяется искомой скоростью. Существует графическая зависимость критерия Рейнольдса от параметра Лященко³. Тем не менее в расчетах на компьютере удобнее пользоваться не диаграммой, а аппроксимацией диаграммы в виде формул:

$$Re = (ARe^2\phi)^m$$

при значениях A и m , указанных в таблице. Отсюда формула для расчета скорости скольжения v_{sl} принимает вид

$$v_{sl} = \frac{(ARe^2\phi)^m \mu}{d\rho},$$

где A и m – коэффициенты для аппроксимации диаграммы Лященко.

Заключение

Описанные выше показатели очистки скважины позволяют оценить состояние удаляемого из скважины шлама с учетом пространственного положения скважины, характерных свойств самого шлама, свойств и реологического поведения промывочной жидкости. Эти и подобные им показатели учитываются при составлении гидравлической программы промывки скважины, позволяют оптимизировать процесс удаления шлама. Применение безразмерных критериев в расчетах динамики дисперсной фазы в буровых растворах упрощает эти расчеты. Среди показателей мало таких, которые бы достаточно полно представляли теоретические вопросы процессов транспорта шлама. В связи с этим следует отметить такой показатель, как скорость скольжения, который определяет гидродинамику процесса транспорта шлама. Нами предлагается использовать безразмерный критерий Лященко для упрощения расчетов, связанных с определением скорости скольжения.

Список источников

1. Belavadi M. N., Chukwu G. A. Experimental study of the parameters affecting cutting transportation in a vertical wellbore annulus // SPE Western Regional Meeting. Long Beach, 1994. P. SPE-27880-MS.
2. Wang K., Yan T., Sun X., Shao S., Luan S. Review and analysis of cuttings transport in complex structural wells // The Open Fuels & Energy Science Journal. 2013. Vol. 6. P. 9–17. <https://doi.org/10.2174/1876973X20130610001>.
3. Cho H., Shah S. N., Osisanya S. O. A three-segment hydraulic model for cuttings transport in coiled tubing horizontal and deviated drilling // Journal of Canadian Petroleum Technology. 2002. Vol. 41. Iss. 6. P. PETSOC-02-06-03. <https://doi.org/10.2118/02-06-03>.
4. Pigot R. J. S. Mud flow in drilling // Drilling and Production Practice. 1941. P. 91–103.
5. Pedrosa C., Saasen A., Ytrehus J. D. Fundamentals and physical principles for drilled cuttings transport-cuttings bed sedimentation and erosion // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 3. P. 545. <https://doi.org/10.3390/en14030545>.
6. Rehm B., Haghshenas A., Paknejad A. S., Al-Yami A., Hughes J. Underbalanced drilling: limits and extremes. Houston: Gulf Publishing Company, 2013. 629 p.
7. Caenn R., Darley H. C. H., Gray G. R. Composition

³ Лаптев А. Г., Фарахов М. И. Гидромеханические процессы в нефтехимии и энергетике: пособие к расчету аппаратов. Казань: Изд-во КГУ, 2008. 729 с.



and properties of drilling and completion fluids. Houston: Gulf Professional Publishing, 2011. 720 p.

8. Adari R. B., Miska S., Kuru E., Bern P., Saasen A. Selecting drilling fluid properties and flow rates for effective hole cleaning in high-angle and horizontal wells // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Texas, 2000. P. SPE-63050-MS.

9. Bourgoyne Jr. A. T., Millheim K. K., Chevenert M. E., Young Jr. F. S. Applied drilling engineering. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 1991. 502 p.

10. Alawami M., Bassam M., Gharbi S., Al Rubaii M. A real-time indicator for the evaluation of hole cleaning efficiency // SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition. Bali, 2019. P. SPE-196448-MS. <https://doi.org/10.2118/196448-MS>.

11. 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. Iss. 2. P. 129–135. <https://doi.org/10.2118/25872-PA>.

12. Ofesi S. F., Onwukwe S. I., Duru U. I. Optimizing hole cleaning using low viscosity drilling fluid // Advances in Petroleum Exploration and Development. 2017. Vol. 14. Iss. 1. P. 55–61. <https://doi.org/10.3968/9658>.

13. Hopkins C. J., Leicksenring R. A. Reducing the risk of stuck pipe in the Netherlands // SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam, 1995. P. SPE-29422-MS. <https://doi.org/10.2118/29422-MS>.

14. Abimbola M. O., Chukwu G. A., Khan F. I. Cuttings transport evaluation in deviated wells // The International

Conference on Marine and Freshwater Environments. 2014. <https://doi.org/10.13140/2.1.2562.5601>.

15. Chien S.-F. Annular velocity for rotary drilling operations // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1972. Vol. 9. Iss. 3. P. 403–416. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(72\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0148-9062(72)90005-8).

16. Okon A. N., Agwu O. E., Udoh F. D. Evaluation of the cuttings carrying capacity of a formulated synthetic-based drilling mud // SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. Lagos, 2015. P. SPE-178263-MS. <https://doi.org/10.2118/178263-MS>.

17. Bybee K. Equivalent-circulating-density fluctuation in extended-reach drilling // Journal of Petroleum Technology. 2009. Vol. 61. Iss. 2. P. 64–67. <https://doi.org/10.2118/0209-0064-JPT>.

18. Dokhani V., Ma Y., Yu M. Determination of equivalent circulating density of drilling fluids in deepwater drilling // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2016. Vol. 34. P. 1096–1105. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.08.009>.

19. Lin T., Wei C., Zhang Q., Sun T. Calculation of equivalent circulating density and solids concentration in the annular space when reaming the hole in deepwater drilling // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2016. Vol. 52. P. 70–75. <https://doi.org/10.1007/s10553-016-0674-5>.

20. Кизевальтер Б. В. Теоретические основы гравитационных процессов обогащения. М.: Недра, 1979. 295 с.

References

1. Belavadi M. N., Chukwu G. A. Experimental study of the parameters affecting cutting transportation in a vertical wellbore annulus. *SPE Western Regional Meeting*. Long Beach; 1994, p. SPE-27880-MS.

2. Wang K., Yan T., Sun X., Shao S., Luan S. Review and analysis of cuttings transport in complex structural wells. *The Open Fuels & Energy Science Journal*. 2013;6: 9-17. <https://doi.org/10.2174/1876973X20130610001>.

3. Cho H., Shah S. N., Osisanya S. O. A three-segment hydraulic model for cuttings transport in coiled tubing horizontal and deviated drilling. *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 2002;41(6):PETSOC-02-06-03. <https://doi.org/10.2118/02-06-03>.

4. Pigot R. J. S. Mud flow in drilling. *Drilling and Production Practice*. 1941:91-103.

5. Pedrosa C., Saasen A., Ytrehus J. D. Fundamentals and physical principles for drilled cuttings transport-cuttings bed sedimentation and erosion. *Energies*. 2021;14(3):545. <https://doi.org/10.3390/en14030545>.

6. Rehm B., Haghshenas A., Paknejad A. S., Al-Yami A., Hughes J. *Underbalanced drilling: limits and extremes*. Houston: Gulf Publishing Company; 2013. 629 p.

7. Caenn R., Darley H. C. H., Gray G. R. *Composition and properties of drilling and completion fluids*. Houston: Gulf Professional Publishing; 2011. 720 p.

8. Adari R. B., Miska S., Kuru E., Bern P., Saasen A. Selecting drilling fluid properties and flow rates for effective

hole cleaning in high-angle and horizontal wells. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Texas; 2000, p. SPE-63050-MS.

9. Bourgoyne Jr. A. T., Millheim K. K., Chevenert M. E., Young Jr. F. S. *Applied drilling engineering*. Richardson: Society of Petroleum Engineers; 1991. 502 p.

10. Alawami M., Bassam M., Gharbi S., Al Rubaii M. A real-time indicator for the evaluation of hole cleaning efficiency. *SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition*. Bali; 2019, p. SPE-196448-MS. <https://doi.org/10.2118/196448-MS>.

11. 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;12(2):129-135. <https://doi.org/10.2118/25872-PA>.

12. Ofesi S. F., Onwukwe S. I., Duru U. I. Optimizing hole cleaning using low viscosity drilling fluid. *Advances in Petroleum Exploration and Development*. 2017;14(1):55-61. <https://doi.org/10.3968/9658>.

13. Hopkins C. J., Leicksenring R. A. Reducing the risk of stuck pipe in the Netherlands. *SPE/IADC Drilling Conference*. Amsterdam; 1995, p. SPE-29422-MS. <https://doi.org/10.2118/29422-MS>.

14. Abimbola M. O., Chukwu G. A., Khan F. I. Cuttings transport evaluation in deviated wells. *The International Conference on Marine and Freshwater Environments*. 2014. <https://doi.org/10.13140/2.1.2562.5601>.



15. Chien S.-F. Annular velocity for rotary drilling operations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1972;9(3):403-416. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(72\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0148-9062(72)90005-8).

16. Okon A. N., Agwu O. E., Udoh F. D. Evaluation of the cuttings carrying capacity of a formulated synthetic-based drilling mud. *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. Lagos; 2015, p. SPE-178263-MS. <https://doi.org/10.2118/178263-MS>.

17. Bybee K. Equivalent-circulating-density fluctuation in extended-reach drilling. *Journal of Petroleum Technology*. 2009;61(2): 64-67. <https://doi.org/10.2118/0209-0064-JPT>.

18. Dokhani V., Ma Y., Yu M. Determination of equivalent circulating density of drilling fluids in deepwater drilling. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016;34: 1096-1105. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.08.009>.

19. Lin T., Wei C., Zhang Q., Sun T. Calculation of equivalent circulating density and solids concentration in the annular space when reaming the hole in deepwater drilling. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2016;52:70-75. <https://doi.org/10.1007/s10553-016-0674-5>.

20. Kizeval'ter B. V. *Theoretical foundations of gravity concentration processes*. Moscow: Nedra; 1979. 295 p. (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the author



Ламбин Анатолий Иванович,

кандидат технических наук,
доцент кафедры нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
alambin@ex.istu.edu.

Anatoly I. Lambin,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Oil and Gas Department,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
alambin@ex.istu.edu.

Вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 17.02.2022; одобрена после рецензирования 26.07.2022; принята к публикации 30.08.2022.

The article was submitted 17.02.2022; approved after reviewing 26.07.2022; accepted for publication 30.08.2022.