



ОБ ОЦЕНКЕ ВЫНОСНОЙ СПОСОБНОСТИ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ

М. А. Мыслюк

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, Украина

On the assessment of the carrying capacity of drilling fluids

M. A. Myslyuk

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

А Б С Т Р А К Т

Methods for evaluating the carrying capacity of drilling fluids for effective hole cleaning are considered. An indicator of the carrying capacity of drilling fluids is proposed, considering the completeness of the flow profile in the annulus. For the rheological models of Newton, Ostwald, Bingham, Herschel – Bulkley and Shulman – Casson, the influence of flow rate and rheological properties on the carrying capacity index in laminar flow in a concentric annular gap is studied. Based on the analysis of field data, the effect of temperature on the carrying capacity of drilling fluids is shown.

Keywords: carrying capacity; drilling fluid; laminar flow; rheological model.

© 2023 «OilGasScientificResearchProject» Institute. All rights reserved.

1. Введение

К числу важнейших функциональных требований к буровым растворам относятся вынос выбуренной породы из забоя на дневную поверхность и очистка ствола скважины, эффективность которых во многом определяют технико-экономические показатели бурения и качество ствола скважины [1-11]. Отметим, что выносная способность потока бурового раствора характеризует качество некоторых технологических операций, оценка которых должна строиться с учетом соответствующих условий бурения скважины.

Известно [1, 2, 4, 5, 8, 10, 11], что транспортирование выбуренных частичек осуществляется вследствие действия подъемных сил потока бурового раствора и сил сопротивления твердых частиц в процессе их осаждения. На это влияют разные эффекты, которые обусловлены профилем распределения скоростей течения, геометрическими параметрами траектории скважины и поперечного сечения кольцевого пространства, формой и размерами частичек, вращением буровой колонны и многими другими факторами.

Изложенное усложняет процедуру точных расчетов транспортирующей способности потока бурового раствора в соответствующих условиях бурения. Обычно выносная способность потока оценивается на основании упрощенных показателей, определяющих скорость выноса v_v частиц либо концентрацию c шлама в наиболее опасном сечении ствола скважины [1-5].

Считается [1, 2, 4, 6, 8], что вынос выбуренных части-

чек осуществляется в случае, если скорость восходящего потока v_k в кольцевом пространстве скважины будет превосходить скорость погружения частицы v_{Π} . Разность этих скоростей определяет абсолютную скорость подъема или скорость выноса частицы

$$v_v = v_k - v_{\Pi} \quad (1)$$

В [5] эффективность очистки ствола вертикальной скважины оценивается коэффициентом переноса v_v/v_k , определяемого из соотношения (1)

$$v_v/v_k = 1 - v_{\Pi}/v_k \quad (2)$$

Экспериментальными исследованиями показано, что с увеличением v_k коэффициент переноса возрастает для мелких и крупных частичек шлама. Для фиксированной скорости потока коэффициент переноса сильно зависит от вязкостных свойств бурового раствора. Вращение буровой колонны способствует повышению коэффициента переноса, однако в количественном плане этот эффект слабый.

Для предупреждения осложнений из-за скопления шлама в кольцевом пространстве используют показатель объемной концентрации шлама [3, 9], который для установившегося течения оценивается с помощью выражения

$$c = \frac{f_3 V_m}{f_k V_k} (1 - v_{\Pi}/v_k)^{-1} \quad (3)$$

где f_3, f_k – соответственно разбуриваемая площадь забоя скважины и площадь кольцевого пространства; v_m – механическая скорость проходки. В [2, 3] указано на условия предупреждения осложнений из-за скопления шлама в кольцевом пространстве $c \leq 0.05$, а при использовании

воды или легких буровых растворов $c \leq 0.02$.

В [1] отмечается, что для очистки ствола скважины лучше всего подходит буровой раствор с высоким отношением динамического напряжения сдвига τ_0 к пластической вязкости η (для реологической модели Бингама) или с низким значением показателя нелинейности n (для реологических моделей Оствальда и Гершеля – Балкли). Такая жидкость при сдвиге становится более текучей, ее эффективная вязкость будет возрастать в интервалах повышенного диаметра с низкими скоростями потока и снижаться в интервалах номинального диаметра с более высокими скоростями потока.

Эффективность очистки ствола скважины, как следует из (2) и (3), существенно зависит от скорости v_{Π} погружения частичек шлама в буровом растворе. Скорость v_{Π} оценивают обычно с помощью известной формулы Риттингера [1, 2, 4-7, 8, 10, 11]

$$v_{\Pi} = \sqrt{\frac{4gd_{\Pi}(\rho_{\Pi} - \rho)}{3c_w\rho}} \quad (4)$$

где ρ_{Π} , ρ – соответственно плотность частичек шлама и бурового раствора; d_{Π} – диаметр частичек шлама; c_w – коэффициент сопротивления обтеканию; g – ускорение сил тяжести.

В общем случае коэффициент сопротивления c_w зависит от режима обтекания частичек и определяется с помощью различных теоретических и эмпирических формул для соответствующих реологических моделей бурового раствора [1, 2, 4-8, 10, 11]. В [11] на основе экспериментальных и аналитических исследований осаждения сферических частиц в неньютоновских жидкостях (Бингама, Гершеля – Балкли, Кессона) предложена универсальная кривая $c_w(Re)$ с минимальной стандартной ошибкой отклонения расчетных и экспериментальных данных (Re – число Рейнольдса).

Скорость сдвига частицы шарообразной формы на горизонтальной плоскости (аналог скорости v_{Π} для вертикальной скважины) оценивают по формуле [6]

$$v_{\Pi} = \sqrt{\frac{2f_0gd_{\Pi}(\rho_{\Pi} - \rho)}{3\rho(1 - \cos\varphi)}} \quad (5)$$

где f_0 – коэффициент трения $0 \leq f_0 \leq 1$; φ – угол, с которым струя жидкости сходит с шарообразной частицы. Формула (5) получена с учетом подъемной силы потока, а также силы трения при сдвиге частицы. В (5) величины f_0 и φ определяют по данным экспериментальных исследований.

Для наклонно направленных скважин скорость жидкости, обеспечивающая сдвиг частичек шлама на нижней стенке скважины, оценивается по формуле [4]

$$v_{\Pi} = \sqrt{\frac{4gd_{\Pi}(\rho_{\Pi} - \rho)(f_0 \sin\alpha + \cos\alpha)}{3c_w\rho}} \quad (6)$$

где α – зенитный угол искривления ствола скважины. Формула (6) обобщает в качественном плане соответственно формулы оценки скоростей v_{Π} для вертикальной (4) и горизонтальной (5) скважин.

В [9] для оценки выносной способности потока на произвольной глубине l скважины предложено использовать показатель

$$k_s(l) = S_0(l)/S_k(l), \quad l \in [0, L] \quad (7)$$

где $S_0(l)$ – площадь поперечного сечения потока в коль-

цевом пространстве скважины, для которой выполняется условие $v(l) \geq v_{\Pi}(d_{\Pi})$; $S_k(l)$ – площадь поперечного сечения кольцевого пространства скважины; L – глубина скважины. Показатель (7) учитывает условие выноса частичек шлама заданного фракционного состава d_{Π} и полную профилей потока бурового раствора в кольцевом пространстве.

2. Оценка полноты профиля скоростей течения жидкостей в кольцевом пространстве

Анализ исследований [1-11] показывает, что выносная способность буровых растворов определяется полнотой профиля скоростей их течения в произвольном сечении кольцевого пространства скважины. Основными факторами, влияющими на полноту профиля скоростей, являются реологические свойства a бурового раствора, его расход Q , геометрические параметры кольцевого пространства (диаметры скважины D и труб d , эксцентricность расположения труб в скважине), режим течения и др.

Для количественной оценки выносной способности бурового раствора в кольцевом пространстве может быть использован показатель k_v , определяемый с помощью соотношений

$$\begin{cases} k_v = \frac{1}{v_0\Omega} \iint_{\Omega} v(x, y) dx dy, & (x, y) \in \Omega \\ v_0 = \max v(x, y), & (x, y) \in \Omega \end{cases} \quad (8)$$

или

$$k_v = v_c/v_0$$

где $v(x, y)$, v_0 , v_c – соответственно скорость течения бурового раствора, максимальная и среднеобъемная скорости в области Ω потока кольцевого пространства. Отметим, что по аналогии с показателем (7) условие выноса частичек шлама дополняется минимально необходимой величиной расхода Q или средней скорости v_c потока.

Так, соотношения (8) применимы для оценки выносной способности буровых растворов с различными реологическими моделями при ламинарном и турбулентном течении в концентричном и эксцентричном кольцевом пространстве. Для ламинарного течения жидкостей с реологическими моделями $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}(\tau)$ ($\dot{\gamma}, \tau$ – градиент скорости и напряжение сдвига) в концентрическом кольцевом пространстве поле скоростей $v(x, y)$ может быть построено с помощью решений [12], а для эксцентрического кольцевого пространства – с использованием вариационных принципов [13-15]. Для турбулентного течения в (8) применяют осредненные по времени значения скоростей $v(x, y)$.

На рисунке 1 в качестве иллюстраций показаны профили скоростей ламинарного течения жидкостей различных реологических моделей в концентричном кольцевом пространстве и приведены значения их показателей k_v выносной способности. Профили $v(r)$ скоростей на рисунке 1 показаны с учетом симметрии потока в зависимости от радиуса r для одной стороны кольцевого пространства.

Расчеты выполнены для постоянных расхода $Q=20$ л/с, диаметров скважины $D=220$ мм и труб $d=127$ мм. Реологические свойства жидкостей: Ньютона $\eta=0.02$ Па·с ($k_v=0.664$); Оствальда $k=0.02$ Па·с^{*n*} и $n=0.6$ ($k_v=0.724$); Бингама $\tau_0=4.2$ Па и $\eta=0.03$ Па·с ($k_v=0.822$); Гершеля – Балкли $\tau_0=4.2$ Па, $k=0.03$ Па·с^{*n*} и $n=0.6$ ($k_v=0.939$); Шульмана – Кессона $\tau_0=4.2$ Па, $\eta=0.003$ Па·с и $n=2.6$ ($k_v=0.844$).

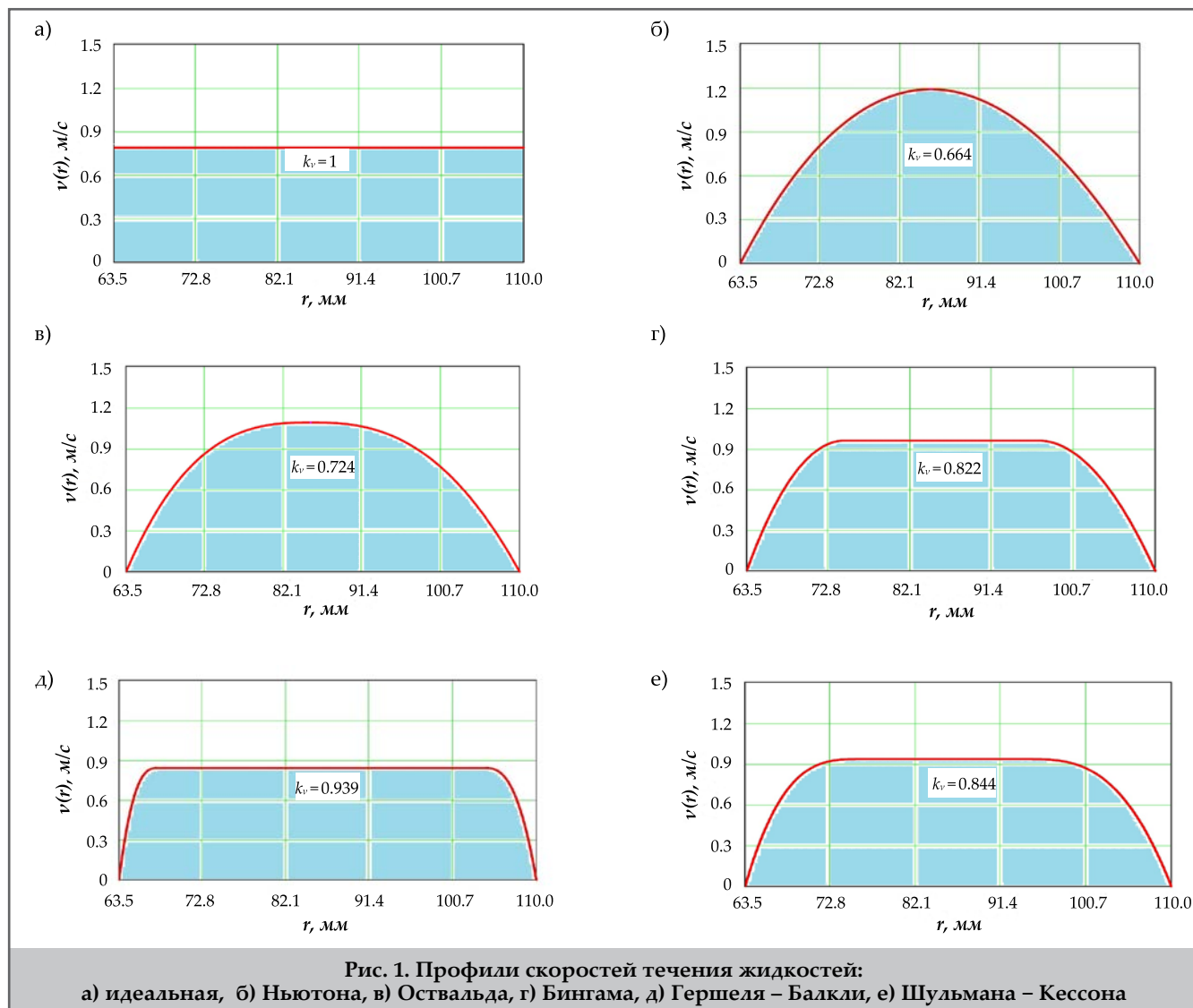


Рис. 1. Профили скоростей течения жидкостей:
 а) идеальная, б) Ньютона, в) Оствальда, г) Бингама, д) Гершеля – Балкли, е) Шульмана – Кессона

Из (8) следует, что показатель k_v характеризует для заданного сечения скважины относительную полноту профиля течения области Ω потока в объеме жидкости кольцевого пространства, ограниченного максимальной скоростью v_0 . Так, для идеальной жидкости $k_v = 1$ (рис. 1а), а для реальных жидкостей $k_v < 1$ (рис. 1б-е). Следовательно, показатель k_v может быть использован для оценки выносной способности буровых растворов, а также обоснования их реологических свойств с целью эффективной очистки ствола скважины.

3. Анализ выносной способности жидкостей в концентрическом кольцевом пространстве

В прикладном аспекте представляет интерес оценка влияния реологической модели и свойств на выносную способность буровых растворов, что является основой выбора их рецептов для проходки осложненных интервалов скважин. Ниже на примере моделей ламинарного течения жидкостей в концентрических кольцевых зазорах [12] показано влияние реологических свойств и расхода на выносную способность жидкостей. Геометрические параметры кольцевого пространства и расход жидкости изменяли в таких пределах: $D=220$ мм, $d=(127; 139.7; 165.1; 177.8)$ мм, $Q=(10, 15, 20, 25)$ л/с.

Для реологической модели Ньютона $\dot{\gamma} = \tau/\eta$ показате

ль выносной способности не зависит от вязкости η и расхода жидкости, а для различных сочетаний кольцевых зазоров составляет $k_v = 0.664 - 0.666$ (0.664 при $d = 127$ мм и 0.666 при $d = 177.8$ мм).

Для реологической модели Оствальда $\dot{\gamma} = (\tau/k)^{1/n}$ показатели консистенции и нелинейности изменяли соответственно в пределах $k=(0.05; 0.20; 0.35; 0.50)$ Па·сⁿ и $n=(0.40; 0.55; 0.70; 0.85)$. В таблице 1 приведены исходные данные и результаты численных экспериментов (для метода комбинационных квадратов): средняя v_c и максимальная v_0 скорости течения, диаметр d_1 сечения потока с максимальной скоростью, показатель выносной способности k_v .

Для условий изменения факторов показатель выносной способности составляет $k_v = 0.683 - 0.777$ и несколько выше, чем для жидкости Ньютона. Характерным является влияние переменных факторов на показатель k_v .

На рисунках 2 и 3 показаны некоторые результаты моделирования выносной способности жидкости Оствальда. Наиболее высокие значения k_v соответствуют низким значениям показателей нелинейности и консистенции. При прочих равных условиях имеет место нелинейная зависимость показателя k_v от расхода жидкости с характерным минимумом. Отметим, что размеры кольцевых зазоров оказывают количественное и качественное влияние на зависимости выносной способности жидкости.

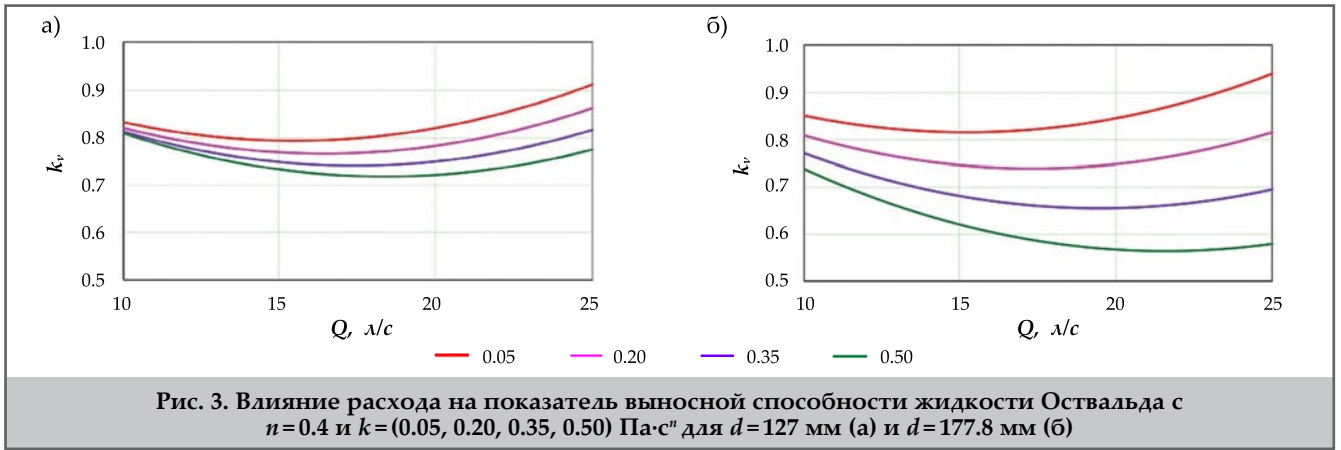
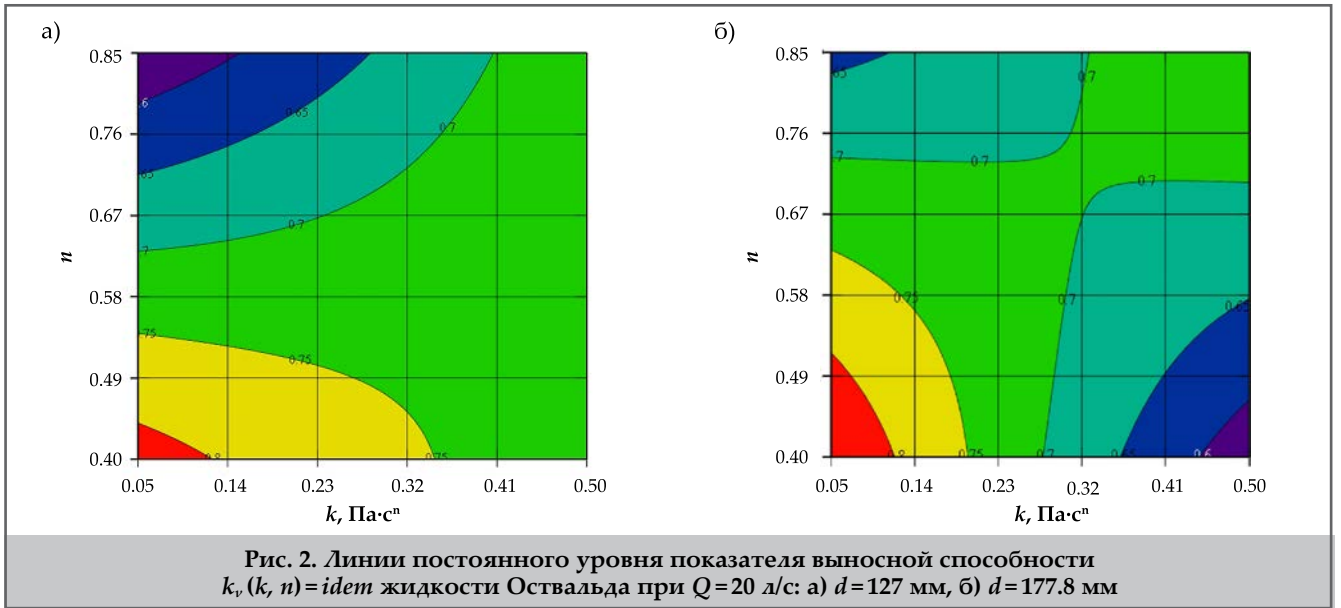


Таблица 1
Результаты оценок выносной способности жидкости Оствальда

Опыт	Факторы				Результаты			
	d_1 , мм	Q , м ³ /с	k , Па·с ⁿ	n	v_{cr} , м/с	v_{br} , м/с	d_{1r} , мм	k_v
1	127.0	0.010	0.05	0.85	0.395	0.578	171.1	0.683
2	139.7	0.010	0.20	0.55	0.441	0.599	177.7	0.736
3	165.1	0.010	0.35	0.70	0.602	0.851	191.7	0.708
4	177.8	0.010	0.50	0.40	0.758	1.028	198.4	0.738
5	127.0	0.015	0.20	0.55	0.592	0.805	170.5	0.735
6	139.7	0.015	0.05	0.40	0.661	0.899	177.7	0.736
7	165.1	0.015	0.50	0.85	0.903	1.320	191.8	0.684
8	177.8	0.015	0.35	0.70	1.138	1.607	198.4	0.708
9	127.0	0.020	0.35	0.55	0.789	1.074	170.5	0.735
10	139.7	0.020	0.50	0.85	0.882	1.290	178.2	0.683
11	165.1	0.020	0.05	0.40	1.204	1.551	191.5	0.777
12	177.8	0.020	0.20	0.70	1.517	2.143	198.4	0.708
13	127.0	0.025	0.50	0.40	0.986	1.274	169.9	0.774
14	139.7	0.025	0.35	0.70	1.102	1.560	177.9	0.706
15	165.1	0.025	0.20	0.55	1.506	2.042	191.6	0.737
16	177.8	0.025	0.05	0.85	1.896	2.769	198.5	0.685

Таблица 2
Результаты оценок выносной способности жидкости Бингама

Опыт	Факторы				Результаты				
	d_1 , мм	Q , м ³ /с	τ_0 , Па	η , Па·с	v_{cr} , м/с	v_{br} , м/с	d_{1r} , мм	d_{2r} , мм	k_v
1	127.0	0.010	13	0.005	0.395	0.410	131.4	214.3	0.963
2	139.7	0.010	9	0.015	0.441	0.481	148.6	209.3	0.917
3	165.1	0.010	5	0.025	0.602	0.683	174.2	209.8	0.882
4	177.8	0.010	1	0.035	0.758	1.079	196.2	200.8	0.703
5	127.0	0.015	5	0.015	0.592	0.668	141.0	202.7	0.885
6	139.7	0.015	1	0.005	0.661	0.782	156.6	200.2	0.845
7	165.1	0.015	13	0.035	0.903	1.073	177.4	206.4	0.842
8	177.8	0.015	9	0.025	1.138	1.623	196.3	200.7	0.701
9	127.0	0.020	9	0.025	0.789	0.902	142.3	201.2	0.875
10	139.7	0.020	5	0.035	0.882	1.091	161.0	195.5	0.810
11	165.1	0.020	1	0.005	1.204	1.530	181.8	201.8	0.787
12	177.8	0.020	13	0.015	1.517	1.859	189.0	208.0	0.816
13	127.0	0.025	1	0.035	0.986	1.369	163.3	179.0	0.720
14	139.7	0.025	13	0.025	1.102	1.267	153.8	203.3	0.870
15	165.1	0.025	9	0.015	1.506	1.792	177.5	206.3	0.840
16	177.8	0.025	5	0.005	1.896	2.253	187.4	209.6	0.842

Таблица 3

Результаты оценок выносной способности жидкости Гершеля – Балкли

Опыт	Факторы					Результаты				
	d , мм	Q , м ³ /с	τ_0 , Па	k , Па·с ^{n}	n	v_c , м/с	v_o , м/с	d_1 , мм	d_2 , мм	k_v
1	127.0	0.010	13	0.05	0.85	0.394	0.427	136.4	207.9	0.925
2	139.7	0.010	9	0.20	0.55	0.441	0.480	150.4	206.5	0.919
3	165.1	0.010	5	0.35	0.70	0.602	0.766	184.2	199.1	0.786
4	177.8	0.010	1	0.50	0.40	0.758	0.934	194.9	201.6	0.812
5	127.0	0.015	5	0.20	0.55	0.592	0.667	143.9	198.1	0.887
6	139.7	0.015	1	0.05	0.40	0.661	0.718	151.8	204.4	0.921
7	165.1	0.015	13	0.50	0.85	0.903	1.125	182.7	200.6	0.803
8	177.8	0.015	9	0.35	0.70	1.138	1.450	192.8	203.9	0.784
9	127.0	0.020	9	0.35	0.55	0.789	0.896	145.0	196.8	0.881
10	139.7	0.020	5	0.50	0.85	0.882	1.221	173.0	183.0	0.722
11	165.1	0.020	1	0.05	0.40	1.204	1.330	175.8	207.6	0.906
12	177.8	0.020	13	0.20	0.70	1.517	1.841	190.0	206.8	0.824
13	127.0	0.025	1	0.50	0.40	0.986	1.210	161.0	178.5	0.815
14	139.7	0.025	13	0.35	0.70	1.102	1.330	161.0	194.8	0.829
15	165.1	0.025	9	0.20	0.55	1.506	1.714	176.9	206.5	0.878
16	177.8	0.025	5	0.05	0.85	1.896	2.457	192.6	204.3	0.772

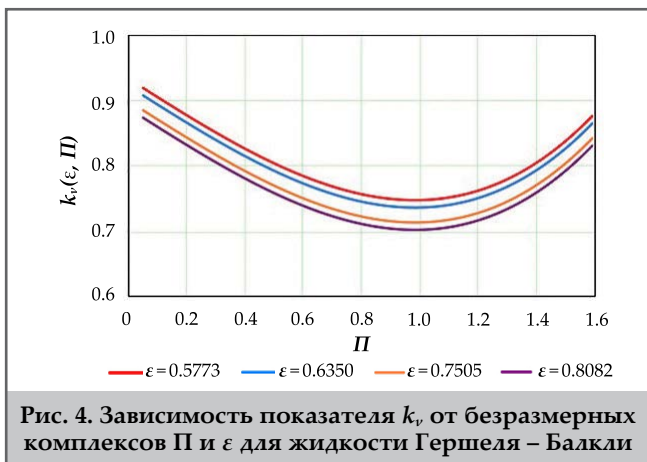


Рис. 4. Зависимость показателя k_v от безразмерных комплексов Π и ϵ для жидкости Гершеля – Балкли

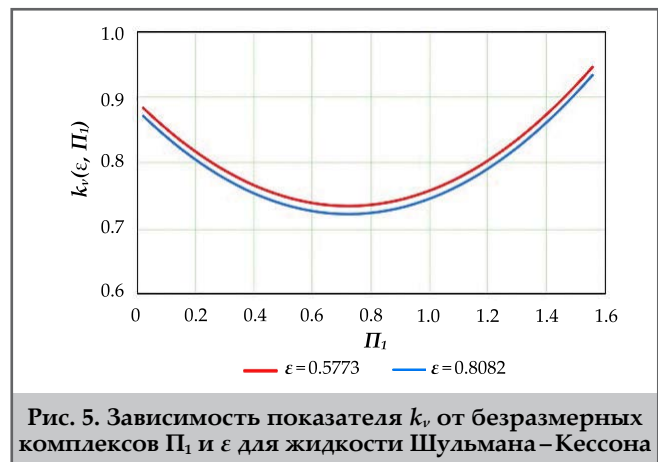


Рис. 5. Зависимость показателя k_v от безразмерных комплексов Π_1 и ϵ для жидкости Шульмана – Кессона

Для реологической модели Бингама $\dot{\gamma} = (\tau - \tau_0)/\eta$ динамическое напряжение сдвига τ_0 и пластическую вязкость η изменяли в пределах $\tau_0 = (1; 5; 9; 13)$ Па и $\eta = (0.005; 0.015; 0.025; 0.035)$ Па·с. В таблице 2 приведены исходные данные и результаты численных экспериментов. Для жидкости Бингама максимальная скорость течения на ядре потока, ограниченного диаметрами d_1 и d_2 .

В факторном пространстве показатель выносной способности $k_v = 0.701 - 0.963$ и выше, чем для жидкостей Ньютона и Оствальда. Наибольшее значение показателя k_v отвечает точке плана эксперимента с кольцевым зазором для $d = 127$ мм, наибольшим значением $\tau_0 = 13$ Па, наименьшими значениями $\eta = 0.005$ Па·с и расхода $Q = 10$ л/с. Для этой точки плана ядро потока имеет наибольший размер ($d_1 = 131.4$ мм и $d_2 = 214.3$ мм). Отмеченное, по существу, определяет тенденции регулирования реологическими свойствами и расходом жидкости Бингама с целью обеспечения максимальных показателей выносной способности.

Для реологической модели Гершеля – Балкли $\dot{\gamma} = ((\tau - \tau_0)/k)^{1/n}$ показатели консистенции и нелиней-

ности изменяли в пределах аналогичных жидкости Оствальда, а динамического напряжения сдвига – жидкости Бингама. В таблице 3 приведены исходные данные и результаты численных экспериментов. Показатель выносной способности составляет $k_v = 0.722 - 0.925$.

Представим зависимость показателя выносной способности от обобщенных координат

$$k_v = k_v(\epsilon, \Pi) \tag{9}$$

где $\epsilon = d/D$, $\Pi = kv_c^n / (\tau_0 (D - d)^n)$ – безразмерные комплексы.

Оценку модели (9) и ее параметров построим в классе полиномов третьего порядка для различных сочетаний базисных функций $(1, \epsilon, \Pi, \epsilon\Pi, \epsilon^2, \Pi^2, \epsilon\Pi^2, \epsilon^2\Pi, \epsilon^3, \Pi^3)$ на основании данных таблицы 3 из условия минимума дисперсии адекватности σ_a^2 . Наиболее адекватная модель

$$k_v = \alpha_0 + \alpha_1\epsilon + \alpha_2\Pi + \alpha_3\Pi^3 \tag{10}$$

с оценками параметров $\alpha_0 = 1.04754$, $\alpha_1 = -0.19757$, $\alpha_2 = -0.28426$, $\alpha_3 = 0.09818$ и дисперсии $\sigma_a^2 = 4.7718 \cdot 10^{-4}$.

Таблица 4

Результаты оценок выносной способности жидкости Шульмана – Кессона

Опыт	Факторы					Результаты				
	d , мм	Q , м ³ /с	τ_0 , Па	η , Па·с	n	ν_c , м/с	ν_0 , м/с	d_1 , мм	d_2 , мм	k_v
1	127.0	0.010	13	0.005	1.8	0.395	0.430	138.9	204.3	0.918
2	139.7	0.010	9	0.015	2.2	0.441	0.520	161.0	194.3	0.848
3	165.1	0.010	5	0.025	2.6	0.602	0.769	186.9	196.2	0.784
4	177.8	0.010	1	0.035	1.4	0.758	1.056	196.9	200.0	0.718
5	127.0	0.015	5	0.015	2.2	0.592	0.720	154.8	185.9	0.822
6	139.7	0.015	1	0.005	2.6	0.661	0.837	169.8	185.3	0.790
7	165.1	0.015	13	0.035	1.4	0.903	1.100	180.4	203.1	0.821
8	177.8	0.015	9	0.025	1.8	1.138	1.446	193.0	203.8	0.787
9	127.0	0.020	9	0.025	1.4	0.789	0.930	147.4	194.7	0.849
10	139.7	0.020	5	0.035	1.8	0.882	1.124	167.6	187.9	0.784
11	165.1	0.020	1	0.005	2.2	1.204	1.568	187.2	196.1	0.768
12	177.8	0.020	13	0.015	2.6	1.517	1.916	194.3	202.4	0.792
13	127.0	0.025	1	0.035	2.6	0.986	1.343	167.8	173.6	0.734
14	139.7	0.025	13	0.025	1.4	1.102	1.305	158.4	197.8	0.845
15	165.1	0.025	9	0.015	1.8	1.506	1.869	183.0	200.3	0.806
16	177.8	0.025	5	0.005	2.2	1.896	2.380	193.2	203.5	0.797

На рисунке 4 показано зависимости (10) показателя выносной способности от безразмерного комплекса П для изученных кольцевых зазоров, характерной особенностью которых является наличие минимума. Большие значения показателя k_v , соответствуют областям низких и высоких значений комплекса П. Эти зависимости иллюстрируют влияние регулируемых параметров на выносную способность жидкости Гершеля – Балкли.

Для реологической модели Шульмана – Кессона $\dot{\gamma} = (\tau^{1/n} - \tau_0^{1/n})^n / \eta$ динамическое напряжение сдвига τ_0 и пластическую вязкость η изменяли аналогично жидкости Бингама, а показатель нелинейности $n = (1.4; 1.8; 2.2; 2.6)$. В таблице 4 приведены исходные данные и результаты численных экспериментов. Показатель выносной способности составляет $k_v = 0.718 - 0.918$.

Аналогично (10) на основании данных таблицы 4 построена модель

$$k_v = \alpha_0^{(i)} + \alpha_1^{(i)} \varepsilon + \alpha_2^{(i)} \Pi_1 + \alpha_3^{(i)} \Pi_1^2 \quad (11)$$

с оценками параметров $\alpha_0^{(i)} = 0.92300$, $\alpha_1^{(i)} = -0.05330$, $\alpha_2^{(i)} = -0.43924$, $\alpha_3^{(i)} = 0.30454$ и дисперсии адекватности $\sigma_a^2 = 4.5302 \cdot 10^{-4}$. Здесь $\Pi_1 = (\eta \nu_c / \tau_0 (D - d))^{1/n}$ – безразмерный комплекс. На рисунке 5 показано зависимости (11) показателя k_v от комплекса Π_1 для граничных кольцевых зазоров с диаметрами труб 127 и 177.8 мм, которые отражают влияние регулируемых параметров на выносную способность жидкости Шульмана – Кессона.

4. Влияние условий скважины на выносную способность буровых растворов

Выше (см. пп. 1 и 2) обращалось внимание на основные факторы, влияющие на выносную способность буровых растворов. К их числу следует также отнести влияние условий скважины (температура, давление) на реологические свойства неньютоновских жидкостей. В этом случае показатель выносной способности зависит от глубины

скважины, что важно для обоснования реологических свойств буровых растворов.

В качестве иллюстрации рассмотрим влияние температуры на показатели реологических свойств и выносную способность буровых растворов при бурении под эксплуатационную колонну скважины 72-Семиренковская [16]. В литологическом отношении разрез в интервале 2775 – 4190 м представлен аргиллитами, алевролитами, песчаниками и известняками, склонных к потере устойчивости стенок скважины.

В [16] приведены сведения о технологии бурения скважины 72-Семиренковская и анализ причин осложнений. Для бурения в интервале осложнений использовали полимер-ингибированный буровой раствор (ПИБР). В качестве альтернативной технологии рассмотрена возможность проходки интервала осложнений с помощью инвертно-эмульсионной системы WITER II [17]. Представляет интерес оценка выносной способности ПИБР и WITER II для условий интервала осложнений.

В таблице 5 приведены результаты оценок показателей реологических свойств и выносной способности сравниваемых буровых растворов для температур в интервале осложнений. Реологические свойства оценивали по данным измерений на ротационном вискозиметре OFITE 1100 с частотами вращения, мин⁻¹: 3, 6, 30, 60, 100, 200, 300, 600. Обработка данных измерений выполнена по методике [18] в классе реологических моделей Бингама, Оствальда, Гершеля – Балкли и Шульмана – Кессона. Отметим, что для ПИБР и системы WITER II согласно принципу максимума функции правдоподобия [19-21] наиболее адекватной является реологическая модель Гершеля – Балкли.

Из результатов таблицы 5 следует, что для анализируемых буровых растворов характерна тенденция повышения показателя выносной способности с глубиной. Это обусловлено особенностью изменения реологических

Таблица 5

Оценки показателей реологических свойств и выносной способности ПИБР и системы WITER II

Глубина, м	Температура, °С	ПИБР				WITER II			
		τ_0 , Па	k , Па·с ⁿ	n	k_v	τ_0 , Па	k , Па·с ⁿ	n	k_v
2775	65	1.421	0.045	0.762	0.7921	3.338	0.054	0.8105	0.8122
3000	70	1.570	0.037	0.772	0.8051	3.850	0.018	0.9276	0.8419
3345	80	1.843	0.038	0.796	0.8039	3.732	0.010	0.9776	0.8560
3690	90	2.161	0.027	0.816	0.8255	3.500	0.008	0.9837	0.8627
4190	102	2.375	0.021	0.812	0.8474	3.137	0.017	0.8420	0.8641

Примечания: D=220 мм, d=127 мм, Q=34 л/с.

свойств от температуры. Отметим, что условие выноса частичек шлама обеспечивается принятой величиной расхода $Q=34$ л/с [16].

Так, для системы ПИБР реологические свойства при температуре 24 °С составляют $\tau_0=0.579$ Па, $k=0.088$ Па·сⁿ, $n=0.7230$, а показатель выносной способности $k_v=0.7371$; для системы WITER II реологические свойства при температуре 30 °С – $\tau_0=2.951$ Па, $k=0.1162$ Па·сⁿ, $n=0.7957$ и показатель $k_v=0.7680$. Оценки показывают, что система WITER II обладает лучшей выносной способностью в сравнении с ПИБР.

Эти результаты послужили одним из обоснований альтернативной технологии бурения осложненных интервалов на Семиренковском месторождении с применением инвертно-эмульсионной системы WITER II [16].

Таким образом, предложенная оценка показателя выносной способности (8) бурового раствора является полезной для выбора оптимальных рецептур. В данном случае в качестве критерия оптимальности или ограничений на реологические свойства можно использовать значения показателей k_v , обеспечивающих эффективность очистки ствола скважины в соответствующих условиях бурения.

Выводы

- Предложено показатель выносной способности буровых растворов, учитывающий полноту профиля потока в кольцевом пространстве и позволяющий оценить влияние реологических свойств на эффективность выноса шлама.
- Изучено влияние некоторых факторов на показатели выносной способности буровых растворов при ламинарном течении в концентрическом кольцевом зазоре для реологических моделей Ньютона, Оствальда, Бингама, Гершеля – Балкли и Шульмана – Кессона. Для модели Ньютона показатель выносной способности не зависит от расхода и вязкости, а влияние применяемых кольцевых зазоров незначительно. Для неньютоновских моделей показатель k_v зависит от комплекса изучаемых факторов и количественно выше, чем для ньютоновской модели.
- На основе анализа промысловых данных бурения скважины 72-Семиренковская показано влияние температуры на выносную способность систем ПИБР и WITER II. Отмечено характерное повышение показателя k_v выносной способности с глубиной (температурой).

Литература

1. Грей, Дж. Р., Дарли, Г. С. Г. (1985). Состав и свойства буровых агентов (промысловых жидкостей). Москва: Недра.
2. Маковей, Н. (1986). Гидравлика бурения. Москва: Недра.
3. Мирзаджанзаде, А. Х., Ширинзаде, С. А. (1986). Повышение эффективности и качества бурения глубоких скважин. Москва: Недра.
4. Леонов, Е. Г., Исаев, В. И. (1987). Гидроаэромеханика в бурении. Москва: Недра.
5. Есьман, Б. И., Габузов, Г. Г. (1991). Термогидравлические процессы при бурении скважин. Москва: Недра.
6. Гукасов, Н. А., Брюховецкий, О. С., Чихоткин, В. Ф. (1999). Гидродинамика в разведочном бурении. Москва: Недра.
7. Леонов, Е. Г., Исаев, В. И., Лукьянов, И. П. (2006). Теория и методика расчета расхода бурового раствора различной реологии для очистки от шлама ствола наклонно-направленных скважин. *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*, 8, 24-31.
8. Mitchell, R. F. (2007). *Petroleum engineering handbook. Vol. II: Drilling engineering*. Houston: Society of Petroleum Engineers.
9. Мысляк, М. А. (2009). Об оценке выносной способности промысловой жидкости при бурении скважин. *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*, 2, 29-32.
10. Митчелл, Дж. (2017). Безаварийное бурение. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований.
11. Okesanya, T., Kuru, E. (2019, September). A new generalized model for predicting particle settling velocity in viscoplastic fluids. SPE-196104-MS. In: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
12. Myslyuk, M. A. (2016). Rheotechnologies in well drilling. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*, 3(2), 39-45.

13. Zwick, K. J., Ayyaswamy, P. S., Cohen, I. M. (1996). Variational analysis of the squeezing flow of a yield stress fluid. *Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 63, 179-199.
14. Huilgol, R. R. (1998). Variational principle and variational inequality for a yield stress fluid in the presence of slip. *Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 75, 231-251.
15. Frigaard, I. A., Leimgruber, S., Scherzer, O. (2003). Variational methods and maximal residual wall layers. *Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 483, 37-65.
16. Raptanov, A. K., Ruzhenskyi, V. V., Kostiv, B. I., et al. (2021). Analysis of the deep drilling technology in unstable formations at the Semyrenky gas condensate field. *SOCAR Proceedings*, SI2, 52-64.
17. Лубан, Ю. В., Лубан, С. В. (2017). Научные разработки «Геосинтез инжиниринг» для повышения эффективности бурения и продуктивности скважин. Материалы міжнародної конференції GeoDrilling II. Буріння і розкриття пластів. *Полтава: ФОП Говоров С.В.*
18. Myslyuk, M. A. (1988). Determination of rheological parameters for a dispersion system by rotational viscosimetry. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 54(6), 655-658.
19. Мысляк, М. А., Салыжин, Ю. М. (2007). Оценка влияния баротермических условий на реологические свойства буровых растворов. *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*, 4, 44-47.
20. Myslyuk, M., Salyzhyn, I. (2012). The evaluation rheological parameters of non-Newtonian fluids by rotational viscosimetry. *Applied Rheology*, 22(3), 32381.
21. Мысляк, М. А. (2019). Определение реологических свойств буровых технологических жидкостей по данным ротационной вискозиметрии. *SOCAR Proceedings*, 4, 4-12.

References

1. Darley, H. C. H., Gray, G. R. (1988). Composition and properties of drilling and completion fluids. *Houston, TX: Gulf Professional Publishing*.
2. Macovei, N. (1982). Well drilling hydraulics. *București: Editura Tehnică*.
3. Mirzajanzadeh, A. Kh., Shirinzade, S. A. (1986). Improving the efficiency and quality of deep-well drilling. *Moscow: Nedra*.
4. Leonov, E. G., Isaev, V. I. (1987). Hydroaeromechanics in drilling. *Moscow: Nedra*.
5. Yesman, B. I., Gabuzov, G. G. (1991). Thermohydraulic processes in well drilling. *Moscow: Nedra*.
6. Gukasov, N. A., Bryukhovetsky, O. S., Chikhotkin, V. F. (1999). Hydrodynamics in exploration drilling. *Moscow: Nedra*.
7. Leonov, Ye. G., Isayev, V. I., Luk'yanov, I. P. (2006). Teoriya i metodika rascheta raskhoda burovogo rastvora razlichnoy reologii dlya ochistki ot shlama stvola naklonno-napravlenykh skvazhin. *Stroitel'stvo Neftyanykh i Gazovykh Skvazhin na Sushe i na More*, 8, 24-31.
8. Mitchell, R. F. (2007). Petroleum engineering handbook. Vol. II: Drilling engineering. *Houston: Society of Petroleum Engineers*.
9. Myslyuk, M. A. (2009). Ob otsenke vynosnoy sposobnosti promyvochnoy zhidkosti pri burenii skvazhin. *Stroitel'stvo Neftyanykh i Gazovykh Skvazhin na Sushe i na More*, 2, 29-32.
10. Mitchell, J. (2002). Trouble-free drilling. *The Woodlands, TX: Drilbert Engineering, Inc.*
11. Okesanya, T., Kuru, E. (2019, September). A new generalized model for predicting particle settling velocity in viscoplastic fluids. SPE-196104-MS. In: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers*.
12. Myslyuk, M. A. (2016). Rheotechnologies in well drilling. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*, 3(2), 39-45.
13. Zwick, K. J., Ayyaswamy, P. S., Cohen, I. M. (1996). Variational analysis of the squeezing flow of a yield stress fluid. *Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 63, 179-199.
14. Huilgol, R. R. (1998). Variational principle and variational inequality for a yield stress fluid in the presence of slip. *Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 75, 231-251.
15. Frigaard, I. A., Leimgruber, S., Scherzer, O. (2003). Variational methods and maximal residual wall layers. *Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 483, 37-65.
16. Raptanov, A. K., Ruzhenskyi, V. V., Kostiv, B. I., et al. (2021). Analysis of the deep drilling technology in unstable formations at the Semyrenky gas condensate field. *SOCAR Proceedings*, SI2, 52-64.
17. Лубан, Ю. В., Лубан, С. В. (2017). Научные разработки «Геосинтез инжиниринг» для повышения эффективности бурения и продуктивности скважин. Материалы міжнародної конференції GeoDrilling II. Буріння і розкриття пластів. *Полтава: ФОП Говоров С.В.*
18. Myslyuk, M. A. (1988). Determination of rheological parameters for a dispersion system by rotational viscosimetry. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 54(6), 655-658.
19. Мысляк, М. А., Салыжин, Ю. М. (2007). Оценка влияния баротермических условий на реологические свойства буровых растворов. *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*, 4, 44-47.
20. Myslyuk, M., Salyzhyn, I. (2012). The evaluation rheological parameters of non-Newtonian fluids by rotational viscosimetry. *Applied Rheology*, 22(3), 32381.
21. Myslyuk, M. A. (2019). Determination of rheological properties of drilling fluids by rotational viscosimetry data. *SOCAR Proceedings*, 4, 4-12.

Об оценке выносной способности буровых растворов

М. А. Мыслюк

Ивано-Франковский национальный технический университет
нефти и газа, Ивано-Франковск, Украина

Реферат

Рассмотрены методы оценки выносной способности буровых растворов для эффективной очистки ствола скважины. Предложено показатель выносной способности буровых растворов, учитывающий полноту профиля потока в кольцевом пространстве. Для реологических моделей Ньютона, Оствальда, Бингама, Гершеля – Балкли и Шульмана – Кессона изучено влияние расхода и реологических свойств на показатель выносной способности при ламинарном течении в концентрическом кольцевом зазоре. На основе анализа промысловых данных показано влияние температуры на показатели выносной способности буровых растворов.

Ключевые слова: буровой раствор; выносная способность; ламинарное течение; реологическая модель.

Qazma məhlullarının çıxarma qabiliyyətinin qiymətləndirilməsinə dair

M. A. Mıslıyuk

İvano-Frankovsk Milli Neft və Qaz Texniki Universiteti, İvano-Frankovsk, Ukrayna

Xülasə

Quyu gövdəsinin effektiv təmizlənməsi üçün qazma məhlullarının çıxarma qabiliyyətinin qiymətləndirilməsi üsulları nəzərdən keçirilir. Həlqəvi fəzada axın profilinin tamlığını nəzərə alaraq qazma məhlullarının çıxarma qabiliyyətinin göstəricisi təklif olunur. Nyuton, Ostvald, Binqam, Herşel – Balkli və Şulman – Kessonun reoloji modelləri üçün axın sürətinin və reoloji xüsusiyyətlərin konsentrik həlqəvi aralıqda laminar axınında çıxarma göstəricisinə təsiri öyrənilmişdir. Mədən məlumatlarının təhlili əsasında temperaturun qazma məhlullarının çıxarma qabiliyyətinin göstəricilərinə təsiri göstərilir.

Açar sözlər: qazma məhlulu; çıxarma qabiliyyəti; laminar axını; reoloji modeli.