Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т.XCIII, 1982 г.

УДК 622.244.443:66.069.85

ОСНОВЫ ТЕОРИИ И РАСЧЕТ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПЕНЫ В СКВАЖИНЕ

Б.Б.КУДРЯШОВ, Ю.Д.МУРАЕВ,
В.Я.КЛИМОВ

Пена – одна из разновидностей промывочных агентов, особенно перспективна при бурении скважин в осложненных условиях. Практическое освоение этого эффективного технологического средства требует обоснованного расчетами выбора насосного и компрессорного оборудования, проектирования рациональных режимов циркуляции. Полное математическое описание движения газожидкостных систем сопряжено с большими трудностями [9]. Движение пены – среды сильно диспергированной – является, кроме того, наименее изученной областью реологии.

К пенам относятся газожидкостные системы, в которых плотность упаковки пузырьков газа обеспечивает их многогранную форму, а в состав жидкой фазы входит раствор поверхностно-активного вещества. Количественные соотношения газовой и жидкой фаз принято называть степенью аэрации. Степень аэрации

$$\alpha = \frac{Q_0}{Q},$$

где Q_0 – объемный расход газа; Q – объемный расход жидкости (для условий бурения скважин $\alpha = 100 \div 300$).

Исследователи, рассматривающие пену по аналогии с аэрированной жидкостью [10] в качестве двухфазной гетерогенной системы, уделяют основное внимание учету проскальзывания газовой фазы относительно жидкости, которое выражают коэффициентом, равным отношению приведенных скоростей газовой фазы и смеси $k_0 = v_{см}/v_0$. При этом истинная газонасыщенность $\varphi = \beta/k_0$ (где $\beta = Q_0/(Q+Q_0)$ – расходное газосодержание). Имеющиеся в литературе [4] опытные данные свидетельствуют, что, как правило, в восходящем потоке $k_0 > 1$, а в нисходящем $k_0 < 1$. Применительно к аэрированной жидкости эти факты можно связать с архимедовой выталкивающей силой, но ее точный учет требует знания фактической

дисперсности газовых пузырьков и ее изменений в потоке. Расчеты, проведенные по предложенным методикам [2, 9, 10], дают завышенные значения давления в потоке.

Между тем характерные для пены объемные и массовые соотношения газа и жидкости весьма близки к имеющим место при пневматическом транспортировании сыпучих материалов [8], что дает возможность применить к анализу и расчету движения пены закономерности пневмотранспортирования и существенно упростить постановку и решение задачи.

Поскольку структурные свойства пены позволяют рассматривать ее в качестве гомогенной среды, будем для простоты предполагать полное отсутствие взаимного проскальзывания фаз, т.е. полагаем $K_0 = I$ и соответственно $\varphi = \rho$. Подобные допущения были положены в основу расчетов потерь давления при движении аэрированной жидкости [6]. Однако неполный учет особенностей двухфазных систем привел к значительным отклонениям расчетных данных от экспериментальных [2].

В принятой нами аналитической схеме начало координат поместим на устье скважины. Принимая за основу уравнение Бернулли (без учета инерционного члена и механической работы) и выражая работу трения по формуле Дарси-Вейсбаха, для восходящего потока пены при прямой циркуляции напишем

$$dP = \lambda_{см} \frac{v_{см}^2 \rho_{см}}{2D_э} dh + g\rho_{см} dh, \qquad (I)$$

где P – давление смеси, Па; $v_{см}$ – скорость движения смеси, м/с; $\rho_{см}$ – плотность смеси, кг/м^3; $D_э$ – эквивалентный диаметр кольцевого канала, м; g – ускорение свободного падения, $g = 9{,}81$ м/с^2; h – глубина скважины, м; $\lambda_{см}$ – безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления смеси.

Чтобы установить связь только между давлением P и глубиной скважины h, с помощью уравнения состояния газа выразим $v_{см}$ и $\rho_{см}$ через соответствующие массовые расходы и давление следующим образом:

$$v_{см} = \frac{1}{F}\left(\frac{G}{\rho} + \frac{G_0 R T}{P}\right), \qquad (2)$$

$$\rho_{см} = \frac{\rho(G + G_0)P}{GP + \rho G_0 R T}, \qquad (3)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3; G, G_0 – массовые расходы, соответственно, жидкости и газа, кг/с; F – площадь сечения кольцевого канала, м^2; T – средняя температура в скважине, К; R – газовая постоянная (для воздуха $R = 287$ Дж/(кг·К); P – давление газа, Па.

Подставляя выражения (2) и (3) в уравнение (I), после преобразований получим

$$dP = n\frac{P + a}{P} dh + \frac{bP}{P + a} dh, \qquad (4)$$

где $a=\rho\frac{G_0}{G}RT$; $b=g\rho\left(1+\frac{G_0}{G}\right)$; $n=\lambda_{см}\frac{G(G+G_0)}{2D_э F^2\rho}$.

Переменные в уравнении (4) разделяются, и задача сводится к табличным интегралам. Интегрируя от 0 до h и от конечного давления на устье скважины $P_у$ до некоторого начального давления P на глубине h (т.е. в направлении роста давления под действием гидравлических сопротивлений и гидростатических сил), имеем

$$\int_{P_у}^{P}\frac{P^2dP}{(b+n)P^2+2anP+a^2n}+a\int_{P_у}^{P}\frac{PdP}{(b+n)P^2+2anP+a^2n}=\int_0^h dh.$$

После преобразований для зависимости $P=f(h)$ в восходящем по вертикальному кольцевому каналу потоке пены окончательно получим

$$P=P_у+(b+n)h-\frac{a(b-n)}{2(b+n)}\ln\frac{(b+n)P^2+2anP+a^2n}{(b+n)P_у^2+2anP_у+a^2n}+$$

$$+\frac{2a\sqrt{bn}}{b+n}\operatorname{arctg}\frac{a(b+n)\sqrt{bn}(P-P_у)}{a^2bn+[(b+n)P+an][(b+n)P_у+an]}. \qquad (5)$$

В случае нисходящего потока пены по гидравлическому каналу бурильной колонны первый член правой части уравнения (4) принимает обратный знак и вместо n в него входит

$$m=\lambda_{см}\frac{G(G+G_0)}{2df^2\rho},$$

где d – внутренний диаметр бурильной колонны, м; f – площадь сечения круглого канала, м^2.

Интегрирование от некоторой текущей координаты h до конечной глубины скважины H и от P до конечного давления в нисходящем потоке $P_к$ дает

$$\int_{P}^{P_к}\frac{P^2dP}{(b-m)P^2-2amP-a^2m}+a\int_{P}^{P_к}\frac{PdP}{(b-m)P^2-2amP-a^2m}=\int_h^H dh.$$

После преобразований для распределения давления в нисходящем потоке пены получим

$$P=P_к-(b-m)(H-h)+\frac{a(b+m)}{2(b-m)}\ln\frac{(b-m)P_к^2-2amP_к-a^2m}{(b-m)P^2-2amP-a^2m}+$$

$$+\frac{a\sqrt{bm}}{b-m}\ln\frac{(b-m)P_кP-am(P_к+P)+a\sqrt{bm}(P_к-P)-a^2m}{(b-m)P_кP-am(P_к+P)-a\sqrt{bm}(P_к-P)-a^2m}. \qquad (6)$$

Выражение (6) в отличие от (5) не содержит арктангенса, поскольку знак дискриминанта в подынтегральных выражениях отрицателен. В качестве конечного давления в нисходящем потоке можно принимать $P_к=P_э+\Delta P$ (здесь $P_э$ – давление у забоя в восходящем потоке; ΔP – известный

из опыта перепад давления в долоте, колонковом наборе или, например, в пневмоударнике). При условии $h = 0$ трансцендентная формула (6) дает давление нагнетания $P = P_н$, т.е. давление, необходимое для обеспечения устойчивой циркуляции пены в конкретных условиях.

Расчет следует вести в направлении, обратном движению потока пены, исходя из заранее известного давления на выходе из устья скважины, равному в нижеприведенных расчетах атмосферному – $P_у = 1 \cdot 10^5$ Па. Определив по формуле (5) при $h = H$ призабойное давление в восходящем потоке $P_э$ и задавшись величиной перепада давления на забое ΔP, по формуле (6) при $h = 0$ можно найти давление нагнетания $P_н$.

Получившиеся точные выражения для давления в потоках пены как гомогенной среды являются трансцендентными и требуют машинного счета. Причем выражение (5) удобнее использовать, записав его в виде

$$h = \frac{P - P_у}{b+n} + \frac{a(b-n)}{2(b+n)^2} \ln \frac{(b+n)P^2 + 2anP + a^2 n}{(b+n)P_у^2 + 2anP_у + a^2 n} - \\ - \frac{2a\sqrt{bn}}{(b+n)^2} \operatorname{arctg} \frac{a(b+n)\sqrt{bn}(P - P_у)}{a^2 bn + [(b+n)P + an][(b+n)P_у + an]}. \qquad (7)$$

За основу при определении коэффициента сопротивления $\lambda_{см}$, входящего в формулу (7), в виде сокращающего обозначения n, принимаем выражение, используемое в теории пневматического транспортирования [8],

$$\lambda_{см} = \lambda_0 \left(1 + K_г \frac{G}{G_0}\right), \qquad (8)$$

где λ_0 – безразмерный коэффициент сопротивления движению чистого газа; $K_г$ – безразмерный коэффициент, впервые предложенный Гастерштадтом [5], зависящий от рода транспортируемого материала, а в наших условиях также от состава пены, ее свойств, режима движения и определяемый из опыта.

Применительно к нисходящему потоку коэффициент сопротивления движению газожидкостной смеси можно выразить соотношением

$$\lambda_{см} = \lambda_0 \left(1 + K_г \frac{G_0}{G}\right). \qquad (9)$$

На основе экспериментальных данных А.В.Амияна и И.М.Мурадяна [3, 7] по формуле (7) была определена величина $\lambda_0^э$. Расчет производился на ЭВМ методом последовательных приближений при $K_г = 1$. Поскольку при этом значение $\lambda_0^э$ оказалось близким к значениям коэффициента сопротивления движению чистого воздуха (газа), дополнительно были проведены расчеты с использованием формулы Вейсбаха [8]:

$$\lambda_0 = \frac{0{,}009407}{\sqrt[5]{D_э}}, \qquad (10)$$

где $D_э$ – эквивалентный диаметр канала.

При этом с учетом геометрических размеров опытных скважин (D/d = = 0,150/0,073) и расходе жидкости 3 кг/с по формуле (10) рассчитывалась величина коэффициента $\lambda_0^т$ и после ее подстановки в формулы (6) и (7) вычислялись значения глубин $h_э$, на которых замерялось давление пены в скважине при проведении экспериментов. Относительные ошибки при расчете глубины с использованием $\lambda_0^т$ в среднем не превышают $\pm 3{,}6$ %.

Значения расчетных ($h_т$, $\lambda_0^т$) и экспериментальных ($h_э$, $p_э$, $\lambda_0^э$) данных [3, 7] сведены соответственно в табл.I и 2. Кривые изменения давления при прокачивании пены в скважине для различных значений α приведены на рис.I (а, в).

Определение расчетной зависимости для коэффициента $K_г$ для газожидкостной смеси (пены) должно стать предметом дальнейших исследований. Применительно к рассмотренным опытным данным коэффициент $K_г$ изменялся

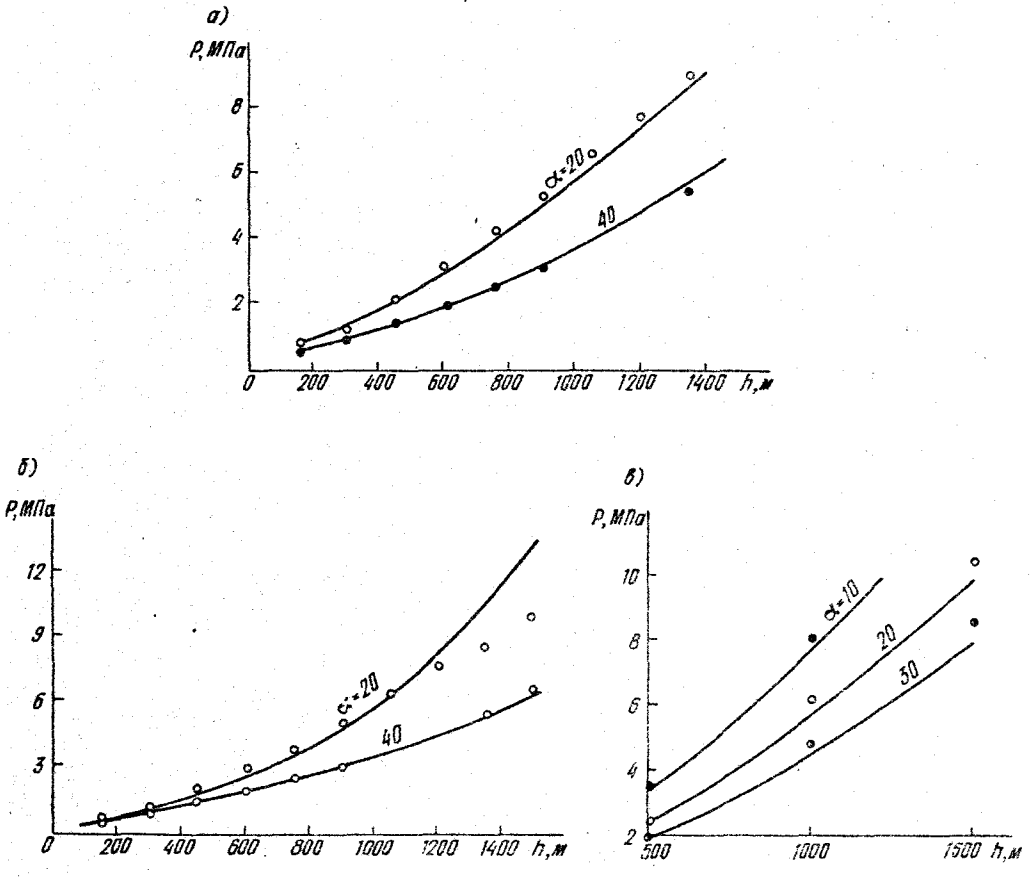


Рис.I. Опытные точки и расчетные кривые зависимости давления пены в затрубном пространстве от глубины скважины, по данным А.В.Амияна, И.М.Мурадяна [3] (а, б), И.М.Мурадяна [7] (в)

Таблица 1

	$h_э$, м	156	304	454	604	755	904	1054	1203	1352	1498
$\alpha = 20$	$p_э$, МПа	0,608	1,176	2,108	3,138	4,168	5,335	6,580	7,826	4,022	10,248
	$\lambda_0^э$	0,0165	0,0171	0,0228	0,0255	0,0251	0,0261	0,0271	0,0273	0,0262	0,0256
	$\lambda_0^т$	0,02185	0,02185	0,02185	0,02185	0,02185	0,02185	0,02185	0,02185	0,02185	0,02185
	$K_г$	0,748	0,776	0,044	1,170	1,151	1,198	1,245	1,203	1,197	1,175
	$h_т$, м	134	277	460	629	779	936	1095	1247	1389	1531
	$\frac{h_т - h_э}{h_э}$ 100 %	-14,1	-8,88	+1,32	+4,14	+3,17	+3,54	+3,89	+3,66	+2,74	+2,2
$\alpha = 40$	$p_э$, МПа	0,568	0,932	1,432	1,883	2,452	3,079	–	–	5,433	6,502
	$\lambda_0^э$	0,0211	0,0203	0,0225	0,0205	0,0199	0,0143	–	–	0,0183	0,0199
	$\lambda_0^т$	0,02185	0,02185	0,02185	0,02185	0,02185	0,02185	–	–	0,02185	0,02185
	$K_г$	0,963	0,925	1,03	0,934	0,905	0,877	–	–	0,829	0,905
	$h_т$, м	153	292	460	590	733	872	–	–	1303	1472
	$\frac{h_т - h_э}{h_э}$ 100 %	-1,92	-3,95	+1,32	-2,32	-2,92	-3,54	–	–	-3,62	-1,74

Таблица 2

	$h_э$, м	500	1000	1500
$\alpha = 10$	$P_э$, МПа	3,54	8,10	12,71
	$\lambda_0^э$	0,0238	0,0239	0,0208
	$\lambda_0^т$	0,02185	0,02185	0,02185
	$K_г$	1,09	1,09	0,05
	$h_т$, м	510	1014	1491
	$\frac{h_т - h_э}{h_э}$ 100 %	+2,0	-1,4	-0,6
$\alpha = 20$	$P_э$, МПа	2,393	6,227	10,542
	$\lambda_0^э$	0,0232	0,0286	0,0296
	$\lambda_0^т$	0,02185	0,02185	0,02185
	$K_г$	1,06	1,32	1,36
	$h_т$, м	510	1045	1564
	$\frac{h_т - h_э}{h_э}$ 100 %	+2,0	+4,5	+4,3
$\alpha = 30$	$P_э$, МПа	1,893	4,844	8,747
	$\lambda_0^э$	0,0237	0,027	0,029
	$\lambda_0^т$	0,02185	0,02185	0,02185
	$K_г$	1,09	1,24	1,34
	$h_т$, м	515	1048	1589
	$\frac{h_т - h_э}{h_э}$ 100 %	+3,0	+4,8	+5,9

в пределах 0,75÷I,36. Выбор соответствующего значения $K_г$ обеспечивает практически полное совпадение расчетных данных с опытными.

С целью получения более простых зависимостей, пригодных для практических расчетов, раздельно получены две экспоненциальные функции для давления газожидкостной смеси, определяемого динамическими и гидростатическими силами. С помощью разложения этих функций в ряд и последующего приближенного объединения их в одну функцию получена следующая приближенная расчетная формула:

$$P = (P_у + a)\, e^{\frac{1}{a}(b-n)h} - a. \qquad (II)$$

Пренебрегая в соотношении (8) единицей, поскольку в условиях движения пены даже при высоких степенях аэрации $G/G_0 \gg I$, и подставляя значение $\lambda_{см}$ в комплекс, обозначенный n, из выражения (II) получим формулу для определения численных значений коэффициента сопротивления в восходящем потоке пены по опытным данным:

$$\lambda_{см} = K_г \lambda_0 \frac{G}{G_0} = c\left(b - \frac{a}{n} \ln \frac{P+a}{P_у+a}\right), \qquad (I2)$$

где $c = \frac{2 D_э F^2 \rho}{G(G+G_0)}$.

Таблица 3

α	10	20	30	40	50	60	70	80
a, МПа	1,10	2,21	3,31	4,41	5,52	6,62	7,72	8,83
$b \cdot 10^{-4}$, Н/м^3	0,99	1,00	1,02	1,03	1,04	1,05	1,07	1,08
$n \cdot 10^{-2}$, Н/м^3 (при расходе воды Q = = 3 л/с, D/d = = 0,150/0,073)	3,25	3,29	3,33	3,37	3,41	3,45	3,49	3,53
$n \cdot 10^{-2}$, Н/м^3 (при расходе воды Q = = 3 л/с, D/d = = 0,150/0,089)	5,70	5,77	5,84	5,91	5,98	6,05	6,12	6,19

Полученные расчетные зависимости проверены с помощью фактических данных, приведенных А.В.Амияном и И.М.Мурадяном [1, 7]. В табл.3 сведены исходные данные для расчетов по формулам (II) и (I2).

В табл.4 приведены вычисленные по формуле (I2) величины коэффициентов сопротивления $\lambda_{см}$ и их средние значения, а также замеренные и рассчитанные по формуле (II) величины избыточного давления. Расчеты производились при D/d = 0,I50/0,073 и расходе жидкости 3 кг/с. Величина коэффициента сопротивления при G = 3 кг/с для глубины I500 м и различных степеней аэрации α приведена в табл.5. Конечное давление на устье $P_у$ во всех случаях принимается равным атмосферному $P_у$ = 0,I МПа. При расчетах по формуле (I2) подставляется абсолютное давление $P = P_{изм} + P_у$. Расчетное избыточное давление в формуле (II) определяется как $P_{рас} = P$.

Расчетные и измеренные значения давления, приведенные в табл.4 и сопоставляются также графически на рис.I,б и 2.

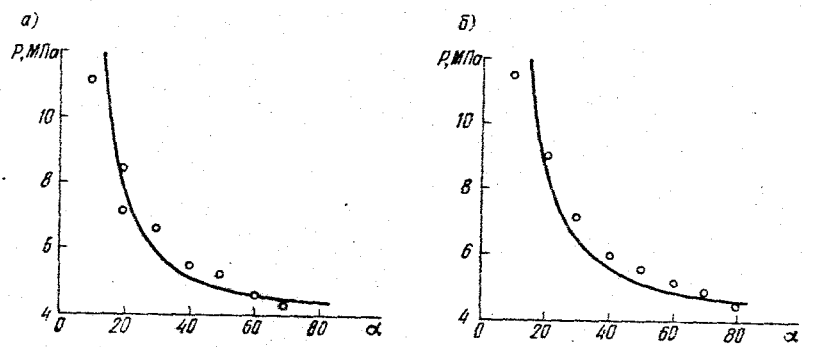


Рис.2. Опытные точки и расчетные кривые зависимости давления в затрубном пространстве от степени аэрации по данным [10]: а - при d = 0,073 мм; $D_э$ = 0,077 м; б - при d = 0,089 мм; $D_э$ = 0,061 м

Таблица 4

	$h_э$, м	156	304	454	604	755	904	1054	1303	1352	1498	Среднее значение
α = 20	$p_{изм}$, МПа	0,51	1,08	2,01	3,04	4,07	5,24	6,48	7,73	8,92	10,15	21,83
	$\lambda_{см}$	21,80	21,92	21,13	21,05	21,36	21,59	21,88	22,19	22,54	22,84	
	$p_{рас}$, МПа	0,51	1,09	1,81	2,68	3,74	5,00	6,55	8,40	10,64	13,29	
	$\frac{p_{рас}-p_{изм}}{p_{изм}}$ 100 %	0,00	+0,93	-9,95	-11,84	-8,11	-4,48	+1,08	+8,67	+19,28	+30,94	
α = 40	$p_{изм}$, МПа	0,47	0,83	1,33	1,78	2,35	2,98	–	–	5,33	6,40	23,05
	$\lambda_{см}$	22,25	23,29	23,11	23,36	23,29	23,22	–	–	23,01	22,85	
	$p_{рас}$, МПа	0,42	0,86	1,34	1,87	2,45	3,07	3,75	4,49	5,29	6,16	
	$\frac{p_{рас}-p_{изм}}{p_{изм}}$ 100 %	+10,64	+3,61	+0,75	+5,06	+4,26	+3,02	–	–	-0,75	-3,91	

Таблица 5

	α	10	20	30	40	50	60	70	80	Среднее значение
d = 0,073 м $D_э$ = 0,077 м	$p_{изм}$, МПа	11,08	8,45	6,55	5,50	5,24	4,61	4,31	4,09	23,94
	$\lambda_{см}$	25,22	23,50	23,53	23,61	23,39	23,75	24,19	24,31	
	$p_{рас}$, МПа	20,40	7,45	5,95	5,13	4,70	4,45	4,51	4,38	
	$\frac{p_{рас}-p_{изм}}{p_{изм}}$ 100 %	+84,45	-11,83	-9,16	-6,73	-10,31	-3,47	+4,64	+7,09	
d = 0,089 м $D_э$ = 0,061 м	$p_{изм}$, МПа	11,46	8,96	7,11	6,01	5,56	5,11	4,81	4,47	13,43
	$\lambda_{см}$	14,34	13,28	13,21	13,21	13,16	13,23	13,45	13,59	
	$p_{рас}$, МПа	24,42	8,33	6,51	5,56	5,08	4,79	4,84	4,69	
	$\frac{p_{рас}-p_{изм}}{p_{изм}}$ 100 %	+113,09	-7,09	-8,44	-7,49	-8,63	-6,26	+0,62	+4,92	

Расчетный анализ с использованием опытных данных [1, 7] показал, что в условиях рассмотренного приближенного решения P изменяется прямо пропорционально степени аэрации $\alpha = Q_0/Q$, а при изменении α от 10 до 80 остается практически постоянным, изменяясь пропорционально квадрату отношения $D_э/Q$. Это позволило получить для $\lambda_{см}$ в случае восходящего потока простое расчетное выражение

$$\lambda_{см} = \frac{0{,}0343 K_г D_э^2}{Q^2}, \qquad (13)$$

где постоянная должна иметь размерность кинематического коэффициента вязкости в квадрате (метр в четвертой степени на секунду в квадрате); $K_г$ – безразмерный опытный коэффициент, в рассмотренных случаях $K_г = 0{,}95 \div 1{,}03$.

Предложенные решения задачи распределения давления в скважине при циркуляции пены могут служить удобной схемой для построения инженерной методики расчетов с достаточной для практики точностью. Уже в представленном виде они пригодны для прогнозных расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амиян А.В. Некоторые вопросы гидравлики пенных систем. – Газовая промышленность, 1976, № 4.

2. Амиян А.В., Васильева Н.П., Мурадян И.М. Энергия упругой системы (пен) в условиях скважины. – Нефтепромысловое дело, 1966, № 6.

3. Амиян А.В., Мурадян И.М. Некоторые свойства пен и водо-воздушных смесей. Нефтепромысловое дело, 1966, № 3.

4. Амиян А.В., Шнирельман А.И. Гидравлический расчет циркуляции пены. – Газовая промышленность, 1978, № 2.

5. Гастерштадт И. Пневматический транспорт. М., ВСНХ, 1927.

6. Гейман М.А., Мусинов В.И. Турбинное бурение на аэрированной промывочной жидкости. М., Недра, 1965.

7. Мурадян И.М. Выбор рационального типа аэратора. – Нефтепромысловое дело, 1966, № 6.

8. Успенский В.А. Пневматический транспорт. Свердловск, Металлургиздат, 1959.

9. Шеберстов Е.В., Леонов Е.Г. Расчет давления в скважине при бурении с применением аэрированных жидкостей. – Нефтяное хозяйство, 1968, № 12.

10. Яковлев А.М., Коваленко В.И., Вартыкян В.Г. и др. Методические рекомендации по бурению скважин на твердые полезные ископаемые с очисткой забоя пеной. М., Геолфонд РСФСР, 1979.