
МЕХАНИКА МАШИН

УДК 622.245.3

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РЕПРЕССИОННО-ВОЛНОВОЙ
КОЛЬМАТАЦИИ ОБРАЗЦОВ ИСКУССТВЕННОЙ ПОРОДЫ**© 2023 г. Л. Е. Украинский¹, И. Г. Устенко¹, Н. А. Шамов^{1,*}¹ *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия***e-mail: shamov.na@meil.ru*

Поступила в редакцию 24.06.2022 г.

После доработки 17.10.2022 г.

Принята к публикации 20.10.2022 г.

На основании результатов экспериментальных наблюдений получены математические модели влияния исследуемых факторов на параметры репрессивно-волновой кольматации. При этом установлены значения исследуемых факторов, при которых глинистые растворы приобретают более высокую устойчивость к седиментации твердой фазы за счет ее попутного диспергирования, что повысило эффективность кольматации поглощающих интервалов в стволе скважины.

Ключевые слова: кавитационно-волновые явления, кавитационно-вихревой излучатель волн, репрессивно-волновая кольматация, многофазная среда, проницаемость породы, фильтрация, седиментация, пластовые поглощения растворов

DOI: 10.31857/S0235711923010121, **EDN:** ARYCJG

Многие виды попутной при бурении скважин кольматации [1] предупреждают нефтегазовые проявления, поглощения буровых и цементных растворов, улучшают их реологические характеристики, способствуют повышению качества цементирования скважин и их вторичного вскрытия. Наиболее эффективным видом кольматации является технология и техника репрессивно-волновой кольматации с сопутствующей активацией буровых растворов, созданная на базе волновой технологии, в частности на основе теории нелинейной волновой механики и технологии многофазных сред [2–5]. В настоящей статье установлены оптимальные значения параметров и характеристик процессов репрессивно-волновой кольматации, обеспечивающие ее высокую эффективность при минимальных затратах.

Цель экспериментальных и промышленных исследований выявление условий, способствующих решению поставленных задач. В том числе, установление влияния на объем фильтрации кольматационного раствора, выделившегося через образец породы за время его кольматации и величину давления начала фильтрации через образец искусственного песчаника, выдерживаемого слоем кольматации, а также степень эффективности кольматации таких факторов, как объемная концентрация твердой фазы раствора, интенсивность расходуемой на кольматацию энергии, перепад статического давления на образце породы, исходная проницаемость образцов, глубина слоя кольматации в образце закольматированной породы. На основании полученных результатов экспериментальных исследований разработать более эффективные виды техники и технологии репрессивно-волновой кольматации для проведения их промышленных исследований и испытаний.

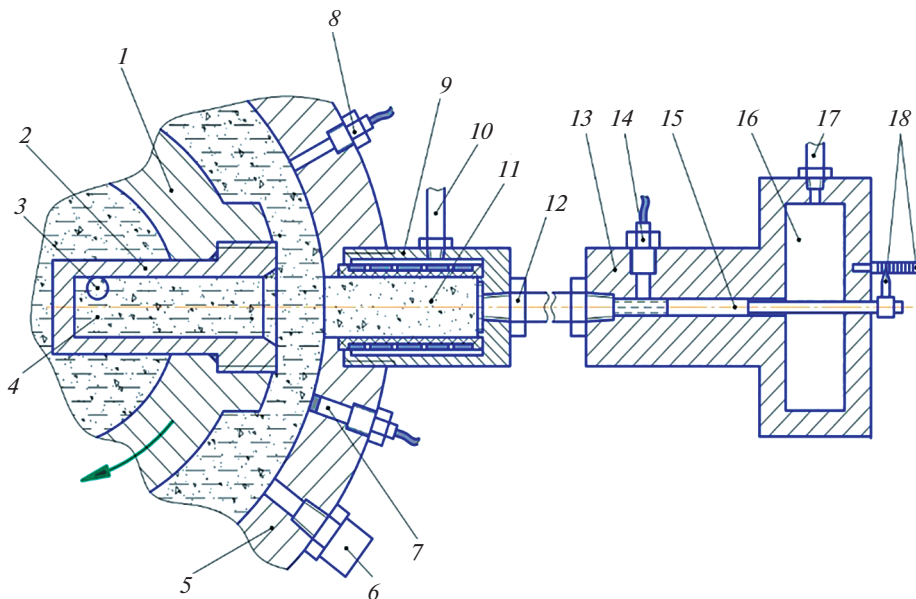


Рис. 1. Схема основной части экспериментальной установки.

Методика проведения экспериментальных исследований.

Исследуемые параметры, показатели, характеристики процессов определялись следующим образом:

- объемная концентрация твердой фазы кольтматационного раствора

$$C_k = \frac{V_g}{V_w + V_g},$$

где V_g – объем твердой фазы раствора; V_w – объем дисперсионной фазы;

- интенсивность расходуемой на кольтматацию энергии

$$I = \frac{\Delta P_u Q}{S_k},$$

где ΔP_u – перепад давления на кавитационно-вихревом излучателе; Q – расход гидро-среды через него; S_k – площадь поверхности волн давления при их взаимодействии с торцом образца породы;

- перепад давления на образце породы ΔP_n вычислялся по разнице показаний регистраторов давления P_s и P_{pk} , датчики которых установлены в корпусах рабочей камеры и узла с пневмокамерой (рис. 1)

$$\Delta P_n = P_s - P_{pk};$$

- объем фильтрата V_f кольтматационного раствора, выделившийся через образец породы за время t_k проведения его кольтматации, определялся в процессе перемещения измерителя по его шкале в узле с пневмокамерой;

- степень эффективности кольтматации

$$\psi_k = \frac{k_0 - k_k}{k_0} \times 100\%,$$

где k_0 , k_k – соответственно исходная и конечная после кольматации проницаемости породы, которые определялись по известной методике и применением стандартного оборудования;

– показатель седиментации растворов

$$S_c = \frac{V_0 - V_p}{V_0} \times 100\%,$$

где V_0 – общий объем налитого в мерный сосуд раствора; V_p – объем раствора ниже уровня расслаивания;

– объем фильтрата V_f кольматационного раствора, выделившийся через образец породы за время t_k , его кольматации, измерялся в процессе перемещения измерителя по его шкале в узле с пневмокамерой;

– глубина слоя кольматации и толщины фильтрационной корки измерялась микроскопом по продольному сколу закольматированного образца пород;

– размеры глинистых частиц в растворе определялись методом Гунье.

Подготовка к исследованиям. Модель скважины, с применением которой осуществлялись экспериментальные исследования процессов репрессионно-волновой кольматации образцов породы, должна быть близка к скважинным условиям по геометрическим и энергетическим параметрам, наиболее важным характеристикам процесса.

Основная часть (рис. 1) установки для проведения запланированных исследований состоит из корпуса 1, содержащего волновой кавитационно-вихревой широкополосный излучатель 2 с входным тангенциальным каналом 3 в вихревую камеру 4, и установленного в рабочей камере 5. В камере размещены гнездо 6, датчик 7 регистратора пульсаций давления, датчик 8 регистратора гидростатического давления P_s в рабочей камере, кернодержатель 9 с пневмопроводом 10 к баллону с азотом, образцом исследуемой породы 11.

Кернодержатель соединяется трубкой 12 с узлом 13 создания перепада давления на образце породы. Указанный узел включает в свой состав датчик 14 регистратора гидростатического давления P_{pk} , плунжер 15, пневмокамеру 16 с трубкой 17 к баллону с азотом, измеритель 18 объема фильтрата, выделившегося через образец в процессе его кольматации.

Корпус навёрнут на вертикальный шпиндель бурового станка и связан нагнетательным трубопроводом с поршневым насосом. Приемная гидравлическая линия насоса соединена с резервуаром, наполненным кольматационным раствором. Резервуар связан с рабочей камерой сливным трубопроводом.

Для получения более однородных по проницаемости и прочности образцов искусственного песчаника была изменена технология прессования. Его стали вести двумя пуансонами с обоих торцов образцов и созданием поперечных ударных волн в корпусе пресс-формы и прессуемой смеси, что позволило создать образцы с однородной проницаемостью по всей их длине. Получение образцов с различной проницаемостью обеспечивалось изменением усилия их прессования. При усилении 55 кН получали низкопроницаемые образцы 0.01–0.2 мкм², 50 кН – среднепроницаемые 0.1–0.8 мкм², 45 кН – высокопроницаемые 0.3–1.8 мкм².

Проведение экспериментальных и промысловых исследований. Часть из приведенных результатов экспериментальных исследований ранее публиковались в работе [6]. В процессе проведенных исследований измерены создаваемые излучателем волновые характеристики в зависимости от изменения интенсивности энергии I , гидростатического давления P_s в рабочей камере и иных параметров (табл. 1).

Таблица 1. Волновые характеристики излучателя

ΔP_c , МПа	Q , м ³ /с	I , МВт/м ²	P_s , МПа	Амплитудные значения давления, КПа в диапазоне частот колебаний, КГц					
				до 0.5	0.5–0.7	0.7–1.0	1.0–2.0	2.0–9.0	9.0–10.0
4.5	0.00210	8.36	0	0.7	10.5	2.6	0.8	0.8	0.8
			1.0	4.5	34.8	1.0	2.6	1.0	1.2
			1.5	3.0	24.8	0.8	0.8	1.6	1.4
			2.0	2.5	22.8	1.5	2.5	0.8	1.2
3.5	0.00185	5.73	1.5	1.2	14.0	1.2	0.8	0.6	0.3
2.5	0.00156	3.45	1.5	1.0	10.0	1.2	0.8	0.4	0.4

Таблица 2. Характеристики излучателя в зависимости от изменения интенсивности энергии и угла его поворота в рабочей камере

I , МВт/м ²	α , град.	Амплитудные значения давления p_{0c} , КПа в диапазоне частот колебаний f , КГц						
		до 0.5	0.5–0.7	0.7–1.0	1.0–2.0	2.0–3.0	3.0–9.0	9.0–10.0
8.36	0	3.0	24.8	0.80	0.80	1.60	0.4–0.8	1.40
	15	1.5	23.0	1.50	2.60	0.70	0.2–0.4	1.10
	35	1.0	6.0	1.40	0.50	0.20	0.01–0.3	0.30
	90	0.6	1.3	0.20	0.60	0.20	0.05–0.4	0.40
	180	0.3	1.0	0.07	0.25	0.20	0.05–0.4	0.60
3.45	0	1.0	10.0	1.20	0.80	0.40	0.01–0.5	0.40
	15	0.6	6.3	0.80	0.15	0.25	0.01–0.3	0.20
	35	0.5	2.8	0.20	0.70	0.20	0.01–0.6	0.12
	90	0.5	2.0	0.25	0.20	0.25	0.01–0.05	0.12

Площадь поверхности волн давления при их взаимодействии с торцом образца породы определялась из выражения

$$S_k = 0.24\pi(2\pi D_{vk}b + D_{vk}^2 + 8b^2),$$

где D_{vk} – диаметр вихревой камеры излучателя колебаний давления; b – расстояние между излучателем и торцом исследуемого образца.

В нашем случае $D_{vk} = 2 \times 10^{-2}$ м; $b = 6 \times 10^{-3}$ м; $S_k = 11 \times 10^{-4}$ м². Далее исследовалась зависимость характеристик излучателя от изменения интенсивности энергии I и угла α его поворота в рабочей камере относительно измерительного датчика (табл. 2).

Наблюдения показали следующее: максимальные амплитуды колебаний давления находятся в диапазоне спектра частот 0.5–0.7 КГц; при повороте излучателя в рабочей камере на 180° относительно датчика измерительная система зафиксировала в интервале частот 0.1–0.7 КГц понижение амплитудных значений давления в 10–25 раз; при предусмотренном плане проведения экспериментов уровне максимальной интенсивности энергии, $I = 8.36$ МВт/м², наибольшие амплитудные значения возникали при статическом давлении P_s в рабочей камере в интервале 1–2 МПа, но уже при давлении 2 МПа начинала проследиваться тенденция к снижению их величин.

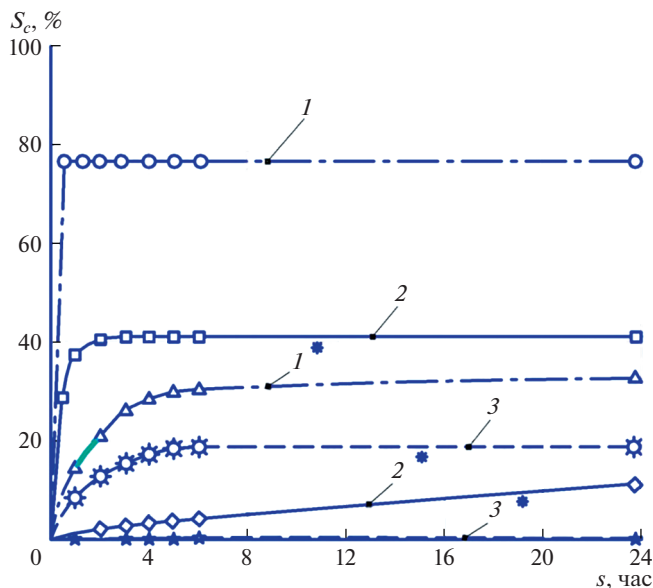


Рис. 2. Кинетика седиментации частиц твердой фазы растворов:

1 – плотностью 1020 кг/м^3 после гидромеханического перемешивания; 1* – плотностью 1020 кг/м^3 после кавитационно-волновой обработки; 2 – плотностью 1070 кг/м^3 после гидромеханического перемешивания; 2* – плотностью 1070 кг/м^3 после кавитационно-волновой обработки; 3 – плотностью 1130 кг/м^3 после гидромеханического перемешивания; 3* – плотностью 1130 кг/м^3 после кавитационно-волновой обработки.

Последнее обстоятельство можно объяснить тем, что генерирующиеся в кавитационно-вихревом излучателе колебания давления за счет пульсаций и схлопывания кавитационных парогазовых каверн носят нелинейный волновой характер [7–9], на который сильно влияет изменение гидростатического давления.

В качестве кольтационной среды использовались растворы куганакской глины различной плотности, у которой существенно ниже гидрофильные свойства, чем у бентонитовой глины. В глинистых растворах в процессе проведения экспериментальных исследований никакие химреагенты не применялись. Этим преднамеренно ухудшались начальные кольтатирующие свойства исследуемых растворов, и подчеркивалось влияние на них продолжительности процесса кавитационно-волновой обработки.

Наблюдения показали, что растворы куганакской глины после попутной обработки при проведении репрессивно-волновой кольтации имеют более высокую устойчивость к седиментации твердой фазы, чем после гидромеханического перемешивания (рис. 2). При этом раствор плотностью 1130 кг/м^3 после кавитационно-вихревого диспергирования твердой фазы принял вид пастообразной массы, которая не изменяла своего состояния даже после трехмесячного отстаивания в резервуаре.

После окончания обработки измерялись объем фильтрата V_f , толщина глинистой корки на торце образца породы и его конечная проницаемость. В необходимых случаях фиксировались продолжительность выделения фильтрата через образец породы и его объемы через определенные промежутки времени. Пределы измерения частиц составили не более 70 мкм . Результаты исследований подвергнутых волновой обработке

Таблица 3. Результаты измерений частиц твердой фазы раствора

Выходной параметр	Вид обработки раствора	Диаметр частиц твердой фазы, мкм							
		≤2	2–4	4–6	6–12	12–33	33–40	40–50	50–70
Доля частиц твердой фазы, %	гидромеханический	4	4	32	16	3	1	2	38
	кавитационно-волновой	4	4	42	18	5	13	6	8

Таблица 4. Результаты кавитационно-волновой обработки растворов

Плотность раствора, кг/м ³	Уменьшение седиментации	Увеличение эффективной вязкости	Повышение СНС _{1/10} , дПа	Снижение фильтратоотдачи	Снижение доли крупных частиц
1020	в 39 раз	в 7.0 раза	0–1/1	в 1.7 раза	в 3 раза
1070	в 15 раз	в 3.6 раза	0–12/15	в 10.0 раза	в 5 раз
1130	в 80 раз	в 2.9 раза	0–50/54	в 10.0 раза	в 5 раз

и гидромеханическому перемешиванию раствора куганакской глины плотностью 1070 кг/м³ приведены в табл. 3.

Исследование размеров частиц методом малоуглового рентгеновского рассеяния (методом Гунье) показало, что диспергирование раствора куганакской глины не внесло существенных изменений в распределение по размерам коллоидных частиц (размером до 2 мкм).

Для осуществления процесса измельчения частиц глины с низкой гидрофильностью до микроскопических размеров требуется более значительная интенсивность энергии. Результаты наблюдений свидетельствуют о том, что в результате кавитационно-волнового диспергирования доля частиц в растворе 4–12 мкм составляла 60%, 50–70 мкм – 8% от общего числа частиц, в то время как после гидромеханического перемешивания она составляла соответственно 48% и 38%, т.е. произошло смещение в распределении частиц по размерам в сторону мелких и средних частиц.

Результаты исследований на экспериментальном стенде влияния попутной кавитационно-волновой обработки растворов куганакской глины на их параметры в процессе кольматации приведены в табл. 4.

Так же отмечалось, что вследствие диспергирования глины и улучшения реологических свойств раствора происходило снижение темпа гидроабразивного износа стальных излучателей в 1.5–2.5 раза.

Например, при бурении стволов скважин под кондуктор в глинистых пропластках на кусте № 8 Маскудьинской площади Чернушинского филиала ЗАО “Лукойл-бурение-Пермь” в 1997 году на технической воде не удавалось осуществить попутную наработку твердой фазы и получить устойчивую суспензию без добавок каких-либо химреагентов. Глинистая фракция почти полностью выпадала в осадок в наземной циркуляционной системе. Водная среда отфильтровывалась в проницаемых пропластках и временами полностью поглощалась с прекращением циркуляции. Только при использовании в роторной бурильной компоновке кавитационно-волновых наддолотных кольмататоров, разработанных нами на основе достижений нелинейной волновой механики и технологии удалось создать устойчивую суспензию из глины разбураиваемых пропластков, осуществить кольматацию поглощающих пластов и добурить скважины.

Таблица 5. Результаты наблюдений за процессом изменений параметров буровой жидкости в процессе волновой кольматации

Скважины	Плотность раствора, кг/м ³		Условная вязкость, с		Фильтратоотдача, см ³ /30	
	в начале	в конце	в начале	в конце	в начале	в конце
467	1020	1080	15	16	12	8.0
471	1140	1160	16	18	12	9.0
491	1030	1140	15	16	12	6.0

Влияние кавитационно-волнового диспергирования глинистой фазы на характеристики буровой жидкости приведено в табл. 5.

Вследствие непродолжительности бурения стволов под кондуктор с применением кольматоров изменения реологических свойств растворов оказались менее впечатляющими, но вполне приемлемыми с практической точки зрения.

При проведении исследований на стенде с целью установления факта фильтрации через цилиндрический образец искусственной породы при отсутствии перепада давления (репрессии) на нем второй торец кернодержателя 18 (рис. 1) гидравлически соединялся с гнездом 6 рабочей камеры 5 трубкой, в которой была горизонтально вмонтирована мерная стеклянная трубочка. Перед началом эксперимента трубка с мерной трубочкой заполнялась жидкостью таким образом, чтобы в трубочке остался небольшой пузырек воздуха. По перемещению этого пузырька при волновой кольматации породы можно было судить о наличии или отсутствии фильтрации через образец при отсутствии перепада давления.

Хотя степень кольматации образцов породы в таких условиях была иногда довольно заметной (22–99%), но визуальное наблюдение за положением пузырька в трубке свидетельствовало об отсутствии фильтрации через образец породы. Можно сделать предположение, что даже при отсутствии репрессии на образец породы происходит перемещение в жидкости частиц глины в поровые каналы породы и образование в них кольматационных пробок. Такое перемещение частиц можно объяснить нелинейными волновыми явлениями и кавитационными процессами, проходящими вблизи кольматируемой поверхности образца породы.

Для образцов проницаемостью $k_0 = 0.931–0.993$ мкм² при $C_k = 4.7\%$ ($\rho = 1070$ кг/м³), $I = 3.45$ МВт/м², $\Delta P_n = 1.5$ МПа, продолжительность процесса волновой кольматации составляла 5–8 с.

Кольматация образцов проницаемостью $k_0 = 0.309–0.569$ мкм² при $C_k = 8.7\%$ ($\rho = 1130$ кг/м³), $I = 5.73$ МВт/м², $\Delta P_n = 1.5$ МПа продолжалась уже 32–37 с.

Результаты наблюдений приведены в табл. 6, где V_f – объем фильтрата кольматационного раствора, выделившийся через образец породы за время его кольматации. Из таблицы следует, что наиболее заметно фильтрация снижалась (до 40–90%), а кольматация интенсивно протекала в первые 2–3 с, с ростом объемной концентрации кольматанта в растворе свыше 5% увеличивалась продолжительность процесса кольматации, а его интенсивность замедлялась.

Обработка результатов проводилась по стандартной программе корреляционно-регрессионного анализа, выполнен расчет коэффициентов приведенных ниже уравнений, установлена значимость коэффициентов и адекватность моделей. При описании такого выходного параметра, как степень кольматации, была выбрана следующая ма-

Таблица 6. Изменение продолжительности волновой кольматации интенсивности фильтрации

$C_k, \%$	$I, \text{МВт/м}^2$	$\Delta P_n, \text{МПа}$	$k_0, \text{мкм}^2$	$\Psi_k, \%$	$V_f, \text{мл}$	Объемы фильтрата, мл			$t_k, \text{с}$
						за 1-ю с, V_{f1}	за 2-ю с, V_{f2}	за 3-ю с, V_{f3}	
4.7	3.45	1.5	0.960	99.8	6.8	2.8	2.5	0.5	6
			0.931	99.8	7.0	4.0	1.8	1.0	8
			0.993	99.9	8.0	3.0	2.0	0.8	6
			0.939	98.8	9.0	2.0	1.2	0.8	7
8.7	5.73	1.5	0.524	91.0	8.8	1.4	2.0	1.2	35
			0.515	91.0	5.0	0.8	0.6	0.4	37
			0.309	97.0	6.0	1.0	0.6	0.5	37
			0.560	88.0	5.5	1.4	0.9	0.5	32

тематическая модель с 82%-й долей объясненной вариации (коэффициент корреляции 0.90)

$$\Psi_k = 49.1 + 10.33C_k + 9.78I + 62.88\Delta P_n - 45.53k_0 - 1.2C_k^2 - 1.07I^2 - 30.21\Delta P_n^2 + 25.42k_0^2.$$

Другой выходной параметр, объем выделившегося в процессе кольматации фильтрата, описывался с 88%-й долей объясненной вариации (коэффициент корреляции 0.93) следующим уравнением:

$$V_f = -21 - 0.71C_k + 8.2I + 54\Delta P_n + k_0 - 0.069I^2 - 33.2\Delta P_n^2 + 4.6k_0^2.$$

Третий выходной параметр, давление начала фильтрации через закольматированный образец породы P_{nv} , описывался с 82%-й долей объясненной вариации (коэффициент корреляции 0.90) уравнением

$$P_{nv} = 3.97 + 0.13C_k - 0.89I + 1.98\Delta P_n - 4.93k_0 - 0.017C_k^2 + 0.068I^2 - 0.91\Delta P_n^2 + 3.66k_0^2.$$

Полученные формулы использовались для построения кривых зависимостей (рис. 3–6) степени кольматации и объема выделившегося фильтрата от объемной концентрации твердой фазы (при $I = 8 \text{ МВт/м}^2$, $\Delta P_n = 0.8 \text{ МПа}$, $k_0 = 0.2 \text{ мкм}^2$), интенсивности расходуемой на кольматацию энергии (при $C_k = 7.8\%$, $\Delta P_n = 0.8 \text{ МПа}$, $k_0 = 0.2 \text{ мкм}^2$), статического перепада давления на образце (при $C_k = 7.8\%$, $I = 6 \text{ МВт/м}^2$, $k_0 = 0.2 \text{ мкм}^2$), исходной проницаемости (при $C_k = 7.8\%$, $I = 6.7 \text{ МВт/м}^2$, $\Delta P_n = 0.8 \text{ МПа}$).

С ростом объемной концентрации твердой фазы в растворе свыше 5–6% степень кольматации, объем выделившегося фильтрата и величина давления начала фильтрации постепенно снижались (рис. 3).

Объясняется это тем, что при высокой концентрации частиц глины у поверхности кольматируемой породы и на входе в поровые каналы образовывалась структурированная гелеобразная масса, препятствовавшая проникновению в поровое пространство частиц кольматанта. При увеличении интенсивности энергии воздействия на образец породы и кольматационный раствор до 5–6 МВт/м² степень кольматации и объем фильтрата возрастали, а величина давления начала фильтрации наоборот снижалась. Возможно, такая ситуация связана с тем, что наряду с закупориванием

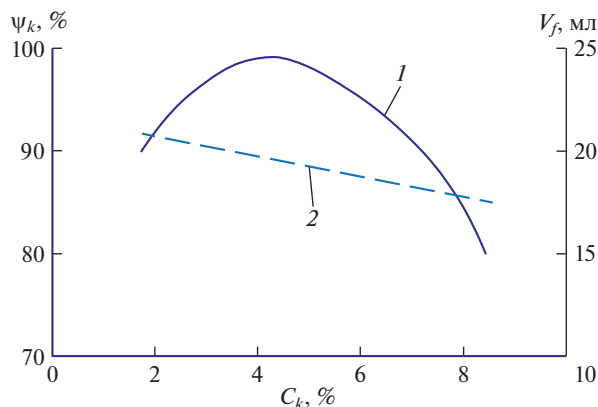


Рис. 3. Зависимость степени коагуляции и объема фильтрата от концентрации твердой фазы: $1 - \psi_k = 77 + 10.33C_k - 1.2C_k^2$; $2 - V_f = 23 - 0.71C_k$.

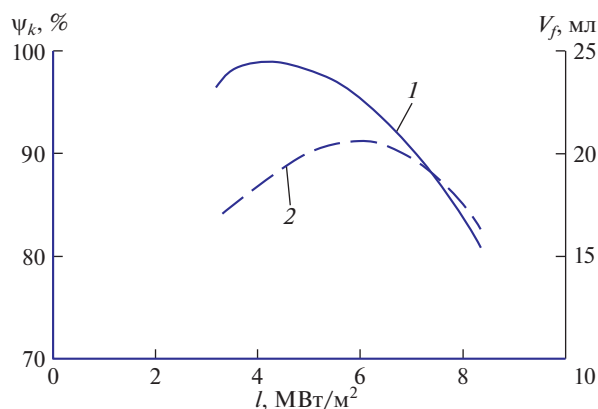


Рис. 4. Зависимость степени волновой коагуляции и объема фильтрата от интенсивности расходуемой энергии: $1 - \psi_k = 75 + 9.78I - 1.07I^2$; $2 - V_f = 4 + 8.2I - 0.69I^2$.

средних и крупных каналов происходила коагуляция и более мелких за счет усиления диспергирования частиц глины в предзоне коагуляции, интенсивнее разрушалась глинистая корка на поверхности образца.

Понижение же величины давления начала фильтрации может быть обусловлено ростом доли образующихся в средних и крупных каналах структурированных гелеобразных, но слабо упакованных тромбов, которые под действием давления способны разрушаться.

Дальнейший рост интенсивности энергии приводил к постепенному снижению степени коагуляции (рис. 4), объема выделившегося через образец породы фильтрата и некоторому увеличению давления начала фильтрации, что можно объяснить дальнейшим диспергированием твердой фазы и ростом поверхностной энергии частиц. Вследствие этого, у поверхности породы и на входе в поровые каналы формиро-

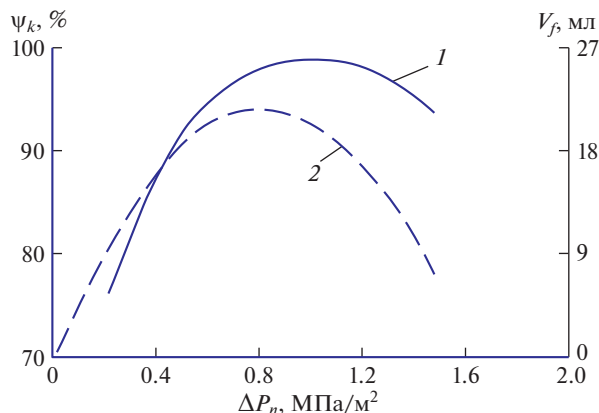


Рис. 5. Зависимость степени кольтатации и объема фильтрата от перепада давления на образце породы: 1 – $\psi_k = 6 + 62.88\Delta P_n - 1.07\Delta P_n^2$; 2 – $V_f = 54\Delta P_n - 33.2\Delta P_n^2$.

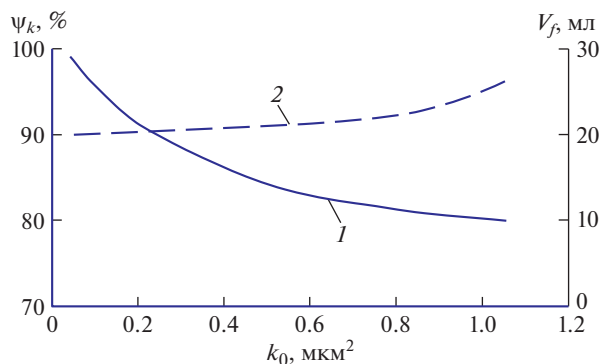


Рис. 6. Зависимость степени волновой кольтатации и объема фильтрата от исходной проницаемости образца породы: 1 – $\psi_k = 100 - 45.43k_0 + 25.42k_0^2$; 2 – $V_f = 20 + k_0 + 4.6k_0^2$.

вались сильно структурированные гелеобразные сгустки частиц глины, препятствующие проникновению в поровое пространство фильтрата и частиц кольтатанта, поэтому часть поровых каналов могли оказаться слабо закольтатированными. В остальных же каналах под уплотняющим воздействием колебаний давления образовывались плотно упакованные пробки кольтатанта, выдерживающие более значительные давления начала фильтрации.

С ростом перепада статического давления (рис. 5) на образцах породы до 0.8–1.0 МПа значения всех трех исследуемых параметров кольтатации количественно также возрастали, а при дальнейшем увеличении перепада давления начинали снижаться. Последнее происходило, скорее всего, вследствие прижимающего действия давления на образующиеся на поверхности торца образца фрагменты плотной непроницаемой корки, ухудшающей условия кольтатации.

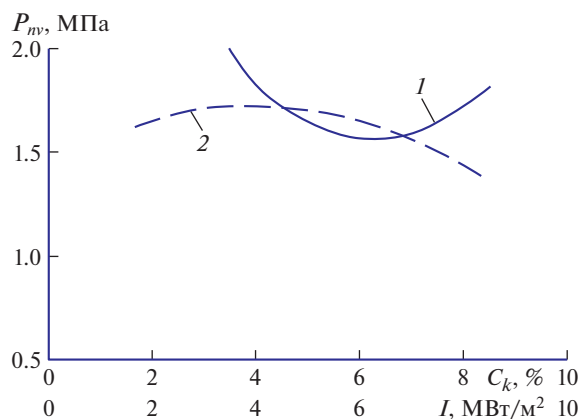


Рис. 7. Зависимость величины давления начала фильтрации от концентрации кольматанта и интенсивности энергии: $1 - P_{nv} = 145 + 0.13C_k - 0.017C_k^2$; $2 - P_{nv} = 4.43 - 0.89I - 0.068I^2$.

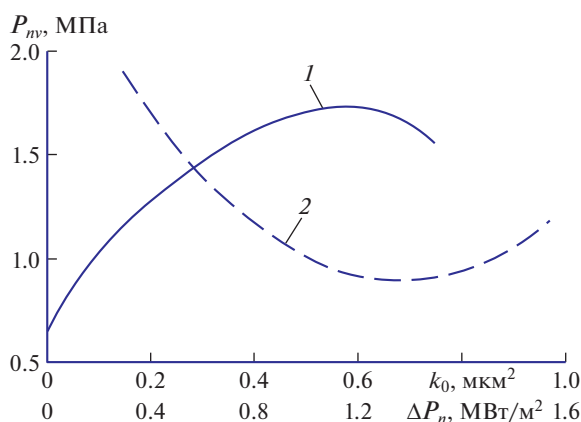


Рис. 8. Зависимость величины давления начала фильтрации от перепада давления и исходной проницаемости образца: $1 - P_{nv} = 2.67 - 4.56k_0 + 3.24k_0^2$; $2 - P_{nv} = 0.62 + 1.98\Delta P_n - 0.91\Delta P_n^2$.

С ростом исходной проницаемости исследуемых образцов породы степень кольматации снижалась, а объем фильтрации увеличивался.

Более сложный характер у кривой зависимости давления начала фильтрации. На рис. 7 приведены кривые зависимости величины давления начала фильтрации: 1) от концентрации кольматанта в растворе при постоянных значениях $I = 4.6 \text{ МВт/м}^2$, $\Delta P_n = 1.2 \text{ МПа}$, $k_0 = 0.2 \text{ мкм}^2$; 2) от интенсивности расходуемой на кольматацию энергии при $C_k = 7.8\%$, $\Delta P_n = 0.8 \text{ МПа}$, $k_0 = 0.2 \text{ мкм}^2$.

До проницаемости $0.6\text{--}0.7 \text{ мкм}^2$ происходило снижение давления, а в дальнейшем — плавное увеличение, что можно объяснить возрастанием доли крупных каналов в образцах породы, пространственные условия для переупаковки частиц в кото-

рых, в процессе уплотняющего действия колебаний давления более благоприятны, чем в мелких. Вследствие этого формировался более прочный слой кольматации.

На объем отфильтрованной при кольматации жидкости наибольшее влияние имели интенсивность энергии и статический перепад давления на образце.

На рис. 8 изображены кривые зависимости величины давления начала фильтрации через закольматированный образец породы: 1) от перепада статического давления на нем при постоянных значениях $C_k = 7.8\%$, $I = 6$ МВт/м², $k_0 = 0.2$ мкм²; 2) от исходной проницаемости при $C_k = 7.8\%$, $I = 6.7$ МВт/м², $\Delta P_n = 0.8$ МПа.

На величину давления начала фильтрации через закольматированный образец наибольшее действие оказывало значение объемной концентрации твердой фазы глинистого раствора.

Выводы и рекомендации. 1. С точки зрения интенсификации процесса репрессивно-волновой кольматации образцов искусственного песчаника длиной 58 мм наиболее эффективными значениями исследуемых факторов являются: объемной концентрации твердой фазы раствора 3.5–5.5%; расходуемой на кольматацию энергии 4–6 МВт/м²; статического перепада давления на образцах 1.0–1.3 МПа. **2.** Глубина кольматационного слоя в высокопроницаемых песчаниках (0.9–1.7 мкм²) составляла 1.5–5.0 мм, а фильтрационная корка практически отсутствовала. **3.** С ростом концентрации твердой фазы в растворе свыше 5% продолжительность волновой кольматации увеличивается с 5–8 до 32–37 с при 8.6%-й концентрации. **4.** Даже в отсутствие репрессии на образец породы вследствие нелинейных волновых процессов происходит перемещение частиц глины в поровые каналы породы и образование в них пробок кольматанта. **5.** На основании полученных результатов исследований предлагается: проводить кавитационно-волновую обработку при приготовлении глинистых растворов с концентрацией твердой фазы в пределах 3.5–5.5%; создавать в процессе бурения перепад давления на кольмататоре 3.5–4.0 МПа при расходе 0.005–0.006 м³. **6.** Определено, что использование попутной с кольматацией кавитационно-волнового диспергирования твердой фазы, а также в технологии приготовления буровых глинистых растворов позволит: интенсифицировать процесс создания слоя кольматации в породе, повысить его прочность к изменениям давления в 2.0–2.5 раза, повысить степень кольматации с 88% до 98% и снизить объем фильтрата в 2–3 раза; улучшить антифрикционные свойства растворов и уменьшить абразивный износ оборудования в 1.5–2.5 раза; создать надежные, эффективные виды технологий и оборудования, более безопасные, особенно в условиях создания мощных нелинейных резонансов [10] в нагнетательных и добывающих скважинах.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мавлютов М.Р., Кузнецов Ю.С., Агзамов Ф.А. и др. Экспериментальные исследования влияния вибровоздействия на фильтрационную корку и проницаемость фильтров // Технология бурения нефтяных и газовых скважин: Межвуз. темат. сб. научн. тр. Уфа: Уфим. нефт. ин-т, 1976. С. 126.
2. Веденин А.Д., Кормилицын В.И., Ганиев О.Р., Ганиев С.Р. и др. Волновые технологии и машины (Волновые явления в технологиях) / Под редакцией академика Р.Ф. Ганиева. М: R&C Dynamics. 2008. 66 с.
3. Ганиев Р.Ф. Волновые машины и технологии (Введение в волновую технологию). М.: R&C Dynamics. 2008. 192 с.

4. *Ганиев Р.Ф., Ганиев С.Р., Касилов В.П., Пустовгар А.П.* Волновые технологии в инновационном машиностроении. М.: R&C Dynamics. 2012. 92 с.
5. *Ganiev R.F., Ganiev S.R., Kasilov V.P., Pustovgar A.P.* Wave technology in mechanical engineering. Co-published by John Wiley & Sons Inc. Hoboken, New Jersey, and Scrivener Publishing LLC Salem Massachusetts. USA. Published simultaneously in Canada. 2015. 156 p.
6. *Шамов Н.А.* Экспериментальные исследования процессов волновой кольматации проницаемой породы // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2014. № 1. С. 5.
7. *Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф.* М.: Мир, 1974. 687 с.
8. Ультразвук: Маленькая энциклопедия / Под ред. И.П. Галяминой. М.: Советская энциклопедия. 1979. 400 с.
9. *Круглицкий Н.Н., Ничипуренко С.П., Симунов В.В., Минченко В.В.* Ультразвуковая обработка дисперсий глинистых минералов / Под ред. Н.Н. Круглицкого. Киев: Наукова думка, 1971.
10. *Ганиев Р.Ф.* Нелинейные резонансы и катастрофы. Надежность, безопасность и бесшумность. М.: Институт компьютерных исследований; R&C Dynamics. 2013. 592 с.