

УДК 622.276.6:622.031

А.Ф. Соколов

Принципы физического моделирования гидродинамических процессов в пласте-приемнике жидких производственных отходов на примере Заполярного НГКМ и Касимовского ПХГ

При организации полигона захоронения жидких производственных отходов основного производства или подземного хранилища газа (ПХГ) выбор водоносного пласта в качестве приемника отходов необходимо проводить с соблюдением целого ряда условий:

- пласт должен быть надежно изолирован от других пластов, подземные воды которых используются или предполагается использовать в народном хозяйстве;
- пласт должен обладать высокими фильтрационно-емкостными свойствами, обеспечивающими требуемую приемистость;
- размеры пласта должны позволять принять суммарный накопленный объем жидких производственных отходов за весь период эксплуатации полигона (например, за 20–30 лет).

В связи с этим необходимо уметь производить оценку потенциального объема пласта и ареала распространения жидких производственных отходов.

На практике выбор пласта как приемника жидких производственных отходов осуществляется по результатам геофизических и гидрогеологических исследований разведочных скважин в интервале залегания пласта-приемника. Лабораторные исследования сводятся в основном к анализу подземных вод и закачиваемых жидкостей, водорастворенных газов, керна. При этом определяется совместимость жидких производственных отходов с подземными водами в поверхностных условиях. Экспериментальные исследования, которые позволили бы прогнозировать изменение гидродинамических свойств пласта, не проводятся. Полигон по захоронению жидких производственных отходов нельзя проектировать на современном уровне без проведения предварительных экспериментов по фильтрации жидких производственных отходов в условиях пласта-приемника. Особенно важно располагать результатами таких исследований, если в породах пласта содержатся глинистые минералы, а в составе жидких производственных отходов – примеси углеводородов.

Исследования были выполнены применительно к двум типичным действующим полигонам: на Касимовском ПХГ и Заполярном нефтегазоконденсатном месторождении (НГКМ).

До начала эксплуатации полигона по захоронению жидких производственных отходов поровое пространство водоносного пласта-приемника заполнено пластовой водой. В большинстве случаев эта вода представляет собой раствор NaCl и других солей, содержание которых зависит от особенностей генезиса водонапорного бассейна в данном регионе. Минерализация пластовой воды в пласте-приемнике полигона Касимовского ПХГ составляет 150 г/дм³, тогда как полигона Заполярного НГКМ – всего 16–18 г/дм³. Закачиваемые жидкие производственные отходы на обоих полигонах имеют минерализацию меньшую, чем вода принимающего пласта, поскольку в состав жидких производственных отходов входят, как правило, пресные талая и дождевая вода, а также хозяйственно-бытовые стоки.

Таким образом, одним из характерных процессов в пласте-приемнике стоков является вытеснение пластовой воды менее минерализованной – наиболее типичной, закачиваемой в пласт жидкой смесью. Процесс вытеснения сопровождается замеще-

Ключевые слова:
физическое моделирование, жидкие производственные отходы, критерии подобия, совместимость, коагуляция, набухание глинистых минералов, катионный обмен.

Keywords:
physical modelling, liquid industrial waste, similarity criteria, compatibility, mudding, swelling of clay minerals, cation exchange.

нием в порах пласта одного водного раствора другим, а также молекулярной и конвективной взаимной диффузией компонентов растворов на их контакте.

Наличие или отсутствие углеводородных примесей в жидких производственных отходах зависит от качества подготовки стоков перед закачкой в пласт-приемник, при этом немаловажное значение имеет, однофазные или двухфазные растворы представляют собой данные отходы.

Если в закачиваемой жидкости отсутствуют углеводородные примеси или их количество относительно мало, то вытеснение пластовой воды закачиваемой жидкостью будет представлять процесс смешивающегося вытеснения, когда на фронте вытеснения отсутствует межфазная граница раздела. Особенности смешивающегося вытеснения одной жидкости другой изучены в нефтедобывающей промышленности в связи с применением способа разработки продуктивного пласта в режиме вытеснения нефти растворителями [1]. Для контроля за процессом смешивающегося вытеснения в лаборатории используют такие параметры, как допоровый коэффициент вытеснения, полный коэффициент вытеснения, длина зоны смеси как функция пройденного расстояния и некоторые другие. В промысловых условиях, кроме того, используют еще один важнейший параметр – коэффициент охвата пласта нагнетаемым агентом. Важнейший вывод по результатам выполненных экспериментов [1] заключается в следующем: при смешивающемся вытеснении скорость фильтрации практически не влияет на результаты процесса (т.е. величины перечисленных выше параметров). Это позволяет проводить физическое моделирование процессов вытеснения в любом удобном для экспериментаторов скоростном режиме.

Различия в минерализации вытесняемой и вытесняющей вод дают возможность контролировать динамику процесса по изменению содержания в «продукции» модели пласта, например иона хлора, изменению общей минерализации жидкости или катион-анионного баланса.

Полученные в ходе физического моделирования данные о величинах коэффициентов вытеснения и длине зоны смеси необходимы для оценки размеров зоны распространения закачанной жидкости в пласте-приемнике [2]. Следует иметь в виду, что достоверными, при-

годными для практического использования являются результаты, полученные в виде зависимостей величин параметров от пройденного фронтом вытеснения расстояния. Это обеспечивается, если длины нескольких используемых моделей пласта оказываются не меньшими, чем длина зоны смеси. Поскольку заранее эти соотношения неизвестны, необходимо для экспериментальных исследований подготовить не менее 3–5 моделей пласта с существенно разными длинами.

На практике иногда в пласт-приемник закачивают жидкие производственные отходы, содержащие намного больше углеводородных примесей, чем это допускается по регламенту [3]. Поэтому целесообразно еще на этапе проектирования полигона и, очевидно, совершенно необходимо на этапе эксплуатации объекта располагать информацией о последствиях поступления в водоносный пласт углеводородных жидкостей.

Вода и углеводородные жидкости практически нерастворимы друг в друге. При поступлении в пласт двухфазной водоуглеводородной смеси в нем реализуются два этапа: вытеснение одной фазы двухфазной смесью (на фронте вытеснения) и фильтрация двух не смешивающихся друг с другом фаз (за фронтом вытеснения). Первый этап – вытеснение пластовой воды двухфазной смесью – включает два взаимосвязанных процесса, а именно смешивающегося вытеснения пластовой воды водным компонентом жидких производственных отходов и вытеснения смеси этих водных растворов углеводородной жидкостью. В этот допоровый этап скорость фильтрации углеводорода будет отставать от скорости фильтрации воды как в случае смачивающего, так и несмачивающего стенки пор углеводорода. Смачивающий углеводород будет удерживаться пористой средой и появится на выходе модели пласта только после того, как количество этой жидкости в поровом пространстве превысит порог гидродинамической подвижности («критическую» насыщенность). Несмачивающий углеводород в своем движении будет отставать от воды вследствие проявления эффекта Жамена. Таким образом, появление на выходе модели пласта углеводородной жидкости произойдет в любом случае позднее, чем водного компонента жидких производственных отходов.

К началу второго, двухфазного этапа фильтрации водоуглеводородной смеси в модели

пласта устанавливается «критическая» насыщенность порового пространства смачивающим углеводородом, однако дальнейшего накопления последним не происходит, и составы как фильтрующейся смеси, так и «продукции» модели пласта приближаются к составу подаваемой смеси. Если углеводород не смачивает стенки пор, то к началу второго этапа фильтрации в модели пласта практически отсутствует неподвижная часть углеводорода, но имеется неподвижная («связанная») вода, поскольку стенки пор остаются гидрофильными и порода удерживает в данном случае часть воды. Следует отметить, что и при фильтрации смеси со смачивающим углеводородом пористая среда наряду со «связанным» углеводородом удерживает часть воды, но насыщенность «связанной» водой в данном случае меньше, поскольку значительная доля поверхности пор гидрофобизована углеводородом.

На практике содержание углеводородов в жидких производственных отходах порядка 10 %, очевидно, является редким исключением, поскольку количество примеси углеводородов в жидких производственных отходах регламентировано и обычно незначительно. Поэтому, например, оценка коэффициента вытеснения пластовой воды углеводородом для полигона захоронения жидких производственных отходов не может быть актуальной задачей. В то же время весьма актуальна оценка снижения приемистости нагнетательных скважин при закачке стоков, содержащих даже малые количества углеводородов. Дело в том, что через призабойные зоны при закачке проходят огромные объемы жидкости, если их исчислять в объемах пор призабойной зоны. Поэтому даже небольшие концентрации углеводорода в жидких производственных отходах могут вызывать значительные снижения приемистости вследствие удержания углеводорода пористой средой в непосредственной близости от забоя скважины. Таким образом, актуальной оказывается задача определения в динамике относительных фазовых проницаемостей (ОФП) призабойной зоны пласта для водного компонента жидких производственных отходов и углеводородной примеси.

При измерении ОФП, как известно, наиболее точные результаты получают, если используют образцы пористой среды, длина которых существенно превышает расстояние, где наблюдаются концевые эффекты [4–7]. Поэтому

измерения ОФП на образцах длиной не менее 300 мм можно считать достаточно точными: влияние концевых эффектов в этих случаях внесет погрешность в результаты менее 2–3 % [8].

Если использовать образцы пород (модели пласта) указанных размеров (длины), то достоверность полученных величин ОФП будет определяться только соответствием образцов пористой среды, флюидов и термобарических условий экспериментов натуре (пласту-приемнику стоков).

Приблизительно такие же требования к размерам образца породы (модели пласта), очевидно, следует предъявлять при изучении процессов катионного обмена в пористой среде, когда объектом исследования служит действующий пласт-приемник жидких производственных отходов.

На основании вышеизложенного можно перечислить основные гидродинамические и физико-химические процессы, протекающие в пласте-приемнике при закачке в него жидких производственных отходов:

- вытеснение пластовой воды жидкими производственными отходами состава, отвечающего регламентным нормам, а также жидкими производственными отходами, содержащими углеводородные примеси в количествах, существенно превышающих регламентные нормы (при закачке водоуглеводородной смеси);
- двухфазная фильтрация водоуглеводородной смеси;
- набухание глинистых компонентов породы пласта-приемника;
- удержание углеводородной жидкости породой в призабойной зоне нагнетательной скважины;
- катионный обмен в системе «порода пласта-приемника – пластовая вода – жидкие производственные отходы».

Это дает возможность наметить, какого рода эксперименты необходимо проводить для получения результатов, характеризующих процесс либо только с качественной стороны, либо достаточно точно количественно (табл. 1).

Очевидно, наиболее достоверную информацию об исследуемом процессе можно получить, если сочетать натурный эксперимент и моделирование. В натурном эксперименте все свойства образца породы и флюидов, а также термобарические условия лабораторного эксперимента точно соответствуют пластовым.

Таблица 1

Требования к размерам (длине) образцов пород и моделей пласта при изучении процессов в пласте-приемнике жидких производственных отходов

№ п/п	Процесс	Цель эксперимента – получение результатов		Необходимая длина образца породы (модели пласта), мм	Тип эксперимента
		качественных	количественных		
1	Вытеснение пластовой воды жидкими производственными отходами нормированного состава и жидкими производственными отходами со значительной примесью углеводородной жидкости	x		≥ 300	Натурный
			x	Определяется критериями подобия	Моделирование
2	Удерживание угле-водородной жидкой примеси породой	x		≥ 300	Натурный
			x	Определяется критериями подобия	Моделирование
3	Двухфазная фильтрация водоуглеводородной смеси	x		≥ 300	Натурный
			x	≥ 300	Моделирование
4	Набухание глинистых компонентов породы	x		≥ 300	Натурный
			x	≥ 300	Моделирование
5	Катионный обмен в пласте	x		≥ 300	Натурный
			x	Определяется критериями подобия	Моделирование

Отличие заключается в том, что в лаборатории исследуется только фрагмент натурального пласта-приемника. Поэтому результаты эксперимента будут точно такими же, как в натурном пласте, если они не зависят от длины фильтрационного канала, и будут отличаться, если на них влияет эта длина. Минимальная длина образца породы, которую необходимо соблюдать в лаборатории, чтобы результаты эксперимента соответствовали получаемым на натурном объекте, определяется критериями подобия.

От длины фильтрационного канала практически не зависят такие параметры, как абсолютная проницаемость, относительная (фазовая) проницаемость (ОФП) образца породы, если она существенно больше, чем расстояние, на котором проявляются концевые эффекты, набухание глин. Все остальные параметры, характеризующие гидродинамические и в определенной степени физико-химические процессы (например, катионный обмен), зависят от длины фильтрационного канала, и количественное их определение должно производиться путем физического моделирования процесса.

Следует отметить, что с целью отработки методики экспериментальных исследований часть экспериментов можно выполнять на образцах любой удобной длины (или любых имеющихся).

Согласно данным [1], результаты смешивающегося вытеснения (а вытеснение жидкими производственными отходами нормированного состава пластовой воды, по существу, является таким процессом) слабо зависят от скорости вытеснения: при изменении скорости в 4 раза длина зоны смеси изменяется всего на 5 %. Поэтому в экспериментах в целях изучения закономерностей образования зоны смеси и оценки коэффициентов вытеснения можно поддерживать в принципе любые удобные скорости. Иными словами, при моделировании вытеснения пластовой воды жидкими производственными отходами комплекс

$$\pi_v = \frac{v \cdot \mu \cdot L}{kP}$$

является критерием, выдерживать который необходимо, а это важно, поскольку он позволяет проводить эксперименты, относящиеся как к ближней зоне (зоне непосредственного поступления жидких производственных отходов в пласт-приемник), так и к дальней, с одинаковыми удобными скоростями. Большим преимуществом такого упрощения условий экспериментов является возможность сравнивать результаты опытов даже в тех случаях, когда скорости фильтрации не одинаковы.

Анализируя условия функционирования полигона по захоронению жидких производственных отходов на Касимовском ПХГ, следует отметить, что в настоящее время фронт жидких производственных отходов продвигается по пласту, в среднем, с линейной скоростью 2,5 м/год или около 0,7 см/сут. Для экспериментов такая относительно низкая скорость неудобна, поскольку даже на коротких моделях пласта опыты будут занимать значительное количество времени (так, при использовании даже «короткой» модели длиной 0,153 м один объем жидкости пор может быть прокачан за 22 суток). Принимая во внимание приведенную выше информацию о независимости результатов смешивающегося вытеснения от скорости фильтрации, в экспериментах можно поддерживать более высокие скорости.

Хотя при смешивающемся вытеснении скорость фильтрации слабо влияет на коэффициенты вытеснения и длину зоны смеси, однако при вытеснении пластовой воды менее минерализованными жидкими производственными отходами в условиях пласта, содержащего глинистые минералы типа гидрослюд и монтмориллонитов, очевидно, будет происходить более или менее значительное набухание глин и изменение приемистости пласта. Поэтому для получения в экспериментах результатов, которые можно было бы переносить на пласт, при моделировании процессов вытеснения необходимо соблюдение ряда условий:

- в экспериментах необходимо использовать либо пробы натуральных флюидов (пластовой воды, жидких производственных отходов), либо близкие к ним по составу модели;
- модели пласта необходимо готовить с использованием образцов натуральных пород (керна), поскольку смоделировать породу по минералогическому составу и смачиваемости практически невозможно;
- термобарические условия в модельном пласте должны быть близки к условиям натурального пласта, поскольку они влияют на характер взаимодействия твердой фазы (это особенно важно для глинистых включений) и жидких производственных отходов;
- должны быть учтены такие параметры натурального пласта и слагающей его породы, как размер пор (или абсолютная проницаемость), а также характерный размер представительно-го участка пласта.

Исходя из перечисленных условий, при моделировании процесса вытеснения пластовой воды жидкими производственными отходами необходимо соблюдение следующих безразмерных параметров:

$$\pi_{\mu} = \frac{k\Delta P}{\mu D_0};$$

$$\pi_D = \frac{\tau D_0}{L^2};$$

$$\pi_k = \frac{L}{\sqrt{k}},$$

где k – абсолютная проницаемость пористой среды; $\bar{\mu}$ – средняя вязкость фильтрующегося флюида; D_0 – коэффициент молекулярной диффузии характерного компонента флюида, влияющего на взаимодействие флюида с глинами; L – характерная длина участка пласта или модели; ΔP – перепад давления на характерной длине; τ – характерное время.

Равенство π_{μ} и π_D для природы и модели обеспечивает идентичность процессов вытеснения и взаимодействия флюидов с глинистыми включениями на молекулярном уровне, а равенство параметра π_k – идентичность протекания процесса вытеснения в гидродинамических критериях.

Поскольку по вязкости пластовая вода и жидкие производственные стоки отличаются не намного, возможно в качестве величины $\bar{\mu}$ использовать среднее значение вязкости (сумма вязкостей вытесняемого и вытесняющего флюидов делится на два). В качестве характерной длины для натурального пласта возможно брать расстояние 30–50 м, после прохождения которого происходит стабилизация размера (длины) зоны смеси в случаях, когда вытеснение является смешивающимся. Для модели пласта характерная длина – длина модели, характерное время – время прохождения фронтом флюида характерной длины.

Как известно, при моделировании более сложных процессов, например вытеснения нефти водой, требуется соблюдение значительно большего количества критериев подобия. В данном случае – смешивающегося вытеснения одного водного раствора (пластовой воды) другим (жидкими производственными отходами) – достаточно выдерживать равенство трех приведенных выше критериев (параметров).

Таблица 2

Основные безразмерные параметры, применяемые при моделировании процесса вытеснения пластовой воды жидкими производственными отходами (применительно к полигонам Касимовского ПХГ и Заполярного НГКМ)

№ п/п	Критерии (параметры)	Размерность	Величина	
			натура	модель
1	k	10^{-15} м^2	10÷1520	9÷520
2	Жидкие производственные отходы, μ_1	мПа·с	1÷1,5	1÷1,5
3	Пластовая вода, μ_2	мПа·с	1,1÷1,5	1,1÷1,5
4	$\bar{\mu} = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}$	мПа·с	1,05÷1,5	1,05÷1,5
5	ΔP	МПа	3÷7	0,1÷4,0
6	D_0	$10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$	2	2
7	t	°С	22÷23	17÷24
8	L	м	40	0,15÷5,0
9	t	10^6 с	45÷520	0,01÷0,13
10	$\pi_\mu = \frac{k\Delta P}{\mu D_0}$	–	$10^4 \div 5 \cdot 10^6$	$0,03 \cdot 10^4 \div 10^6$
11	$\pi_D = \frac{\tau D_0}{L^2}$	–	$5,6 \cdot 10^{-5} \div 6,5 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-7} \div 1,2 \cdot 10^{-4}$
12	$\pi_k = \frac{L}{\sqrt{k}}$	–	$3,3 \cdot 10^7 \div 4 \cdot 10^8$	$2,1 \cdot 10^5 \div 5,3 \cdot 10^7$

Разумеется, при условии, что в экспериментах используются натурные пробы (образцы) породы и флюидов, чем обеспечивается равенство основных физико-химических характеристик натурального пласта и его модели (табл. 2).

Согласно данным табл. 2, при проведении экспериментов условия подобия не всегда соблюдались. Однако это относится к «методическим» экспериментам, когда исследования некоторых особенностей процесса вытеснения, не зависящих от пройденного фронтом расстояния, осуществлялись на моделях пласта малой длины (0,153 м), а также к «натурным» экспериментам. В остальных случаях условия моделирования соблюдались. Обращают на себя внимание более высокие скорости вытеснения в экспериментах по сравнению с натурным процессом: характерное время τ в экспериментах многократно меньше. Однако, как указывалось выше, результаты смешивающегося вытеснения слабо зависят от скорости осуществления процесса, что дает возможность не соблюдать при моделировании условия равенства скоростей.

Эксплуатация глубокопогруженных горизонтов как объектов захоронения жидких производственных отходов должна быть рассчитана на продолжительное время и предусматривать, независимо от режима закачки (постоян-

ного или периодического), замещение жидкими производственными отходами пластовой воды путем ее оттеснения к периферии пласта-приемника.

Все это ведет к изменению фильтрационно-емкостных свойств пород, часто сопровождающемуся кольматацией порового пространства призабойной зоны скважины.

Исследования физико-химических процессов в указанных сложных системах проводят с использованием натурального кернового материала, пластовой воды и реальных жидких производственных отходов и имеют своей целью выяснение характера взаимодействия захороняемых жидких производственных отходов с пластовыми водами и водовмещающими породами.

В процессе закачки в пласте-приемнике могут накапливаться и оседать следующие вещества, приводящие к кольматации порового пространства, причем последствия кольматации наиболее быстро проявляются в призабойной («ближней») зоне пласта:

- механические примеси;
- нефтепродукты;
- техногенные растворы (например, хлористый кальций, буровые растворы);
- хемогенные простые соли, образовавшиеся в результате несовместимости пласто-

вых вод с жидкими производственными отходами, особенно в случае, если жидкие производственные отходы представлены слабоминерализованными (пресными) водами.

На основании химико-аналитических исследований состава жидких отходов производства, образующихся на газовых промыслах и в подземных хранилищах газа, пластовых вод, пород коллектора и продуктов их взаимодействия формируются требования к составу закачиваемых в пласт стоков [3]. При их выполнении источники кольматации могут быть исключены или максимально сокращены по объему.

Анализ результатов выполненных геохимических исследований при моделировании процесса вытеснения пластовой воды пласта-приемника жидкими производственными отходами различного состава для пластов-приемников Заполярного НГКМ и Касимовского ПХГ показал оживление процессов ионного обмена сразу после начала закачки, что может привести к метаморфизации пластовой воды от хлоридно-кальциевой к карбонатно-натриевой [9].

Таким образом, моделирование геохимических массообменных процессов в исследованных пластах-приемниках при нагнетании жидких производственных отходов реального состава позволяет делать выводы о совместимости закачиваемых стоков с пластовой водой и водовмещающими породами.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Полигон по захоронению жидких производственных отходов следует проектировать с учетом проведения предварительных экспериментов по фильтрации жидких производственных отходов в условиях пласта-приемника. Особенно важно обладать результатами таких исследований, если породы пласта содержат глинистые минералы, а в составе жидких производственных отходов содержатся примеси углеводородов.

2. В пласте-приемнике при закачке в него жидких производственных отходов протекает множество процессов гидродинамической и физико-химической природы. Основными из них являются:

- вытеснение пластовой воды жидкими производственными отходами, в том числе содержащими примеси углеводородных жидкостей;
- двухфазная фильтрация водоуглеводородной смеси;

- набухание глинистых компонентов породы пласта;

- удерживание углеводородной жидкости породой в призабойной зоне нагнетательной скважины;

- катионный обмен в системе «порода – пластовая вода – жидкие производственные отходы».

3. Анализ экспериментальных исследований свидетельствует о том, что для получения достоверных результатов экспериментов необходимо принимать во внимание тип исследуемого процесса и учитывать характерные размеры зон пласта, в пределах которых наблюдается изменение величин параметров, описывающих процесс.

4. Эксперименты по вытеснению пластовой воды жидкими производственными отходами, удерживанию углеводородной жидкой примеси породой и катионному обмену в связи с проектированием полигона по захоронению жидких производственных отходов газодобывающего предприятия необходимо проводить на моделях пласта, размер которых не меньше ожидаемой длины зоны смеси «пластовая вода – жидкие производственные отходы» (тип эксперимента – моделирование процесса).

5. Оценка показала, что для получения достоверных результатов при изучении пластовых гидродинамических и массообменных процессов вытеснения пластовой воды жидкими производственными отходами удерживания углеводородной примеси породой и катионного обмена в пластах применительно к условиям полигонов по захоронению промстоков Касимовского ПХГ и Заполярного НГКМ моделирование возможно осуществлять, используя модели пластов длиной до ~8 м.

6. Эксперименты по двухфазной фильтрации водоуглеводородной смеси и набуханию глинистых компонентов породы возможно проводить на образцах породы ограниченной длины, но не менее 300 мм (тип эксперимента – натурный).

7. На основании химико-аналитических исследований состава жидких отходов производства, образующихся на газовых промыслах и подземных хранилищах газа, пластовых вод, пород коллектора и продуктов их взаимодействия формируются требования к составу закачиваемых в пласт стоков. При их выполнении источники кольматации могут быть исключены или максимально сокращены по объему.

Список литературы

1. Забродин П.И. Вытеснение нефти из пласта растворителями / П.И. Забродин, Н.Л. Раковский, М.Д. Розенберг. – М.: Недра, 1968. – С. 90–94.
2. Соколов А.Ф. Методы экспериментальных исследований при контроле ареала захоронения промстоков на подземных хранилищах газа / А.Ф. Соколов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2003. – № 6. – С. 25–33.
3. СТО Газпром 18-2005. Гидрогеологический контроль на специализированных полигонах размещения жидких отходов производства в газовой отрасли.
4. Березин В.М. Нефтеотдача образцов песчаников девона и угленосной свиты нижнего карбона Башкирии при вытеснении нефти водой / В.М. Березин // В кн.: Исследование нефтеотдачи. – М.: Гостехиздат, 1959. – С. 79–80.
5. Котяхов Ф.И. О некоторых методах определения коэффициента нефтеотдачи пласта при вытеснении нефти водой / Ф.И. Котяхов, Ю.С. Мельникова, С.А. Серебренников // В кн.: Исследования нефтеотдачи. – М.: Гостехиздат, 1959. – С. 42–43.
6. Шейдеггер А.Э. Физика течения жидкостей через пористые среды / А.Э. Шейдеггер. – М.: Гостоптехиздат, 1960. – С. 171–176.
7. Энгельгард В. Поровое пространство осадочных пород / В. Энгельгард. – М.: Недра, 1964. – С. 114–115, 155.
8. Николаев В.А. Особенности распространения в водоносном пласте-приемнике закачиваемых промышленных стоков / В.А. Николаев, А.Ф. Соколов // сб. тр. СеверНИПИгаза. – Ухта, 2005, – С. 153–168.
9. Соколов А.Ф. Исследование методами физического моделирования геохимических изменений в глубокозалегающих водоносных пластах при закачке в них жидких отходов / А.Ф. Соколов, О.М. Монахова // Актуальные вопросы исследований пластовых систем месторождений углеводородов: сб. ст. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2012. – С. 15–26.