

УДК 622.276.6:622.031

А.Ф. Соколов, к.т.н., начальник лаборатории физического моделирования многофазных систем Центра исследований нефтегазовых пластовых систем и технологического моделирования, ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

Определение длины зоны смешивания флюидов в водоносном пласте-приемнике жидких производственных отходов нефтегазоконденсатных месторождений и подземных хранилищ газа

Подземное захоронение жидких производственных отходов, осуществляемое предприятиями разных отраслей промышленности в России, как способ защиты окружающей среды от загрязнения получило признание также в газовой промышленности. Эксплуатация нефтегазоконденсатных месторождений, подземных хранилищ газа, ужесточение экологических требований к составу жидких производственных отходов с неизбежностью приводит к вопросу об их обезвреживании путем подземного захоронения.

Ключевые слова: методы утилизации отходов, экология, захоронение жидких производственных отходов, исследование водоносных пластов-приемников, смешивающееся вытеснение.

Выбор подземного захоронения жидких производственных отходов как метода утилизации основан на анализе недостатков и степени негативного воздействия на природную среду других физико-химических методов очистки и утилизации жидких производственных отходов.

Анализ показывает, что только подземное захоронение жидких производственных отходов позволяет проводить утилизацию жидких производственных отходов газодобывающей отрасли на высоком экологическом уровне в соответствии с современными требованиями законодательства о природопользовании.

В то же время практика проектирования и эксплуатации полигонов свидетельствует о том, что как выбор пластов-приемников жидких производственных отходов, так и многие проектные решения осуществляются без необходимого научного обоснования. Результатом такого подхода является, в частности, опасность неконтролируемого затухания приемистости нагне-

тательных скважин и возникновения рисков загрязнения окружающей среды вследствие невозможности в течение какого-то периода времени утилизировать отходы основного производства в соответствии с требованиями экологической безопасности.

Таким образом, ознакомление с практикой подземного захоронения жидких производственных отходов приводит к выводу о необходимости дополнительных исследований, в частности проблем гидродинамического характера, типичных при закачке жидких производственных отходов переменного состава.

Исследования выполнены применительно к двум типичным действующим полигонам: на Касимовском ПХГ и на Заполярном НГКМ.

Предварительно были изучены все особенности объектов исследования, включающих инфраструктуру полигонов, гидрогеологические параметры, минералогический состав пород пластов-приемников, составы пластовых вод, жидких производственных отходов.

Породы пластов-приемников представлены слабосцементированным кварцевым песком, содержащим примесь глинистых минералов (гидролюда, монтмориллонит, хлорит, каолинит), а также рентгеноаморфную фазу, сконцентрированную в тонкой фракции вместе с глинистыми минералами. Эти компоненты, как известно, способны к набуханию.

Минерализация пластовой воды в пласте-приемнике полигона Касимовского ПХГ составляет 150 г/дм³, на полигоне Заполярного НГКМ – 16–18 г/дм³.

Жидкие производственные отходы на обоих полигонах представляют смеси попутно с газом добываемых пластовых и конденсационных вод, механических примесей, техногенных жидкостей и имеют минерализацию меньшую, чем вода принимающего пласта.

Программа экспериментальных исследований включала эксперименты по физическому моделированию пластовых процессов и натурные эксперименты для оценки фильтрационных характеристик пласта. Физическое модели-

рование необходимо для получения надежных результатов в тех случаях, когда результаты зависят от размеров образца породы, на котором проводятся исследования. Это касается изучения процессов вытеснения флюидов: длина модели должна быть не меньше длины зоны смеси (> 5–50 м – по данным ВНИИнефти при изучении процессов вытеснения нефти растворителями, > 1–5 м – по нашим данным при вытеснении водного раствора солей водой иного состава).

Натурность обеспечивали, используя образцы пород из исследуемых пластов, а также пробы пластовых вод и жидких отходов производства, отобранных на полигонах.

С учетом изложенного для получения результатов с точностью не ниже $\pm (3-5) \%$ использовали модели пласта длиной: при физическом моделировании – от 1 до 5 м, при натурном экспериментировании – от 157 мм до 1 м.

Процесс вытеснения пластовой воды водной фазой жидких производственных отходов различной минерализации является одним из вариантов «смешивающегося вытеснения», поэтому была применена система параметров и критериев подобия, включающая ряд безразмерных соотношений физических величин.

Для контроля за процессом смешивающегося вытеснения в лаборатории используют такие параметры, как допрорывный коэффициент вытеснения, полный коэффициент вытеснения, длина зоны смеси как функция пройденного расстояния и некоторые другие. В промышленных условиях, кроме того, используют еще один важнейший параметр – коэффициент охвата пласта нагнетаемым агентом. Важнейшим выводом по результатам выполненных, например, П.И. Забродиным и его коллегами экспериментов является вывод о том, что скорость вытеснения смешивающегося вытеснения практически не влияет на результаты вытеснения [1]. 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

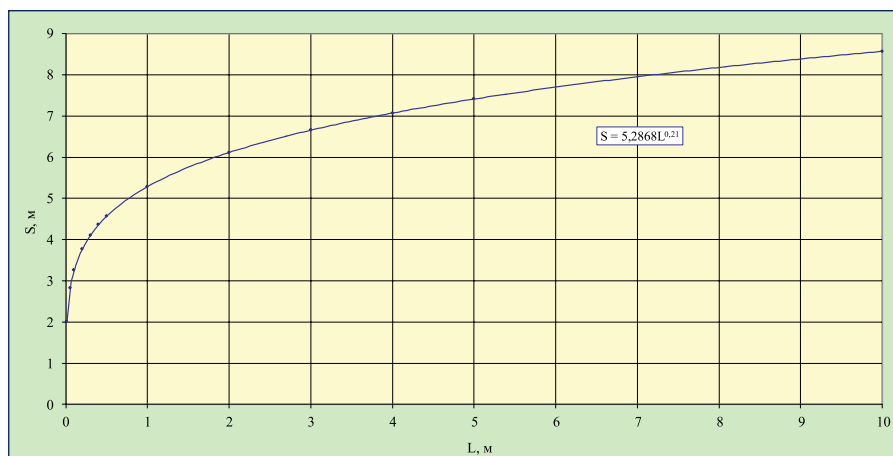


Рис. 1. Зависимость длины зоны смеси S от пройденного расстояния L , по данным исследований ВНИИнефти

процесса по изменению содержания в «продукции» модели пласта, например, иона хлора, по изменению общей минерализации жидкости или по изменению катион-анионного баланса.

Полученные в ходе физического моделирования данные о величинах коэффи-

циентов вытеснения и длине зоны смеси необходимы для оценки размеров ареала распространения закачанной жидкости в пласте-приемнике. Следует иметь в виду, что достоверными, пригодными для практического использования результатами являются те, что получены в

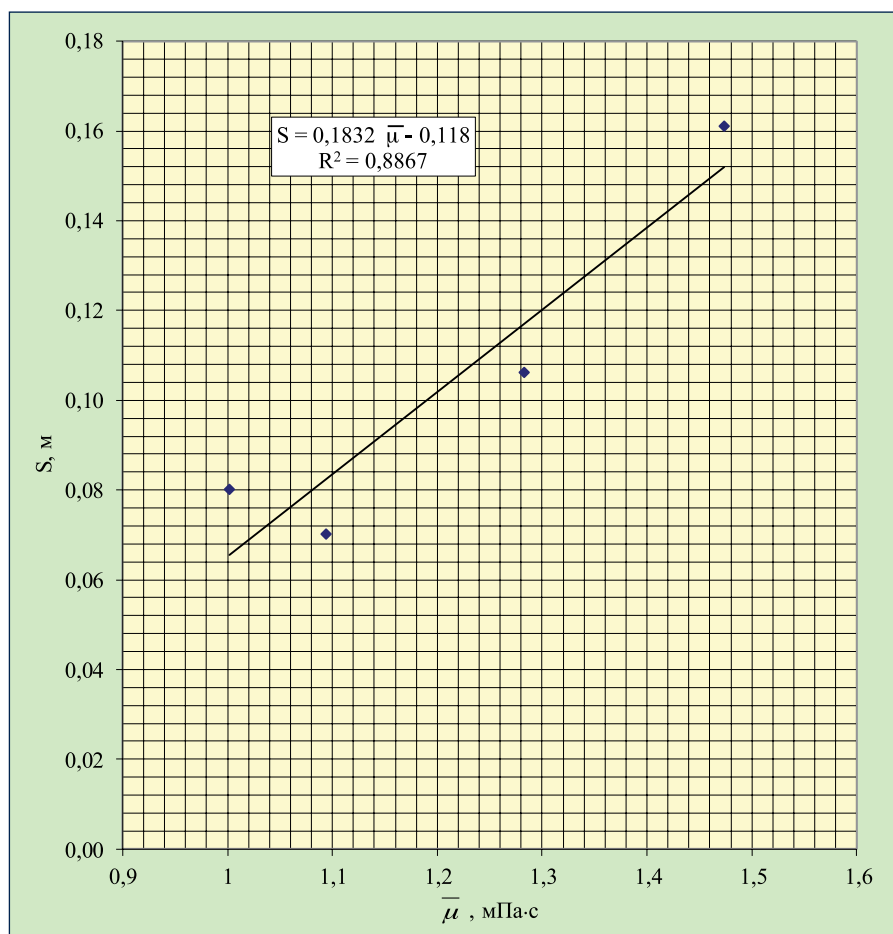


Рис. 2. График зависимости длины зоны смеси от средней вязкости флюида

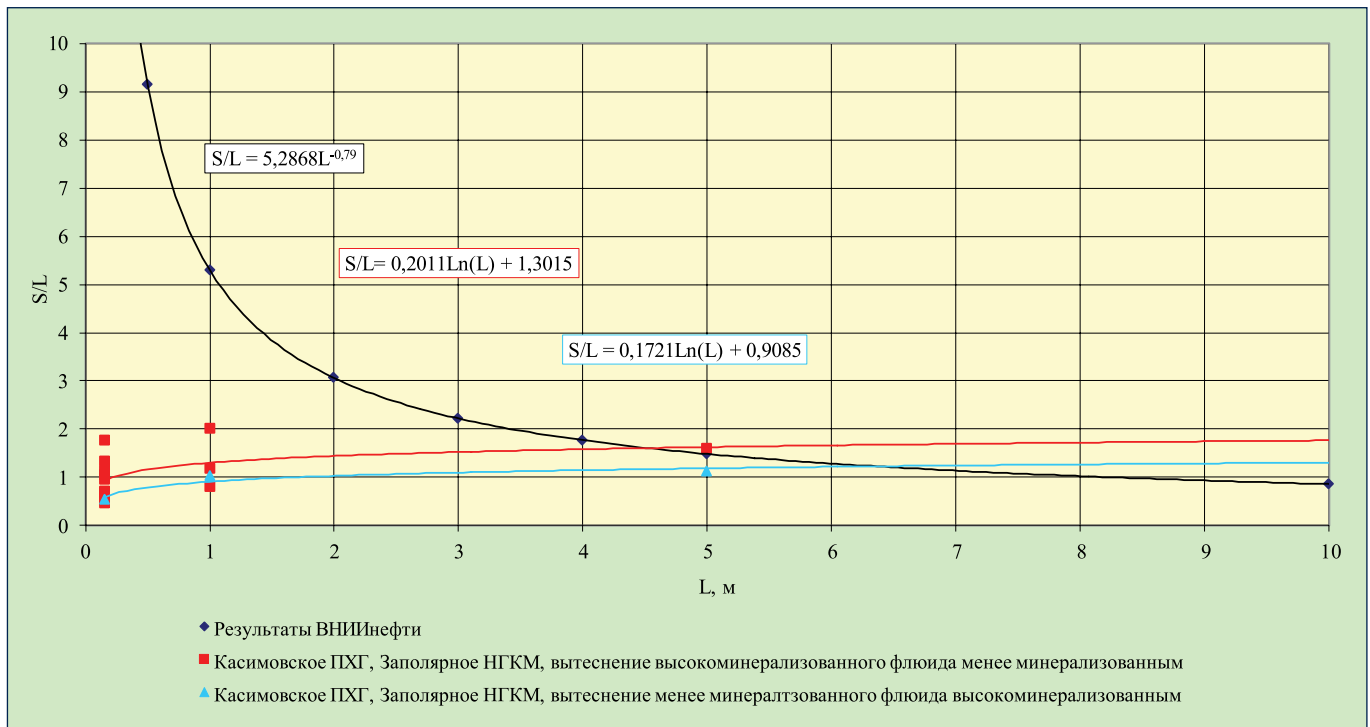


Рис. 3. Зависимость относительной длины зоны смеси S/L от пройденного расстояния L, по данным исследований ВНИИнефти и ВНИИГАЗа

виде зависимостей величин параметров от пройденного фронтом вытеснения расстояния. Это обеспечивается, если длины нескольких используемых моделей пласта оказываются не меньшими, чем длина зоны смеси.

Согласно данным [1], результаты смешивающегося вытеснения слабо зависят от скорости вытеснения: при изменении скорости в 4 раза длина зоны смеси изменяется всего на 5%. Поэтому в экспериментах с целью изучения закономерностей образования зоны смеси и с целью оценки коэффициентов вытеснения можно поддерживать, в принципе, любые удобные скорости. Иными словами, при моделировании вытеснения пластовой воды жидкими производственными отходами комплекс

$$\pi_v = \frac{v\mu L}{kP} \quad (1)$$

не относится к критериям, выдерживать которые необходимо, а это важно, поскольку позволяет проводить эксперименты, относящиеся как к ближней зоне (зона непосредственного поступления жидких отходов производства в пласт-приемник), так и к дальней зоне, с одинаковыми удобными скоростями.

Важным преимуществом такого упрощения условий экспериментов является возможность сравнивать результаты опытов даже в тех случаях, когда скорости фильтрации неодинаковы.

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, либо близкие к ним по составу модели;
- модели пласта необходимо готовить с использованием образцов натуральных пород (кернов);
- термобарические условия в модельном пласте должны быть близки к условиям натурального пласта.

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

$$\pi_\mu = \frac{k\Delta P}{\bar{\mu}D_o} \quad (2)$$

$$\pi_D = \frac{\tau D_o}{L^2} \quad (3)$$

$$\pi_k = \frac{L}{\sqrt{k}}, \quad (4)$$

где k – абсолютная проницаемость пористой среды;

$\bar{\mu}$ – средняя вязкость фильтрующегося флюида;

D_o – 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 натурной и для модели обеспечивает идентичность процессов вытеснения и взаимодействия флюидов с глинистыми включениями на молекулярном уровне, равенство параметра π_k обеспечивает идентичность протекания процесса вытеснения в гидродинамических критериях.

Поскольку по вязкости пластовая вода и жидкие производственные отходы отличаются не намного, в качестве величины $\bar{\mu}$ можно использовать среднее значение вязкости. В качестве характерной длины для натурной пласта можно брать расстояние, после прохождения стабилизация размера (длины) зоны смеси в случаях, когда вытеснение яв-

ляется смешивающимся, это 30–50 м. Для модели пласта характерная длина – длина модели, характерное время – время прохождения фронтом флюида характерной длины.

Как известно, при смешивающемся вытеснении в пористой среде формируется зона смеси [1, 2, 3], в нашем случае это будет зона смеси пластовой воды с жидкими производственными отходами. Процесс формирования зоны смеси имеет две стадии. Сначала вблизи забоя нагнетательной скважины относительная длина зоны (как часть пройденного фронтом жидкими производственными отходами расстояния) увеличивается весьма быстро. После продвижения фронта на расстояние в $10 \div 20$ м формирование зоны смеси в основном завершается, и далее идет процесс продвижения этой зоны по пласту. По данным [1], при смешивающемся вытеснении углеводородных жидкостей зависимость длины s зоны смеси от пройденного фронтом расстояния L описывается с достаточной точностью степенной формулой:

$$S = c \cdot L^\alpha \quad (5)$$

где c и α – коэффициенты, зависящие от соотношения вязкостей вытесняемой и вытесняющей жидкостей.

На рисунке 1 представлен график зависимости длины S смеси от пройденного фронтом расстояния L , из которого следует, что для оценки коэффициентов вытеснения одной жидкостью другою необходимо использовать модели пласта длиной не менее нескольких метров. В то же время сильное влияние соотношения вязкостей на длину зоны смеси и, соответственно, коэффициент вытеснения свидетельствует о возможности получения сравнительных оценок при определении коэффициентов на коротких моделях пласта.

Для иллюстрации зависимости длины переходной зоны от средней вязкости фильтрующегося флюида на рисунке 2 приведен соответствующий график по данным последней серии опытов. Несмотря на то что диапазон изменения средней вязкости в исследованных случаях был относительно небольшим (от

~1,0 до ~1,5 мПа·с), наблюдается четкая зависимость длины зоны от вязкости. Исходя из предположения, что при смешивающемся вытеснении пластовой воды жидкими производственными отходами, содержащими в своей основе пластовую воду с примесью углеводородных жидкостей, длина зоны смеси будет увеличиваться приблизительно так же, как это следует из формулы (5), можно ожидаемые в реальных условиях размеры зоны оценивать по этой формуле.

Физико-химические же процессы взаимодействия жидких производственных отходов с пластовой водой и пористым пластом можно исследовать на небольших моделях.

Такой подход дает возможность получить большой объем информации при проведении экспериментов на коротких моделях. Естественно, что для получения более точных результатов при подготовке, например, технологической схемы организации и эксплуатации полигона по захоронению жидких производственных отходов необходимы экс-



ВЫСТАВКА ПРОХОДИТ ПОД ПАТРОНАЖЕМ ТОРГОВО-ПРОМЫШЛЕННОЙ ПАЛАТЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

XIII Международная специализированная выставка
Нефть. Газ. Химия.
9-11 СЕНТЯБРЯ/ 2014

- 🔴 ВЕДУЩИЕ ПРЕДПРИЯТИЯ ОТРАСЛИ
- 🔴 ВСТРЕЧИ С ПОТЕНЦИАЛЬНЫМИ КЛИЕНТАМИ И ПАРТНЕРАМИ
- 🔴 ТЕРРИТОРИЯ ШИРОКИХ БИЗНЕС-ВОЗМОЖНОСТЕЙ
- 🔴 ЭФФЕКТИВНОЕ ВЛОЖЕНИЕ В БУДУЩЕЕ РАЗВИТИЕ

Место проведения:
 г. Ижевск, ул. Кооперативная, 9
 тел./факс: (3412) 733-581, 733-585, 733-587, 733-664
 neft@vcudm.ru | www.neft.vcudm.ru | vk.com/ngxmmm

Информационный партнер

 Интернет-партнеры

 ПОСТАВЩИКИ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

на правах рекламы

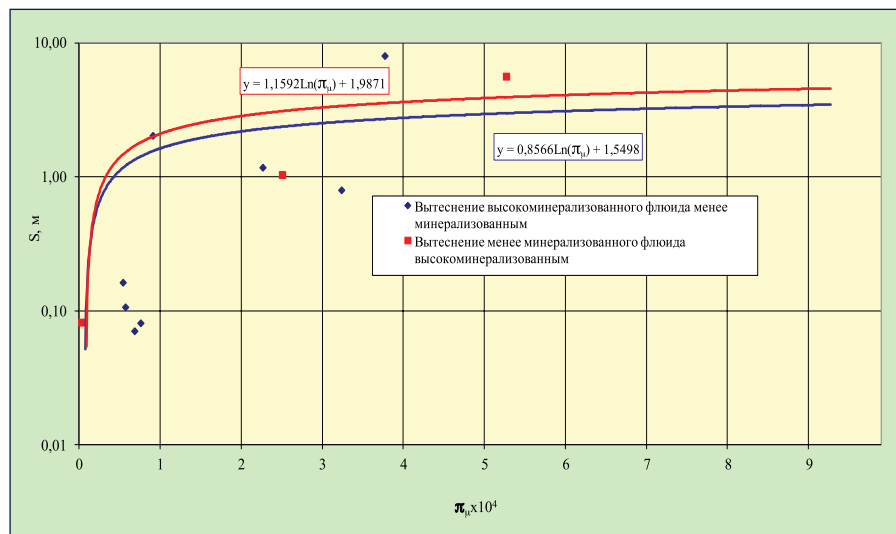


Рис. 4. Зависимость длины зоны смеси S от параметра приведения π_μ

перименты на моделях пласта длиной несколько метров.

Анализ сравнения с результатами исследования процесса вытеснения нефти растворителями показывает, что полученная логарифмическая зависимость длины зоны смеси от пройденного расстояния более точно отражает особенности процесса смешивающегося вытеснения водных растворов, хотя начиная с длины модели 5 м и более мы выйдем на степенную зависимость,

как у исследователей из ВНИИнефти. Относительная длина зоны смеси S/L с ростом расстояния L (длины модели пласта) для углеводородов уменьшается, для водных же растворов изменяется слабо (рис. 3).

Зависимость абсолютной длины зоны S смеси от параметра приведения π_μ (рис. 4) показывает, что на моделях пласта длиной до 5 м можно исследовать только физические процессы, а более 5 м – проводить гидродинами-

ческие исследования с соблюдением критериев подобия π_μ и S/L (при $\pi_\mu \geq 3 \cdot 10^4$ длина зоны смеси не зависит от этого параметра, что соответствует условиям автомодельности процесса). Исследованиями показано, что в отличие от процесса взаимовытеснения смешивающихся углеводородных жидкостей при взаимовытеснении водных растворов (пластовая вода, жидкие производственные отходы) относительная длина образующейся зоны смеси фактически не зависит от пройденного фронтом расстояния в исследованных случаях на моделях пласта длиной до 5 м.

Поэтому оценка ожидаемых размеров ареала распространения жидких производственных отходов по пласту в соответствии с закономерностями, полученными для углеводородов, будет оценкой «сверху». Поскольку заранее невозможно определить коэффициент охвата реального пласта нагнетаемыми жидкими производственными отходами, наиболее точным контроль за распространением жидких производственных отходов может быть только на полигоне, если будет признана необходимость создания системы наблюдательных скважин.

Литература:

1. Забродин П.И., Раковский Н.Л., Розенберг М.Д. Вытеснение нефти из пласта растворителями. – М.: Недра, 1968. – С. 90–94.
2. Гриценко А.И., Николаев В.А., Тер-Саркисов Р.М. Компонентоотдача пласта при разработке газоконденсатных залежей. – М.: Недра, 1995. – 122 с.
3. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. – М.: Недра, 1984. – 211 с.

UDC 622.276.6:622.031

A.F. Sokolov, Candidate of Sciences (Engineering), Head of the Laboratory for Physical Simulation of Multiphase Systems of the Centre for Research of Oil and Gas Formation Systems and Process Simulation, Gazprom VNIIGAZ LLC

Determination of the length for fluid blending zone in the water bearing formation-receiver of liquid production waste of oil-gas-condensate fields and underground gas storage facilities

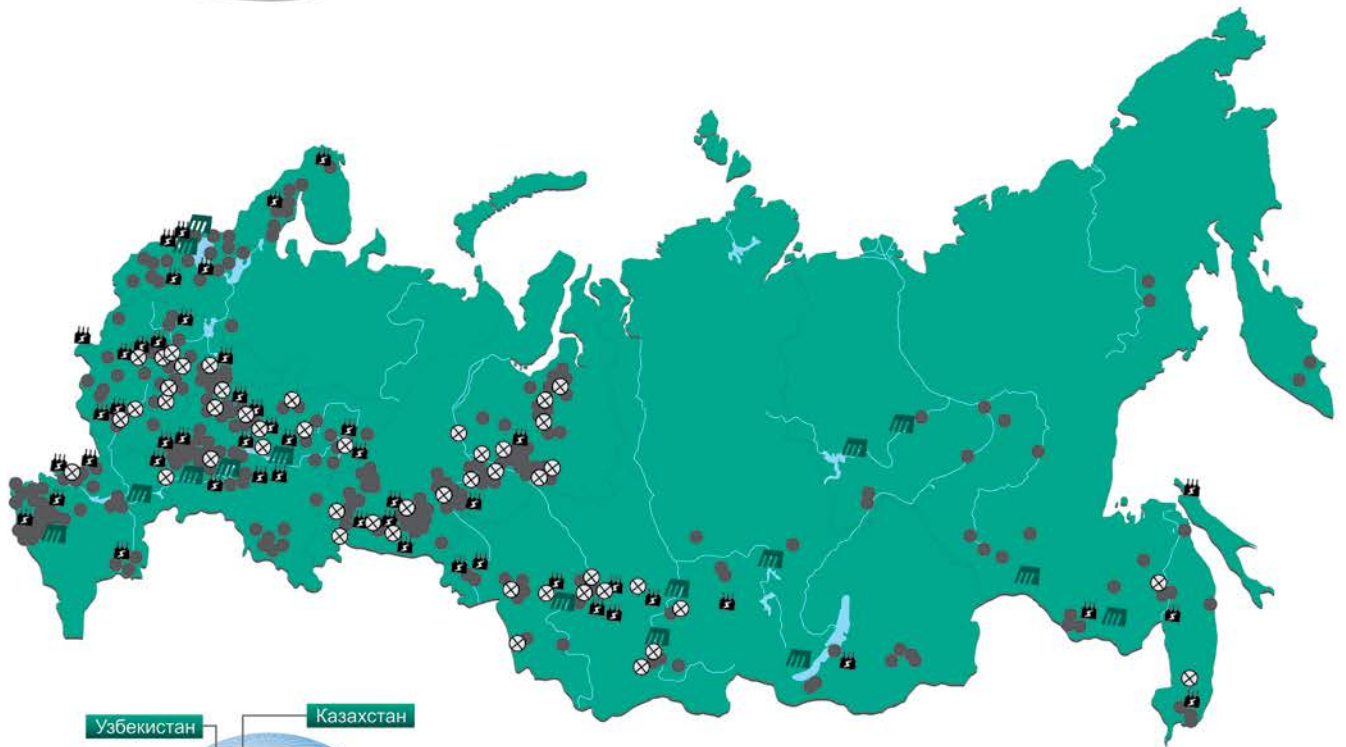
Underground disposal of liquid production waste carried out by the enterprises of various branches of industry in Russia as a method for environment protection from pollution, gained acceptance in the gas industry too. Exploitation of oil-gas-condensate fields, underground gas storages, strengthening of environmental requirements to the composition of liquid production waste inevitably leads to their «neutralization» by underground disposal.

Keywords: waste disposal methods, environment, disposal of liquid production waste, evaluation of formation-receivers, miscible displacement.

References:

1. Zabrodin P.I., Rakovskiy N.L., Rozenberg M.D. Vytesnenie nefiti iz plasta rastvoritelyami (Displacement of oil from the formation using solution media). – Moscow: Nedra, 1968. – P. 90–94.
2. Gritsenko A.I., Nikolayev V.A., Ter-Sarkisov R.M. Komponentootdacha plasta pri razrabotke gazokondensatnykh zalezhei (Component performance of the formation during development of gas condensate deposits). – Moscow: Nedra, 1995. – 122 p.
3. Barenblatt G.I., Yentov V.M., Ryzhik V.M. Dvizhenie zhidkostey i gazov v prirodnykh plastakh (Flow of fluids and gases in the natural formations). – Moscow: Nedra, 1984. – 211 p.

ЭКРА



Энергия не исчезает и не появляется вновь, а переходит из одной формы в другую.

Энергия опыта, знаний и смелых решений преобразуется в особую форму ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ электрооборудования от повреждений для надежной и стабильной работы энергосистем.

СОХРАНЯЯ ЭНЕРГИЮ

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «ЭКРА» ПРЕДЛАГАЕТ:

- РЗА ПОДСТАНЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ 6–750 кВ
- РЗА СТАНЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ
- НИЗКОВОЛЬТНЫЕ КОМПЛЕКТНЫЕ УСТРОЙСТВА
- СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО ПОСТОЯННОГО ТОКА
- ЩИТЫ СОБСТВЕННЫХ НУЖД 0,4 кВ
- УСТРОЙСТВА ПЛАВНОГО ПУСКА И РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ 3–15 кВ ДО 17 МВт
- ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ 3–10 кВ
- СТАТИЧЕСКИЙ ВОЗБУДИТЕЛЬ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДО 12,5 МВт
- АСУ ТП ПОДСТАНЦИЙ
- ОБОРУДОВАНИЕ ВЧ-СВЯЗИ
- ПРОВЕРОЧНЫЙ КОМПЛЕКС OMICRON

НПП «ЭКРА» ЯВЛЯЕТСЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ ПОЛНОГО ЦИКЛА И ОСУЩЕСТВЛЯЕТ:

- РАЗРАБОТКУ, ПРОИЗВОДСТВО И КОМПЛЕКСНУЮ ПОСТАВКУ ОБОРУДОВАНИЯ
- ПРОЕКТИРОВАНИЕ
- НАЛАДКУ, ГАРАНТИЙНОЕ И ПОСТГАРАНТИЙНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ
- ОБУЧЕНИЕ ПЕРСОНАЛА

Выпускаемые устройства аттестованы для применения ОАО «ФСК ЕЭС», ОАО «РусГидро», ОАО «Концерн «Росэнергоатом», ОАО «Газпром», АК «Транснефть»



428003, Россия, г. Чебоксары, пр. И. Яковлева, 3
Тел./факс: (8352) 220-110 (многоканальный),
220-130 (автосекретарь)
E-mail: ekra@ekra.ru, <http://www.ekra.ru>