

УДК 622.276.001

**В.С. Деева¹, Ю.С. Березовский¹, Ю.В. Скрыль²,
С.М. Слободян^{1,3}, П.Ю. Гусев¹**

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, Россия

²Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

³Омский государственный технический университет, Омск, Россия

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВЯЗКОСТЬ СЛОЕВ ЖИДКИХ СРЕД В ЗАКРЫТЫХ ПРОСТРАНСТВАХ

Выполнено сравнение разных известных и широко используемых в настоящее время современных подходов и методов увеличения нефтеотдачи в процессе извлечения высоковязких компонентов нефтепродуктов из подземных хранилищ-месторождений. Анализ показал, что современные подходы и методы увеличения нефтеотдачи в процессе извлечения высоковязкой нефти из подземных хранилищ-месторождений, большинство используемых технологий извлечения нефти и нефтепродуктов из закрытых пространств экономически нерентабельны. Сравнительный анализ методов, известных из мирового опыта разработки и эксплуатации месторождений-аналогов хранилищ, показал, что наиболее эффективными технологиями повышения нефтеотдачи при извлечении высоковязкой нефти из хранилищ являются технологии: «VAPEX», «SAGD» («JAGD») и метод микроволнового нагрева; результаты проведенного нами анализа и моделирования показали неэффективность технологии SAGD. Наличие нерациональной конструкции схемного структурного решения (низкого положения нижней добывающей скважины) приводит к низкой нефтенасыщенности и высокой степени расслоения неоднородной структуры нефтепродуктов в хранилище, сильно снижающей эффект от нагнетания газа в хранилище; применение метода микроволнового нагрева показывает в разных вариантах, в том числе и в комбинациях с другими технологиями, весьма высокую эффективность ввиду положительного значения чистого дисконтированного дохода и высокого коэффициента нефтеизвлечения, что свидетельствует о перспективности технологии микроволнового воздействия на нефть высокой вязкости и об актуальной необходимости проведения дополнительных исследований по определению закономерностей и особенностей пространственного влияния на вязкость нефти.

Ключевые слова: инновация, метод, хранилище, эффективность, геотехнология, модель, оценка, вязкость, электромагнитное воздействие, фракция, адаптивное управление, пространство, распределенный нагрев, тепловая проводимость, среда.

V.S. Deeva¹, Yu.S. Berezovsky¹, Yu.V. Skrii²,
S.M. Slobodyan^{1,3}, P.Yu. Gusev¹

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

²Altay State University, Barnaul, Russian Federation

³Omsk State Technic University, Omsk, Russian Federation

EFFECTIVENESS OF INNOVATION TECHNOLOGIES ACTIONS BY VISCOSITY LAYERS OF LIQUID MEDIUM IN CLOSED UNDERGROUND SPACES

The work includes the comparison of well-known and widely used up-to-day approaches and methods of enhanced oil recovery in the extraction process of highly viscous components of the petroleum from underground storage fields. Analysis revealed that these approaches and methods as well as the most of the used extraction technologies of highly viscous oil products from enclosed storage, economically unprofitable. Comparative analysis of the well-known methods in the world show that the most effective technologies of enhanced oil recovery in the extraction process of highly viscous components of the petroleum from storage are «VAPEX», «SAGD» («JAGD») and microwave heating method. The results of our analysis and simulation show that the technology SAGD is inefficiency. The irrational structure of the circuit structural solutions (low position of the bottom production well) lead to a low oil saturation and a high degree of stratification of heterogeneous structure in underground storage. The using of microwave heating method shows high efficiency, due to a positive net present value, and the high rate of oil recovery in various versions, including the combination with other technologies. This suggests the prospects of technology of microwave exposure on the oil of high viscosity and the relevance of the additional research to determine regularities and features of the spatial effect on the viscosity of the oil.

Keywords: innovation, method, depository, layer, efficiency, geo-technology, model, estimation, viscosity, electromagnetic action, fraction, adaptive control, space, distributed heating, thermal conductivity, medium.

Введение. Во многих отраслях народного хозяйства Российской Федерации, в том числе и на объектах промышленного комплекса [1–6], повышение энергетической эффективности всех, без исключения, средств, систем, комплексов и различного оборудования является в настоящее время ключевым направлением. Часто в условиях практической эксплуатации сложных технических систем и комплексов возникает необходимость применения методов, техники и систем дистанционного пространственно-распределенного энергетического или теплового воздействия на особо опасную, агрессивную, жидкостную вязкую среду, скрытую в ограниченных замкнутых воздушном, наземном и подземном пространствах [1–18]. Для решения таких проблем в связи с их высокой актуальностью в настоящее время ведутся активно разработки различных инновационных технологий [8–18]. Наиболее

актуально применение разрабатываемых энергетически эффективных инновационных технологий и систем пространственно-распределенного дистанционного теплового воздействия на особо опасные, агрессивные, жидкостные, высокой вязкости нефтесодержащие среды, находящиеся в ограниченном подземном пространстве. Использование способов дистанционного теплового воздействия на среды вызвано необходимостью понижения вязкости, например нефтепродуктов, что особенно важно для обеспечения повышения их текучести и наиболее эффективного извлечения вязких компонентов, находящихся в объеме замкнутых подземных пространств. Методы теплового дистанционного воздействия на горючие нефтесодержащие продукты в этих случаях предъявляют специальные требования к способам, методикам, конструкциям схем ввода энергии в объем подземного пространства для теплового воздействия на нефтяную среду.

Целью работы являются анализ и сопоставление известных [9–18] методов формирования дистанционного теплового воздействия на ограниченные объемы подземных пространств (полости, резервуары, месторождения и т.п.), заполненные нефтепродуктами средней и высокой вязкости, для наилучшего выбора, если не оптимальной, то наиболее рациональной технологии их извлечения со средней и высоковязкой консистенцией на основе передовых в мире технологий. Анализ проблематики выполнен с привлечением фундаментальных основ теории подобия [19] – путем скринингового подбора аналогов решений со схожими свойствами и проблемами, с выделением группы перспективных методов, по которым имеются лабораторные исследования, аналитический расчет или пилотные испытания.

В современном мире проблема повышения эффективности воздействия на трудноизвлекаемые консистенции нефтепродуктов высокой вязкости со временем становится все более актуальной, особенно в задачах извлечения из подземных хранилищ нефтегазовых энергоносителей, поскольку количество месторождений с легкими для извлечения консистенциями сокращается. По этой причине возрастает интерес к более полному извлечению нефти не только с месторождений, но и из подземных хранилищ с более вязкой консистенцией, считавшейся ранее нерентабельной из-за низкой эффективности применяемых технологий ее извлечения.

Нефтепродукты, получаемые с месторождений Западной Сибири с традиционно присущей высокой вязкостью нефти, содержат в своем составе как регулярные компоненты подошвенную воду и газовые составляющие. При хранении в подземных хранилищах это приводит к образованию слоистой структуры (газовая шапка – нефть – подошвенная вода), поэтому возникают ограничения на применение известных методов извлечения нефтепродуктов, что снижает эффективность использования существующих традиционных способов. В результате извлечение нефти ведется на режиме заводнения (с применением закачки холодной воды) с низкими дебитами нефти и высокой обводненностью (на слой нефтепродукта приходится 20 % от общих извлекаемых запасов, а текущий КИН (количество извлеченной нефти) часто не превышает 0,07).

Как видно из кривой фракционного потока (рис. 1), для средней насыщенности водой (~ 0,5) хранилища такой консистенции нефти стартовая обводненность извлекаемого из хранилища потока нефти составит 88 % [11].

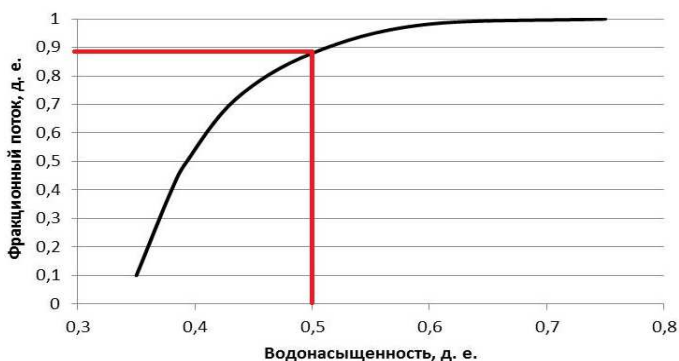


Рис. 1. Зависимость значения кривой фракционного потока от водонасыщенности

С целью подбора оптимальной стратегии был проанализирован мировой опыт разработки методов извлечения из подземных месторождений нефти высоковязкой консистенции. Следуя основам фундаментальной теории подобия [19], были выбраны четыре аналога месторождений – хранилищ со схожими свойствами, на которых применялись, опробовались или рассчитывались на модели и аналитически различные методы повышения нефтеотдачи месторождений и хранилищ при извлечении нефти.

Наиболее широко применяемые и перспективные методы извлечения нефти приведены ниже в табл. 1 [13].

Таблица 1

Потенциально эффективные методы извлечения нефтепродуктов из слоистых структур и пластов, содержащих высоковязкую нефть

«Холодные» методы	Тепловые методы	Альтернативные методы
Режим истощения (холодного заводнения)	Закачка пара и горячей воды	Микробиологические методы
Карьерный способ	Пароциклическая обработка	Микроволновый нагрев
Закачка инертного газа	Внутрипластовое горение	
Технология «CHOPS»	Технология «SAGD»	
Технология «VAPEX»		

По результатам анализа применимости (с учетом ограничений технологии, преимуществ и недостатков каждого из методов) можно выделить три технологии: «VAPEX», «SAGD», метод микроволнового нагрева.

Vapour Extraction Process – VAPEX. Эта технология подразумевает наличие пары горизонтальных скважин одна над другой. В верхнюю скважину с целью снижения вязкости закачивается растворитель, который способствует миграции нефти и нефтепродуктов в нижнюю добывающую скважину (в качестве растворителя используют легкие фракции газа или специальные химические добавки).

Преимущества данной технологии: достаточно низкая ее стоимость (по отношению к тепловым методам), слабая чувствительность к наличию подошвенной воды и газовой шапки в хранилище, а также высокое значение потенциально достигаемого коэффициента извлечения нефтепродуктов.

Несмотря на недостатки (необходимость очистки нефтепродуктов, низкие дебиты потока извлекаемой нефти из-за необходимости ее обработки при низкой депрессии потока), данная технология – потенциально перспективна.

Steam assisted gravity drainage (SAGD). Этот метод при конструктивной реализации, как и технология «VAPEX», подразумевает наличие структуры двух горизонтальных скважин, находящихся одна над другой. В течение определенного периода времени в обе скважины

закачивается пар, после чего нижняя скважина переводится в режим извлечения нефти, дренирующей вниз под действием гравитационной силы тяжести, в то время как в верхнюю продолжает закачиваться пар, который вследствие меньшей плотности начинает подниматься вверх, создавая паровую камеру, благодаря которой вязкость нефти, постоянно находящейся в контакте с горячим паром, существенно снижается. После того как паровая камера достигает кровли коллектора хранилища, происходит ее расширение и, следовательно, увеличение зоны воздействия. Как видим, технология SAGD является ничем иным как рациональным усовершенствованием технологии «VAPEX».

Преимущества технологии SAGD: более высокая эффективность по сравнению с другими термическими методами в коллекторах–хранилищах слоистых структур нефтепродуктов с присутствием газовой шапки и подошвенной воды с месторождений; уменьшение вязкости нефти; более высокий дебит потока извлекаемых нефти и нефтепродуктов из хранилищ (отсутствие ограничений по максимально допустимой депрессии).

Вполне естественно, что эффективность данного метода снижается в неоднородных слоистых структурах хранилищ – коллекторах нефти, поскольку уменьшается взаимодействие между расчлененными частями пласта. Данная проблема может быть решена применением технологии JAGD – добавления *J*-образной скважины для соединения расчлененных паром прослоек общего пласта нефтепродуктов. Кроме того, данная модификация метода позволяет существенно снизить эффект влияния конденсации, присутствующей в хранилищах подошвенной воды.

Микроволновый нагрев. Исследование влияния электромагнитного поля высокой частоты (ЭМ-поле ВЧ) на однородные и неоднородные среды имеет достаточно длительную, почти вековую историю [1–7, 13]. Многие аспекты физического и физиологического, положительного и отрицательного влияния ЭМ-поля ВЧ на объекты живой и неживой природы довольно подробно изучены целым рядом известных ученых. Сущность влияния ЭМ воздействия ВЧ на облучаемые объекты живой и неживой природы заключена в селективном восприятии действия на них поля. Имеется обширный экспериментальный материал, служащий фактической основой для веских

убедительных доказательства практической возможности использования определенных режимов и вариантов создания постоянной и переменной интенсивности ЭМ-полей для изменения физических и улучшения технологических свойств различных сред и материалов [1–18]. Однако слабоизученным остается вопрос влияния ЭМ-полей ВЧ на углеводородное сырье (нефть и нефтепродукты), обладающее широким спектром составляющих его компонентов и структур поликомпонентного состава. Знание особенностей протекания процессов онтогенетической реакции восприятия каждым типом углеводородного сырья воздействия ЭМ-поля ВЧ важно для определения меры энергетического воздействия. Что касается эффективности режимов воздействия ЭМ-поля ВЧ на каждый из компонентов, то здесь важно выявить наиболее чувствительную составляющую на действие поле ВЧ снижающую в наибольшей степени вязкость среды. Как показывают исследования [9–18], использование высокочастотного нагрева зоны, прилегающей к источнику ВЧ ЭМ-излучения, позволяет снизить вязкость многих сортов нефти в радиусе нескольких метров от источника ВЧ ЭМ-излучения. Радиус воздействия ЭМ-поля ВЧ можно увеличить применением дополнительной процедуры – периодической закачкой растворителя.

Основные преимущества данной технологии: отсутствие неэффективных потерь тепла; нечувствительность к наличию образования слоистой структуры (газовой шапки и подошвенной воды) в хранилище; существенное снижение вязкости при ВЧ-воздействии на слой нефти. Несмотря на недостатки (отсутствие информации о натуральных испытаниях, небольшой радиус воздействия без закачки реагентов, дорогостоящее оборудование), данная технология потенциально применима.

Expanding Solvent SAGD – ES-SAGD method. В мировой практике встречаются примеры эффективной комбинации технологий JAGD и VAPEX для тонких слоев в хранилищах нефтепродуктов с подошвенной водой и газовой шапкой, поскольку это позволяет: сократить тепловые потери; более эффективно использовать изменение давления слоя нефти; снизить вязкость нефти; уменьшить объем используемого пара.

Имеются сведения [13], что данная комбинация методов прошла успешно пробные испытания.

Выбор оптимальной стратегии извлечения. Для оценки оптимальности применения рассматриваемых технологий была построена синтетическая модель нефтяного хранилища-месторождения размером $500 \times 500 \times 40$ м, состоящая из 25 000 ячеек. Модель была адаптирована на реальные данные, общепринятые для практической эксплуатации и добычи нефти. При этом нами была построена термодинамическая модель флюида, позволяющая учесть тепловые эффекты при воздействии на него. Для оценки экономической эффективности извлечения была создана экономическая модель хранилища-месторождения нефти, учитывающая статистически усредненные данные на середину 2014 г. (в качестве экономического критерия был выбран чистый дисконтированный доход – ЧДД).

Оценка эффективности метода закачки холодной воды с применением вертикальных и горизонтальных скважин. На первом этапе был проведен расчет базового варианта, реально применяемого в настоящее время в нефтяной отрасли на хранилищах-месторождениях, метода закачки холодной воды с применением вертикальных и горизонтальных скважин (рис. 2–3).

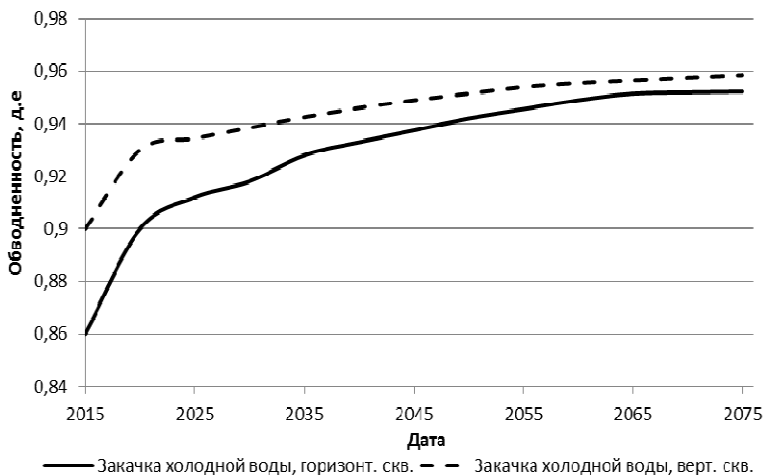


Рис. 2. Динамика изменения обводненность

Исходя из расчетов, вариант с применением горизонтальных скважин характеризуется более высоким дебитом нефти за счет большей эффективной нефтенасыщенной длины ствола и меньшей стартовой обводненности вследствие возможности расположения

скважины на участке с большей нефтенасыщенностью. Из-за прорывов воды обводненность горизонтальной скважины увеличивается быстрее, однако более раннее извлечение нефти влияет на показатели. Значения КИН и ЧДД приведены в табл. 2.

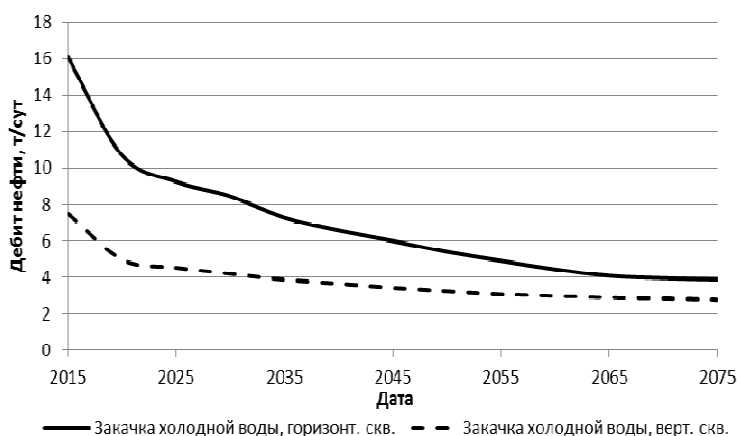


Рис. 3. Динамика изменения дебита нефти

Таблица 2

Сравнение результатов расчета для горизонтальной и вертикальной скважины

Параметр	Вертикальные скважины	Горизонтальные скважины
КИН	0,130	0,239
ЧДД	-167	-15

Применение горизонтальных скважин имеет более высокие значения ЧДД и КИН, однако показатель ЧДД все же отрицательный из-за более ранней обводненности скважин, больших эксплуатационных затрат на извлечение жидкости и более высокой стоимости бурения горизонтальной скважины.

Оценка эффективности микроволнового нагрева. Исходя из лабораторных исследований, в среднем по зоне влияния микроволнового нагрева вязкость нефти снижается в 4 раза. К сожалению, более точной информации об эффекте данной технологии применительно к нефти пластов сибирских месторождений не имеется (исследования проводились на дегазированном типе хранилища). В принципе имеющейся информации достаточно для первичной оценки потенциала микроволнового метода. В нашей модели снижение вязкости нефти задавалось путем подбора фазовых проницаемостей в зоне влияния из-

лучения микроволновой технологии (в программе Eclipse через функцию SATNUM, используя 2 типа сред с различными фазовыми проницаемостями).

Изначально была рассчитана модель с сокращением вязкости нефти всего пласта в 4 раза, после чего начальная вязкость была восстановлена, но подобраны фазовые проницаемости, дающие аналогичный эффект прироста дебита. Данный способ позволяет оценить применимость микроволнового метода на аналитическом этапе поиска оптимального воздействия.

Результаты аналитического и имитационного моделирования приведены на рис. 4–5 и в табл. 3. В табл. 4 приведены экономические данные, используемые для оценки рентабельности микроволнового метода.

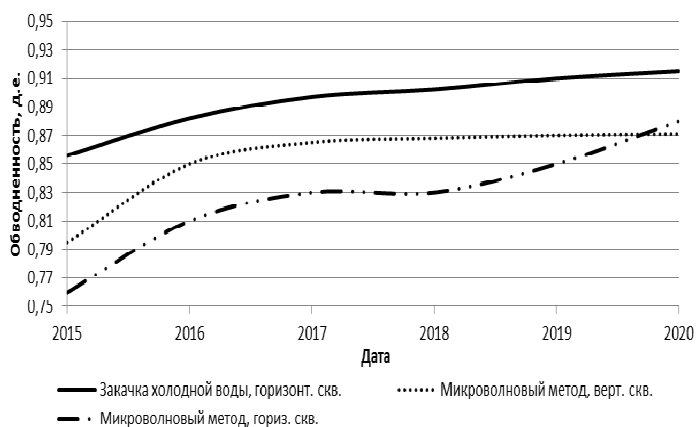


Рис. 4. Динамика изменения обводненности

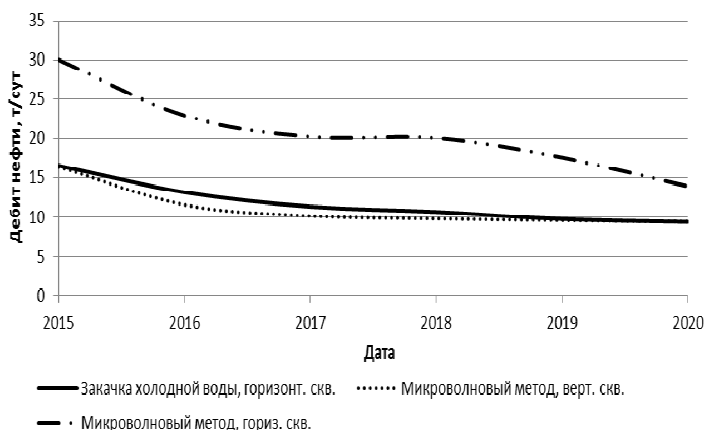


Рис. 5. Динамика изменения извлекаемости нефти

Таблица 3

Сравнение вариантов с применением микроволнового метода

Параметр	Горизонт. скв.	Микроволновый метод (верт. скв)	Микроволновый метод (горизонт. скв.)
КИН	0,040	0,039	0,071
ЧДД	-5	-47	54

Таблица 4

Затраты на реализацию метода микроволнового нагрева

Затраты	Стоимость, млн руб
Генератор ВЧ: АКIP-3201A/8	1,5
Дополнительное оборудование	0,25
Замена оборудования (каждые 5 лет)	2,2
Стоимость растворителя	0,8
Расходы на электроэнергию (в год)	1,7

Из полученных результатов можно сделать вывод, что положительный ЧДД может быть достигнут применением технологии микроволнового нагрева на горизонтальных скважинах. В вертикальных скважинах достичь положительного эффекта с точки зрения экономики не удалось, так как воздействию подвергается значительно меньший объем углеводородов.

Полученные результаты являются перспективными для возможного применения и требуют более углубленных лабораторных исследований для учета эффекта пространственного изменения вязкости в зоне прилегающей к скважине (при наличии реальных данных моделирование процесса прогрева станет возможным путем задания разных уравнений течения, подобранных в PVTi-модели для каждого диапазона изменения вязкости).

Расчет эффективности применения технология «ES-SAGD». Оценка данной технологии была проведена на термической модели флюида. Рассмотрено несколько вариантов с различной расчлененностью слоев пласта по методике, примененной для оценки микроволнового нагрева. Анализ полученных при моделировании результатов привел к выводу о низкой по сравнению с микроволновым нагревом эффективности данной технологии.

Вариант с применением SAGD имеет самое маленькое значение ЧДД, при этом коэффициент извлечения нефти существенно уступает варианту микроволнового нагрева. Дальнейшие исследования этого варианта не имеют смысла, поскольку можно сделать вывод о неэффективности данной технологии вследствие: низкой начальной нефтенасыщенности (в зоне добывающей скважины – 0,41, при связанной воде – 0,305); высокой расчлененности слоев среды; значительных стоимости оборудования и эксплуатационных затрат.

Выводы. Таким образом, анализ показал, что современные подходы и методы увеличения нефтеотдачи в процессе извлечения высоковязкой нефти из подземных хранилищ-месторождений по большей части экономически нерентабельны; сравнительный анализ методов, известных из мирового опыта разработки месторождений-аналогов хранилищ, показал, что наиболее эффективными технологиями повышения нефтеотдачи при извлечении высоковязкой нефти из хранилищ являются технологии «VAPEX», «SAGD» («JAGD») и метод микроволнового нагрева; результаты проведенного нами анализа и моделирования показали неэффективность технологии SAGD. Наличие нерациональной конструкции схемного структурного решения (низкого положения нижней добывающей скважины) приводит к низкой нефтенасыщенности и высокой степени расслоения неоднородной структуры нефтепродуктов в хранилище, сильно снижающей эффект от нагнетания газа в хранилище; применение метода микроволнового нагрева показывает в разных вариантах, в том числе и в комбинациях с другими технологиями, весьма высокую эффективность ввиду положительного значения ЧДД и высокого КИН, что свидетельствует о перспективности технологии микроволнового воздействия на нефть высокой вязкости и об актуальной необходимости проведения дополнительных исследований по определению закономерностей и особенностей пространственного влияния на вязкость нефти.

Библиографический список

1. Davidson D.W. Clathrate Hydrates, in Water // A Comprehensive Treatise, Plenum Press. – New York, – 1973. – Vol. 2, Chap. 3, 115 p.
2. Dielectric properties of some clathrate hydrates of structure II / S.R. Gough, R.E. Hawkins, B. Morris, D.W. Davidson // J. of Phys, Chem. – 1973. – Vol. 77, № 5. – P. 2969–2976.

3. Дебай П., Закк Г. Теория электрических свойств молекул: пер. с нем. – М.; Л.: Изд-во Главная редакция общетехнической литературы, 1936. – 144 с.

4. Maxwell J.C. A Treatise of Electricity and Magnetism. – Oxford, 1892. – 60 p.

5. Wagner K.W. Die Dielektrizitätskonstante des von Kugelformigen Partikeln Arch. Electrotech. – 1914. – Vol. 2. – 371 p.

6. Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика. – М.: Гостоптехиздат, 1963.

7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: ГИИФМЛ, 1959. – 532 с.

8. Gates F.K. Role of heat treatment in the processing and quality of oat flakes. Academic dissertation. – Helsinki: University of Helsinki, 2007. – 69 p.

9. Dynamics layer of the sliding contact collector elements / S. Romanishina, D. Katyuk, V. Deeva, S. Slobodyan // 2015 IEEE 35th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO2015 – Conference Proceedings 7146848. – P. 116–118. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=7146848>. DOI: 10.1109/ELNANO.2015.7146848

10. Деева В.С. Траекторное рассеяние фракций скользящего контакта // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 2(22). – Ч. 1. – С. 249–254.

11. Деева В.С., Слободян С.М. Физическая модель пространства скользящего взаимодействия сред // Известия Алтайского гос. ун-та. – 2013. – № 1/1(77). – С. 157–161.

12. Деева В.С., Катюк Д.Ю., Слободян С.М. Термодинамика слоя динамического контакта конденсированных сред // Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна (опыт, инновации): тр. 9-й Междунар. науч.-техн. конф., 17–18 сент. 2014 г. – Тюмень, Изд-во Тюмен. гос. нефтегаз. ун-та, 2014. – С. 15–18.

13. Березовский Ю.С., Слободян С.М. Инновационные технологии разработки тонких пластов высоковязкой нефти с подошвенной водой // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика (InnoTech2014): материалы VI Междунар. интернет-конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – С. 72–79.

14. Катюк Д.Ю., Слободян С.М. Модель нагрева динамического слоя жидкости // Современные проблемы математики: тр. всерос. науч.-практ. конф. студ., аспирант. и молод. ученых; Уссурийск, 2–5 декабря 2014 г. / Дальневост. федерал. ун-т (филиал в г. Уссурийске). – Уссурийск, 2014. – С. 56.

15. Identification of space contact for dynamics medium / V.S. Deeva, G.A. Elgina, V.B. Lapshin, M.S. Slobodyan, S.M. Slobodyan // International Conference on Informatics, Networking and Intelligent Computing (INIC2014); November 16–17, 2014. – Shenzhen, China, 2014.

16. Установка для исследования мощного лазерного воздействия на полимерные структуры / А.А. Пономарев, Ю.В. Скрыль, М.С. Слободян, С.М. Слободян // Датчики и системы. – 2009. – № 12. – С. 49–51.

17. Скрыль Ю.В., Слободян С.М. Экспериментальная установка для исследования плазменных процессов высокочастотного емкостного разряда CO₂-лазера // Известия Алтайского гос. ун-та. – 2010. – № 1–2(56). – С. 188–191.

18. Пономарев А.А., Слободян С.М. Система автоматического контроля лазерной плазмы при воздействии на материалы // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 3. – С. 62–63.

19. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. – М.: Высшая школа, 1973. – 296 с.

References

1. Davidson D.W. Clathrate Hydrates, in *Water. A Comprehensive Treatise*, Plenum Press. New York, 1973, vol. 2, chap. 3, 115 p.

2. Gough S.R., Hawkins R.E., Morris B., Davidson D.W. Dielectric properties of some clathrate hydrates of structure II. *Journal of Physical Chemistry*, 1973, vol. 77, no. 5, pp. 2969–2976.

3. Debye P., Zimm B. *Teoriia elektricheskikh svoystv molekul* [Theory of electrical properties of molecules]. Moscow; Leningrad: Glavnaia redaktsiia obshchetechnicheskoi literatury, 1936. 144 p.

4. Maxwell J.C. *A Treatise of Electricity and Magnetism*. Oxford, Clarendon Press, 1892. 60 p.

5. Wagner K.W. Die Dielektrizitätskonstante des von Kugelförmigen Partikeln Arch. Electrotech, 1914, vol. 2. 371 p.

6. Charnyi I.A. *Podzemnaia gidrogazodinamika* [Underground hydraulic gas dynamics]. Moscow: Gostoptekhizdat, 1963.

7. Landau L.D., Lifshits E.M. *Elektrodinamika sploshnykh sred* [Electrodynamics of continuous media]. Moscow: GIFML, 1959. 532 p.

8. Gates F.K. Role of heat treatment in the processing and quality of oat flakes. Academic dissertation. University of Helsinki, 2007. 69 p.

9. Romanishina S., Katyuk D., Deeva V., Slobodian S. Dynamics layer of the sliding contact collector elements. *2015 IEEE 35th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO2015 – Conference Proceedings 7146848*, pp. 116-118, available at: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=7146848>. DOI: 10.1109/ELNANO.2015.7146848

10. Deeva V.S. Traektornoe rasseianie fraktsii skol'ziashchego kontakta [Trajectory dispersion of sliding contact fractions]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniia i radioelektroniki*, 2010, no. 2(22), part 1, pp. 249-254.

11. Deeva V.S., Slobodian S.M. Fizicheskaia model' prostranstva skol'ziashchego vzaimodeistviia sred [Sliding interaction environment space physical model]. *Izvestiia Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, no. 1/1(77), pp. 157-161.

12. Deeva V.S., Katiuk D.Iu., Slobodian S.M. Termodinamika sloia dinamicheskogo kontakta kondensirovannykh sred [Thermodynamics of layer dynamic contact by condensed mediums]. *Trudy IX Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Geologiya i neftegazonosnost' Zapadno-Sibirskogo megabasseina (opyt, innovatsii)"*. Tiumenskii gosudarstvennyi neftegazovyi universitet, 2014, pp. 15-18.

13. Berezovskii Iu.S., Slobodian S.M. Innovatsionnye tekhnologii razrabotki tonkikh plastov vysokoviazkoi nefti s podoshvennoi vodoi [Application of innovation technology to produce high viscosity oil from thin reservoir with bottom water and gas cap]. *Materialy VI Mezhdunarodnoi internet-konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov, studentov "Innovatsionnye tekhnologii: teoriia, instrumenty, praktika"*. Perm', 2014, pp. 72-79.

14. Katiuk D.Iu., Slobodian S.M. Model' nagreva dinamicheskogo sloia zhidkosti [The Model of heating the Dynamic liquid layer]. *Trudy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh "Sovremennye problemy matematiki"*. Ussuriisk: Dal'nevostochnyi federal'nyi universitet (filial v g. Ussuriiske), 2014. 56 p.

15. Deeva V.S., Elgina G.A., Lapshin V.B., Slobodyan M.S., Slobodyan S.M. Identification of space contact for dynamics medium. *International Conference on Informatics, Networking and Intelligent Computing (INIC2014)*. Shenzhen, China, 2014.

16. Ponomarev A.A., Skryl' Iu.V., Slobodian M.S., Slobodian S.M. Ustanovka dlia issledovaniia moshchnogo lazernogo vozdeistviia na polimernye struktury [Facility for study of high power laser effect to polymer structures]. *Datchiki i sistemy*, 2009, no. 12, pp. 49-51.

17. Skryl' Iu.V., Slobodian S.M. Eksperimental'naiia ustanovka dlia issledovaniia plazmennyykh protsessov vysokochastotnogo emkostnogo razriada CO₂-lazera [The experimental system for researching plasma processes in HF capacity discharge of CO₂-laser]. *Izvestiia Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, no. 1–2(56), pp. 188-191.

18. Ponomarev A.A., Slobodian S.M. Sistema avtomaticheskogo kontroliia lazernoi plazmy pri vozdeistvii na materialy [System for automated control of laser-induced heating of materials]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2010, no. 3, pp. 62-63.

19. Gukhman A.A. Vvedenie v teoriuu podobiiia [Introduction in theory verity]. Moscow: Vysshaiia shkola, 1973. 296 p.

Сведения об авторах

Деева Вера Степановна (Томск, Россия) – кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского Томского политехнического университета (634050, Томск, ул. Ленина, 30, e-mail: veradee@mail.ru).

Березовский Юрий Сергеевич (Томск, Россия) – аспирант Национального исследовательского Томского политехнического университета (634050, Томск, ул. Ленина, 30, e-mail: tomj@sibmail.com).

Скрыль Юрий Васильевич (Барнаул, Россия) – аспирант Алтайского государственного университета (656050, Барнаул, ул. Ленина, 61, e-mail: wind.jvs@mail.ru).

Слободян Степан Михайлович (Томск, Россия) – доктор технических наук, профессор Омского государственного технического университета, профессор Национального исследовательского Томского политехнического университета (634050, Томск, пр. Ленина, 30, e-mail: sms_46@ngs.ru).

Гусев Павел Юрьевич (Томск, Россия) – аспирант Национального исследовательского Томского политехнического университета (634050, Томск, ул. Ленина, 30, e-mail: p.y.gusev@gmail.com).

About the authors

Deeva Vera Stepanovna (Tomsk, Russian Federation) is a Ph.D. in Engineering, Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University (634050, Tomsk, Lenina ave., 30, e-mail: veradee@mail.ru).

Berezovsky Yuriy Sergeevich (Tomsk, Russian Federation) is an aspirant National Research Tomsk Polytechnic University (634050, Tomsk, Lenina ave., 30, e-mail: tomj@sibmail.com).

Skril Yury Vasilievich (Tomsk, Russian Federation) is an aspirant Altay State University (656038, Barnaul, Lenina ave., 46, e-mail: wind.jvs@mail.ru).

Slobodyan Stepan Mikhailovich (Tomsk, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Professor National Research Tomsk Polytechnic University (634050, Tomsk, Lenina ave., 30, e-mail: sms_46@ngs.ru).

Gusev Pavel Yurievich (Tomsk, Russian Federation) is an aspirant National Research Tomsk Polytechnic University (634050, Tomsk, Lenina ave., 30, e-mail: p.y.gusev@gmail.com).

Получено: 05.10.2015