

Информация о проекте, выполненного в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности

Задание № 13.1926.2014/К от 17.07.2014г.

Тема: Разработка научно-технических основ технологии добычи метана из газогидратных пластов каталитическим замещением на углекислый газ.

Приоритетное направление: Рациональное природопользование.

Критическая технология: Технологии поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи.

Период выполнения: 17.07.2014г. – 31.12.2016г.

Исполнитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» (кафедра физической и коллоидной химии)

Ключевые слова: гидрат метана, пористая среда, углекислый газ, термодинамический ингибитор, водонасыщенность, проницаемость, термобарические условия стабильности гидратов.

Научный руководитель: к.т.н., с.н.с. Гущин Павел Александрович.

1. Цель проекта:

Разработка научно-технических основ эффективной технологии добычи гидратного метана путем увеличения скорости и степени замещения метана на углекислый газ в природных газовых гидратах с использованием в качестве катализаторов процесса замещения термодинамических ингибиторов гидратообразования.

2. В 2014-2016 годах по проекту были проведены следующие работы:

- Аналитический обзор информационных источников;
- Патентные исследования по ГОСТ 15.011-96 в области методов и технологий добычи гидратного метана;
- Исследование влияния водонасыщенности и проницаемости пористых сред на процессы синтеза гидрата метана;
- Исследование влияния состава гидратообразующего газа на формирование гидратов в системе, содержащей метан, углекислый газ и водный раствор термодинамического ингибитора.
- Исследование влияния концентрации термодинамического ингибитора на образование гидратов в системе содержащей метан, углекислый газ и водный раствор термодинамического ингибитора.
- Экспериментальное определение эффективных реагентов-ускорителей (термодинамических ингибиторов гидратообразования) процессов замещения гидратного метана на углекислый газ в пористых средах.
- Изучение одновременной и последовательной закачки реагентов-ускорителей и углекислого газа при замещении гидратного метана в пористой среде.
- Исследование влияния проницаемости и гидратонасыщенности модельных пористых сред на процессы замещения гидратного метана на углекислый газ в присутствии реагентов-ускорителей процесса.
- Разработка рекомендаций по осуществлению технологии добычи метана из природных газовых гидратов с использованием каталитического метода замещения гидратного метана на углекислый газ.
- Проведение оценки технико-экономических показателей внедрения предлагаемой технологии добычи гидратного метана.

3. Основные результаты по проекту:

1) Анализ мирового опыта в исследуемой области показал, что существует пять методов добычи гидратного метана: традиционные (депресссионный, тепловой, ингибиторный, депрессионно-тепловой), а также метод, основанный на реакции замещения гидратного метана на углекислый газ. К основным недостаткам традиционных методов относятся необходимость подвода значительных количеств тепловой энергии в пласт, большое количество попутно добываемой воды. Альтернативный метод основан на протекании реакции замещения гидратного CH_4 на CO_2 . Углекислый газ может использоваться в качестве замещающего агента в газообразном, жидком состоянии или в виде эмульсии. К настоящему моменту отсутствуют примеры практического применения метода замещения для добычи метана из гидратных залежей. Текущее состояние исследований находится на уровне лабораторных экспериментов, направленных на выявление фундаментальных принципов реакции замещения. Проведенные в РГУ нефти и газа предварительные исследования показали, что сам по себе метод замещения вряд ли станет основным при добыче газа из газовых гидратов из-за низкой скорости процесса замещения (10^{-3} – 10^{-4} моль $\text{CH}_4/\text{л}$). Перспективным является подход, основанный на одновременном использовании замещающего агента (CO_2) и термодинамических ингибиторов. Совмещение заместительного и ингибиторного методов позволяет решить основные проблемы добычи гидратного метана. Во-первых, достигается тепловой баланс в пласте. За счет тепла реакции образования гидрата углекислого газа можно компенсировать потери тепла на разложение гидрата метана, т.е. не требуется подвод тепла с поверхности и не будет происходить охлаждение пласта. Во-вторых, применение термодинамических ингибиторов – катализаторов процесса диссоциации гидратов метана позволит ускорить процесс замещения гидрата метана на гидрат углекислого газа. В-третьих, увеличится степень извлечения газа за счет роста глубины превращения гидрата метана в гидрат углекислого газа. В-четвертых, обеспечит низкую обводненность добываемого газа. В-пятых, устранил опасность замерзания воды в гидратном пласте. Можно ожидать, что разрабатываемый метод будет подходить для месторождений с различной гидратонасыщенностью пористой среды, вплоть до 80-90 %, а также для добычи газа из месторождений, где гидрат является порообразующим компонентом.

2) Исследовано влияние водонасыщенности (30 – 77 %) и проницаемости пористых сред по газу ($0,34$ – $1,36$ мкм²) на процессы синтеза гидрата метана. Установлено, что период индукции при синтезе гидрата метана в пористой среде не предсказуем, носит стохастический характер. Причина этого заключается во флуктуационной природе процесса зародышеобразования. Показано, что основным параметром, влияющим на период индукции синтеза гидрата метана в пористой среде является степень превышения давления над равновесным при выбранной температуре (степень переохлаждения системы). При небольшой степени переохлаждения (< 2 °C) и при низкой водонасыщенности пористой среды образования гидрата (< 50 %) может не происходить длительное время (более 20 часов) или гидрат образуется в следовых количествах. Не обнаружено заметного влияния проницаемости и водонасыщенности пористой среды, на период индукции при синтезе гидрата метана. Проницаемость моделей гидратного пласта определяется исходной водонасыщенностью и проницаемостью. По мере роста исходной проницаемости и снижения начальной водонасыщенности проницаемость пористых сред с гидратами увеличивается. При водонасыщенности 55 % и выше в пористых средах образуются плотные гидратные пробки, при этом проницаемость по газу снижается до сверхнизкой ($< 0,0087$ мкм²). При водонасыщенности около 50 % в результате гидратообразования образуются пористые среды с низкой проницаемостью ($0,008$ – $0,015$ мкм²). При водонасыщенности равной 30 – 35 % пористые среды с гидратом имеют высокую проницаемость ($> 0,2$ мкм²).

3) Исследовано влияние состава гидратообразующего газа на формирование гидратов в системах, содержащих метан, углекислый газ. Равновесные условия гидратообразования бинарных смесей $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ определены при содержании метана от 0 до 50 % мол. в диапазоне давлений 14 – 56 бар, диапазоне температур от $-4\text{ }^\circ\text{C}$ до $+11,0\text{ }^\circ\text{C}$ для дистиллированной воды и 10 % раствора метанола (% масс.). Измерение равновесных условий гидратообразования проводили изохорным методом, включающим нагрев гидратсодержащей системы с постоянной скоростью $0,2\text{ }^\circ\text{C}/\text{ч}$. Установлено, что с увеличением содержания метана в газовых смесях равновесные кривые смещаются влево (в область более высоких давлений). Методом МНК определены коэффициенты уравнений регрессии вида $\ln P = A + BT$, отражающих зависимость давления от температуры на линии трехфазного равновесия «газ-жидкость-гидрат» для исследованных систем.

4) Разработана методика синтеза гидрата метана в пористых средах, позволяющая получать модели гидратного пласта с использованием стандартного оборудования для проведения потоковых (фильтрационных) экспериментов. Предложенная методика является универсальной, возможно получать гидраты различных газов (в том числе и кислых) в пористых средах различной проницаемости, водонасыщенности и типе смачиваемости породы.

5) Получены лабораторные образцы гидратов метана в пористых средах с различной водонасыщенностью (30 – 77 %) и проницаемостью по газу (0,34 – 1,36 мкм²). Полученные лабораторные образцы будут использованы для проведения экспериментальных исследований процесса замещения гидратного метана на углекислый газ в пористых средах на последующих этапах работы.

6) Проведено экспериментальное изучение влияния концентрации термодинамического ингибитора (ТИГ, метанол) на образование гидратов в системах содержащих метан, углекислый газ и водный раствор ТИГ. Экспериментальные данные по термобарическим условиям фазового равновесия получены для диапазона концентраций метанола в водной фазе 0 – 20 % масс., диапазона температур от $-4\text{ }^\circ\text{C}$ до $+4\text{ }^\circ\text{C}$, диапазона давлений 13 – 76 бар. На основании полученных данных выявлены закономерности влияния концентрации ТИГ на формирование гидратов в указанных системах. Данные закономерности позволяют оценить P,T-условия фазовой стабильности бинарных гидратов CH_4 и CO_2 в присутствии метанола.

7) Проведено экспериментальное определение эффективных реагентов-ускорителей (ТИГ) процессов замещения гидратного метана на углекислый газ в пористых средах. На основании полученных результатов разработаны рекомендации по применению конкретных ТИГ в качестве реагентов-ускорителей процессов замещения гидратного метана на углекислый газ в пористых средах. Была продемонстрирована возможность применения водных растворов моноэтиленгликоля (МЭГ) и метанола в качестве реагентов для разрушения гидрата метана в пористой среде. Однако из-за более высокой вязкости МЭГ фильтрационные характеристики его водных растворов значительно уступают растворам метанола. Более высокая вязкость водного раствора МЭГ создает значительные фильтрационные сопротивления при движении флюидов в пористых средах, замедляет процессы диссоциации гидрата метана и синтеза гидрата углекислого газа. В связи с этим в качестве реагента-ускорителя для добычи гидратного метана методом замещения на гидрат углекислого газа рекомендуется использовать метанол.

8) Проведено изучение одновременной и последовательной закачки реагентов-ускорителей (водные растворы CH_3OH) и углекислого газа при замещении гидратного метана в пористой среде. Показано, что для быстрого протекания процессов замещения гидрата метана на гидрат углекислого газа в пористой среде должно происходить движение флюидов. В покое скорости процессов быстро снижаются, по-видимому, из-за образования на поверхности частиц гидрата слоя обогащенного водой (при диссоциации гидрата метана) или спиртом (в случае синтеза гидрата углекислого газа). Сделаны выводы о целесообразности проведения одновременной и/или последовательной закачки реагентов-ускорителей и углекислого газа при реализации технологии до-

бычи гидратного метана. Проведенное исследование показало, что ускорить процесс замещения гидратного метана на углекислый газ можно при использовании как последовательной, так и одновременной закачки в гидратсодержащие пористые среды раствора CH_3OH и CO_2 . Однако последовательная закачка в пористые среды может быть реализована только в варианте чередующегося закачивания оторочек углекислого газа и раствора ТИГ. В противном случае значительной эффективности ожидать не следует из-за значительного охлаждения пласта в процессе диссоциации гидрата метана. Выбор технологии закачки реагентов-ускорителей и углекислого газа при реализации технологии добычи гидратного метана на конкретных реальных объектах рекомендуется проводить на основании результатов математического моделирования процессов с использованием данных о характеристиках гидратной залежи, термодинамики протекающих процессов образования и диссоциации гидратов, результатов физического моделирования, данных по теплофизическим характеристикам породы пласта и газовых гидратов, а также результатов проведения пилотных работ.

9) Предложен новый вариант метода добычи метана из гидратов с использованием его замещения на диоксид углерода. В варианте метода замещения медленный процесс замещения метана на углекислый газ в твердой гидратной фазе заменяется на совокупность двух быстрых процессов: на процесс разрушения гидрата метана под действием термодинамического ингибитора гидратообразования с высвобождением метана и воды, и на процесс синтеза вторичного гидрата углекислого газа из CO_2 и свободной воды, т.е. используется различная термодинамическая устойчивость гидратов метана и CO_2 в присутствии ингибитора гидратообразования.

10) Показано, что при изменении концентрации ингибитора меняются скорости разрушения гидрата метана, движения и прорыва газо-жидкостной смеси из метана, воды и ингибитора и значительно снижается скорость синтеза вторичного гидрата углекислого газа. Таким образом, замещающе-ингибиторный метод добычи гидратного метана и секвестрации парникового газа является управляемым процессом, и можно ожидать, что в пористой среде при последовательной фильтрации раствора ингибитора и CO_2 будет иметь место авторегулирование процесса.

11) Разработаны рекомендации по осуществлению технологии добычи метана из природных газовых гидратов с использованием каталитического метода замещения гидратного метана на углекислый газ. Для осуществления процесса добычи гидратного метана в нашей стране наиболее подходят северные районы Западной Сибири, т.е. основной регион добычи природного газа в нашей стране. В этих областях существует необходимая инфраструктура и специалисты. Значительная часть месторождений региона (например, сеноманские пласты) в настоящее время истощены, т.е. имеют низкое пластовое давление, и гидратный газ может быть подготовлен с использованием существующих установок подготовки газа. В верхних интервалах скважин часто имеются гидратные пласты, которые могут быть использованы как объекты испытания.

11) Рекомендуется при проведении работ по добыче гидратного метана осуществить следующие мероприятия.

1. Проектно-конструкторские работы, которые должны включать выбор и обоснование перспективного участка гидратного пласта, подготовку технической и технологической схемы бурения скважины (скважин) на участке, схему обустройства участка и первичной подготовки гидратного газа.

2. Проведение дополнительных экспериментальных исследований и математического моделирования процессов в условиях выбранного участка пласта.

3. Проведение работ на выбранном участке для подготовки промышленного испытания технологии.

4. Проведение опытных работ по закачиванию реагентов в пласт и пилотной добыче гидратного метана.

12) Для проведения испытаний гидратно-заместительного метода добычи метана рекомендуется использовать участки истощенных газовых месторождений в Северной Сибири, имеющих в верхних интервалах гидратные пласты. Подобный подход позволяет максимально использовать при опытных исследованиях (ОПИ) существующее оборудование, скважины и установки подготовки газа. Перед проведением испытания на участке ОПИ должен быть подготовлен полный комплект оборудования и установок для приема, хранения, закачивания флюидов в скважину, добычи и первичной подготовки продукции, а также должно иметься соответствующее факельное хозяйство. Основные этапы подготовительных работ должны включать как опытно-проектные, так и технические мероприятия. Задачей опытно-проектных работ является подготовка к ОПИ с учетом особенностей геологического и минералогического строения пласта, на примере которого будут проводиться ОПИ.

13) Проведена оценка технико-экономических показателей внедрения предлагаемой технологии добычи гидратного метана. Проведенный анализ показывает, что разработанная технология добычи гидратного метана каталитическим замещением на углекислый газ обладает значительным рыночным потенциалом, однако успешность ее применения в значительной мере зависит от результатов дальнейших исследований и опытно-промышленных испытаний. Предлагаемая технология является более эффективной по сравнению с аналогами (депресссионный, тепловой, депрессионно-тепловой и ингибиторный методы добычи), т.к. отсутствует необходимость подвода теплоты при реализации технологии для добычи гидратного метана. Кроме того, использование предлагаемой технологии позволяет одновременно производить захоронение парникового углекислого газа. Интерес мирового сообщества и некоторых крупных компаний к газогидратным месторождениям создают хорошие условия для развития предлагаемой технологии. Рыночный потенциал предлагаемой технологии сильно зависит от сроков проведения ее опытно-промышленных испытаний.

4. Назначение и предполагаемое использование результатов проекта:

Разработана методика оценки влияния проницаемости и гидратонасыщенности пористых сред на параметры реакции замещения гидратного метана на углекислый газ в присутствии реагентов-ускорителей. Установлено, что при высоких концентрациях ингибиторов скорость разрушения гидрата метана перестает зависеть от его концентрации и слабо зависит от типа ингибитора. Увеличение вязкости раствора ингибитора при последовательной закачке раствора ингибитора и CO₂ приводит к уменьшению скорости разрушения гидрата метана, замедлению прорыва газо-жидкостной смеси через пористую среду и ускоряет синтез гидрата углекислого газа. Прорыв жидкости (точнее газо-жидкостной смеси) через пористую среду определяется скоростью разложения гидрата метана и ускоряется по мере ее роста. При высоких концентрациях метанола и хлорида магния момент прорыва перестает зависеть от его концентрации. Показано, что наиболее перспективным ингибитором для разрушения первичного гидрата метана при использовании метода замещения является метанол, т.к. его концентрацию можно менять в широких пределах без заметного изменения его реологических свойств.

Полученные в работе экспериментальные результаты являются основой при разработке технологии добычи метана из природных газовых гидратов с использованием каталитического метода замещения гидратного метана на углекислый газ. Кроме того, полученные результаты будут использованы для проведения физического моделирования различных типов газогидратных коллекторов. Результаты научно-исследовательской работы могут быть полезны газодобывающим компаниям.

Перспективным направлением является поиск методов, позволяющих ускорить протекание реакции замещения гидрата метана на гидрат углекислого газа, а также проведение опытно-

промышленных испытаний технологии добычи гидратного метана на реальных природных объектах.

По результатам, полученным на первом этапе работы в 2014 году, было опубликовано:

- две статьи в научных журналах, в том числе 1 статья в журнале РИНЦ:
- А. П. Семенов, Э. С. Закиров, Д. С. Климов. Сравнительные лабораторные исследования процессов геосинтеза на модельных образцах геологических сред // Технологии нефти и газа – 2014.–№ 4(93). с. 33-37;
- 1 статья в журнале, индексируемом в базах данных Web of Science и Scopus:
- Anton P. Semenov, Vladimir I. Medvedev, Pavel A. Gushchin, Vladimir S. Yakushev. Effect of heating rate on the accuracy of measuring equilibrium conditions for methane and argon hydrates // Chemical Engineering Science. – 2015. – v. 137. – p. 161-169.
- исполнители работ по Проекту приняли участие в 2 научных конференциях, по результатам которых опубликовано 2 тезиса докладов:
- Anton P. Semenov, Vladimir S. Yakushev, Vladimir I. Medvedev, Pavel A. Gushchin. Influence of supercooling degree during formation of hydrates from methane propane mixture on their equilibrium dissociation conditions // Proceedings of 9th International Methane Hydrate R & D Workshop, Hyderabad India (Fiery Ice 2014, 8 –13 November 2014), p. 33;
- Петрушкина М.А., Лян Мэн, Зобов П.М., Хлебников В.Н. / Разработка методики синтеза гидрата метана в пористых средах различной проницаемости и водонасыщенности // Тезисы докладов Международной молодежной конференции «Наукоемкие технологии в решении проблем нефтегазового комплекса» (23-29 ноября 2014 г.). с. 132-133. – Уфа. – 2014.

По результатам, полученным на втором этапе работы в 2015 году, было опубликовано:

- три статьи в научных журналах, в том числе 1 статья в журнале РИНЦ:
- В.С. Якушев, А. П. Семенов, В. И. Медведев, П. А. Гуцин. Влияние скорости нагрева на точность определения равновесных условий гидратообразования при лабораторных испытаниях // ВЕСТНИК ЦКР РОСНЕДРА – 2015. –№ 1. с. 59-63;
- 2 статьи в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus:
- Medvedev V. I., Gushchin P.A., Yakushev V.S., Semenov A.P. Study of the Effect of the Degree of Overcooling During the Formation of Hydrates of a Methane-Propane Gas Mixture on the Equilibrium Conditions of Their Decomposition //Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2015. – Т. 51. – №. 5. – С. 470-479;
- Khlebnikov V.N., Liang M., Khamidullina I.V. Mechanism of selective permeability control in heterogeneous oil reservoirs by using precipitators and gelling agents // Shiyou Huagong Gaodeng Xuexiao Xuebao/Journal of Petrochemical Universities. Volume 28, Issue 6, 1 December 2015, Pages 71-79.
- монография И.М. Колесников, В.А. Винокуров, Иванов Е.В., Гуцин П.А., С.И. Колесников, М.Ю. Кильянов. Каталитические процессы нефтепереработки и нефтехимии. Монографическое издание. –М.: Изд-во «Нефть и газ», 2015 (Серия «Нефтепереработка и нефтехимия») 458 с.
- исполнители работ по Проекту приняли участие в 2 научных конференциях, по результатам которых опубликовано 2 тезиса докладов:
- Vladimir I. Medvedev, Pavel A. Gushchin, Vladimir S. Yakushev, Anton P. Semenov / Phase equilibrium for clathrate hydrate formed in methane + water + ethylene carbonate system // Proceedings of International Conference ICFMFEI-2015, Novosibirsk (1 – 5 October 2015), p. 50;
- Vladimir I. Medvedev, Pavel A. Gushchin, Vladimir S. Yakushev, Anton P. Semenov. Clathrate hydrate formation in ternary system of methane, water and ethylene carbonate // International Conference and Expo on Oil and Gas November 16-18, 2015 Dubai, UAE.

По результатам, полученным на третьем этапе работы в 2016 году, было опубликовано:

- 3 статьи в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus:
 - Semenov A.P., Medvedev V.I., Gushchin P.A., Kotelev M.S., Yakushev V.S., Stoporev A.S., Sizikov A.A., Ogienko A.G., Vinokurov, V.A. Phase equilibrium for clathrate hydrate formed in methane+ water+ ethylene carbonate system // *Fluid Phase Equilibria*. – 2017. – Т. 432. – С. 1-9;
 - Khlebnikov V.N., Antonov S.V., Mishin A.S., Bakulin D.A., Khamidullina I.V., Liang M., Vinokurov V.A., Gushchin P.A. A new method for the replacement of CH₄ with CO₂ in natural gas hydrate production // *Natural Gas Industry*. Volume 36, Issue 7, 25 July 2016, Pages 40-47;
 - Khlebnikov V.N., Mishin A.S., Antonov S.V., Khamidullina I.V., Liang Meng, Svarovskaya N.A. Comparison of oil displacement by gases and CO₂ using core model and slim tube // *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*. 2016, Volume 40, Issue 5, Pages 151-158.
 - Приняты к печати 2 статьи в журнале РИНЦ:
 - Хлебников В.Н., Антонов С.В., Мишин А.С., Лян Мэн, Хамидуллина И.В., Сваровская Н.А. Новый вариант заместительного метода добычи метана из газовых гидратов. Сообщение 1. Методика синтеза гидрата метана в насыпных проницаемых пористых средах (моделях гидратного пласта) // *Криосфера Земли* – 2017. в печати;
 - Хлебников В.Н., Антонов С.В., Мишин А.С., Лян Мэн, Хамидуллина И.В., Винокуров В.А. Новый вариант заместительного метода добычи метана из газовых гидратов. Сообщение 2. Обоснование ингибиторно-заместительного метода добычи метана из гидратов // *Криосфера Земли* – 2017. в печати.
 - исполнители работ по Проекту приняли участие в 3 научных конференциях, по результатам которых опубликовано 4 тезиса докладов:
 - Semenov A. P., Medvedev V. I., Gushchin P. A., Yakushev V. S., Vinokurov V. A. / Study of dual gas hydrate inhibitors // *Abstracts of Joint international conference minerals of the OCEAN-8 & deep-sea minerals and MINING-5, Vniiokeangeologia St. Petersburg, Russia (13 – 16 June 2016)*, p. 161-162;
 - Медведев В.И., Гушин П.А., Якушев В.С., Стопорев А.С., Семенов А.П. / Образование клатратных соединений в системе метан+вода+этиленкарбонат: определение условий фазового равновесия и структуры гидратов // *Тезисы докладов Международной конференции «Фазовые превращения в углеводородных флюидах: теория и эксперимент» (14-16 сентября 2016 г.)*. с. 43-44. – Москва. – 2016;
 - Хлебников В.Н., Антонов С.В., Мишин А.С., Лян Мэн, Винокуров В.А. / Методика синтеза гидрата метана в насыпных проницаемых пористых средах (моделях гидратного пласта) // *Тезисы докладов I Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы исследования нефтегазовых пластовых системы» (SPRS-2016) (12-14 сентября 2016 г.)*. с. 17. – Москва. – 2016;
 - Хлебников В.Н., Антонов С.В., Мишин А.С., Лян Мэн, Винокуров В.А. / Новый вариант заместительного метода добычи гидратного метана // *Тезисы докладов Международной конференции «Фазовые превращения в углеводородных флюидах: теория и эксперимент» (14-16 сентября 2016 г.)*. с. 37. – Москва. – 2016.
 - Получен патент РФ на изобретение № 2607849 «Способ добычи природного газа из гидратов», заявка № 2016105439 от 18.02.2016 г.
- Член коллектива исполнителей Лян Мэн представил к защите диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.17 – разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений на тему: Физическое моделирование вытеснения нефти газом (растворителем) с использованием керновых моделей пласта и slim tube. Защита состоится первой половине 2017 году в диссертационном совете Д 002.076.01 Института проблем нефти и газа Российской академии наук. <http://www.ipng.ru/node/292>.