

Вх. № 21/22  
от 18.05.22

## ОТЗЫВ НА АВТОРЕФЕРАТ

диссертации Бельских Дениса Сергеевича «Процесс теплового воздействия на гидратонасыщенную залежь с учетом разложения газового гидрата», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

Представленная к защите диссертационная работа «Процесс теплового воздействия на гидратонасыщенную залежь с учетом разложения газового гидрата» посвящена изучению теплового воздействия на осадочные породы, содержащие газовый гидрат. Актуальность данной темы связана с необходимостью развития новых технологий извлечения природного газа из нетрадиционных коллекторов и предотвращения неконтролируемой эмиссии метана в атмосферу из залежей, насыщенных газовым гидратом. Численные методы, достоверно отражающие основные физические процессы, происходящие в пористом гидратонасыщенном массиве при тепловом воздействии, дают существенные преимущества при проектировании промышленных технологий.

Выбранный автором способ теплового воздействия в форме нагнетания теплого газа (метана) в гидратонасыщенную залежь имеет свои недостатки и преимущества. Метан является ценным химическим и энергетическим сырьем, так что нагнетание метана в горные породы может стать экономическим препятствием на пути реализации подобных технологий. Еще одно неудобство в использовании метана как теплоносителя состоит в низкой объемной теплоемкости газа. В начальном состоянии полная теплоемкость газа, заключенного в массиве составляет порядка 0,08% от теплоемкости скелета массива. При поступлении в пласт дополнительной порции газа рост давления повышает стабильность газовых гидратов в значительно большей мере, чем возможное влияние роста температуры. Численные значения величин из автореферата и диссертации, соответствуют содержанию в  $1\text{ м}^3$  массива 3,29 кг метана при 281К. При нагнетании в выделенный объем массива еще 3,29 кг метана при температуре 293К давление газа повысится от 6,0 до 12,0 МПа, а температура, с учетом теплоемкости массива,



изменится от 281,0 до 281,4 К. Для принятых в автореферате и диссертации параметров и диапазона их изменений, нагнетание теплого газа в пласт не может привести к разложению газовых гидратов в каком-нибудь существенном объеме пласта. Этот факт, но по-другому сформулированный, отмечает также и автор в тексте диссертации. Однако, стоит отметить, что высокая проникающая способность и малая вязкость может, при определенных условиях, быть преимуществом в использовании газа в качестве теплового агента.

Автором выносятся на защиту физико-математическая модель тепловых процессов в залежи, учитывающая, среди прочих, одновременно и адиабатический эффект, и эффект Джоуля-Томсона. Действительно, при движении газа из области большего в область меньшего давления возникают неизотермические эффекты. В зависимости от условий происходит адиабатический эффект (изоэнтропический процесс) или эффект Джоуля-Томсона (изоэнтальпический процесс). Однако, возможность одновременного участия газа в двух разных процессах выглядит достаточно сомнительной. Понижение температуры в адиабатном процессе в несколько десятков раз больше чем в процессе Джоуля-Томсона, однако для реализации адиабатного процесса необходимо, чтобы газ совершал работу над внешними телами. Если скелет массива неподвижен, а кинетическая энергия движения газа пренебрежимо мала, то адиабатический эффект при фильтрационном течении возникать не может. Поступающий в массив газ может совершать работу только над тем газом, который уже находится в массиве, но тогда понижение внутренней энергии поступающего газа равно повышению внутренней энергии того газа, над которым совершили работу. Таким образом, при изучении фильтрационных течений учет адиабатических эффектов не является правомерным.

При формулировании задачи о закачке теплого газа в гидратонасыщенную залежь автором постулируется, что источником теплоты, поступающей в залежь, является теплый газ при достаточно большом давлении. Расход газа  $0,02 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м})$  эквивалентен подводимому к залежи потоку тепла (для изоэнтальпического течения учитываем только превышение температуры поступающего газа над начальной температурой залежи)  $0,5 \text{ кВт}/\text{м}$ , где  $\text{м}$  – погонный метр скважины, проходящей через залежь.



Автором диссертации принято, что при попадании газа в залежь температура газа и скелета выравнивается в каждом физически малом объеме массива. После начала нагнетания теплого газа температура массива вблизи скважины должна сначала монотонно расти, достигнуть температуры нагнетаемого газа, после чего, за счет конвективного переноса тепла область массива где температура почти равна температуре поступающего газа будет расширяться. Область постоянной температуры наблюдается на рис. 3 автореферата, где приведены результаты расчета М. К. Хасанова, но отсутствует на всех остальных рисунках, где демонстрируются расчеты, выполненный автором диссертации. Область, где температура массива близка к температуре набегающего газа обязательно возникает, а ее размеры в разные моменты времени есть предмет численных расчетов, ожидаемых от автора диссертации.

При установлении граничных условий автор диссертации ошибочно положил, что температура по периметру скважины мгновенно становится равной температуре поступающего газа и далее поддерживается таковой. При таких граничных условиях ошибочно вводится некий тайный источник тепла, мощность которого для начальных моментов времени гораздо больше чем располагаемое тепло газового потока. Но с течением времени градиент температуры вблизи скважины уменьшается и мощность тайного источника тепла станет меньше тепловой мощности газового потока, поступающего в пласт. Таким образом, принятые граничные условия не соответствуют сформулированной задаче. Это несоответствие, возможно, и стало причиной того, что при сравнении воздействия на залежь потоков газа 0,01 и 0,05 кг/(м\*с), что соответствует пятикратному увеличению теплоты, поступившей в пласт, наблюдаемые распределение температуры в пласте достаточно близки. По рис. 13 диссертации можно посчитать, что площадь под графиком температуры случая 2 всего примерно в 1.3 раза больше чем площадь под графиком температуры случая 1, хотя такие площади пропорциональны подведенному теплу и должны отличаться в пять раз. Площади посчитаны мной с учетом цилиндрической геометрии по превышению над начальной температурой 281 К и до радиуса 3м. Тепло, пошедшее на разложение газового гидрата здесь не учтено, но для кривой 1 оно заведомо больше чем для кривой 2, что еще сильнее



отклоняет полученное распределение температур от ожиданий. Возможно, такое несоответствие связано с неправильным учетом адиабатного эффекта, но в любом случае это говорит об ошибке.

Стоит обратить внимание, что на рис. 3 автореферата, где приведены результаты численных расчетов аналогичной задачи, выполненные М. К. Хасановым, фронту фазовых превращений соответствует четкий перегиб на графиках распределения температуры вдоль автомодельной координаты. В то время как на полученных автором распределениях давления и распределениях температуры отсутствуют перегибы, характерные для движения границы разложения газового гидрата. Эффект повышения давления при разложении газовых гидратов может размываться из-за большого буферного объема газа и высокого коэффициента пьезопроводности. Но на распределениях температуры должен наблюдаться четкий перегиб, соответствующий движению границы разложения газового гидрата. Оценки показывают, что при движении границы со скоростью 0,2 м/сутки на расстоянии 1 м от оси забоя потребляемая мощность составляет порядка 0,1 кВт/м, что вполне сравнимо с мощностью, подводимой к пласту. Полученные автором распределения температур и давлений не отражают характер продвижения границы фазового перехода с учетом теплового и барического эффекта.

С учетом указанных выше несоответствий численных расчетов физическим процессам, происходящим в газогидратной залежи, сложно оценить достоверность вывода автора, что во всех случаях разложение гидрата происходит на тонкой фронтальной поверхности, так что нигде в пласте не возникает трехфазной области, где одновременно в порах сосуществуют газовый гидрат, вода и газообразный метан. Странно, что такая область все-таки изображена на рис.1. Разложение газового гидрата на узкой фронтальной поверхности, автором отмечается как, по сути, единственная особенность фазовых превращений с разложением газовых гидратов, происходящих при тепловом воздействии на пласт. Отметим, что не только наличие фронта разложения, но его ширина и скорость перемещения при разных режимах нагнетания теплого газа несут в себе важную информацию, востребованную при проектировании новых техно-



логий промышленной добычи углеводородов. Представленный в диссертации и автореферате материал не оставляет сомнений, что автор способен исключить все неточности и получить достоверные данные, необходимые при разработке технологий теплового воздействия на гидратонасыщенную залежь.

В представленной на рассмотрение диссертации отмечено, что при нагнетании теплового газа в гидратонасыщенную залежь повышение давления оказывает стабилизирующее действие, а повышение температуры дестабилизирует газовый гидрат. Конкуренция двух таких процессов, вероятно, ограничивает предельный радиус области, в которой можно вызвать разложение газового гидрата в рамках проектируемого воздействия. Определение размеров такой области при различных режимах нагнетания теплового газа может стать важной особенностью изучаемого процесса. В рамках решаемой задачи можно предположить, что проектирование технологий с циклическим нагнетанием теплового газа и последующей откачкой газа из призабойной области позволит извлечь из призабойной области воду, исключить образования газового гидрата и облегчить доступ к основному объему гидратонасыщенной залежи. Для развития таких технологий представляется крайне важным корректное решение модельных задач, аналогичных тем, что сформулированы в представленной к рассмотрению диссертации. Численные методы, основанные на глубоких знаниях физических основ исследуемых тепловых процессов, являются эффективным способом решения таких задач.

Замечания по выполненной работе.

1. Неэффективный или недостаточно обоснованный выбор газообразного метана в качестве теплоносителя, посредством которого осуществляется тепловое воздействие на гидратонасыщенную залежь.
2. Некорректное рассмотрение при фильтрационном течении одновременно адiabатического эффекта и эффекта Джоуля-Томсона.
3. Несоответствие части граничных условий сформулированной задаче.



4. На полученных численными методами кривых распределения температуры и давления вдоль радиальной координаты отсутствуют признаки, отражающие тепловой эффект и барический эффект разложения газовых гидратов.

Высказанные замечанию затрагивают суть представленной на рассмотрение диссертационной работы. Таким образом, работа «Процесс теплового воздействия на гидратонасыщенную залежь с учетом разложения газового гидрата» не отвечает требованиями ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а соискателю Бельских Денису Сергеевичу в настоящее время не может быть присуждена ученая степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.



*Смирнов Вячеслав Геннадьевич, «14» апреля 2022 г.*

*ученая степень – кандидат физико-математических наук по специальности «02.00.04 физическая химия», ученое звание – доцент по специальности «теплофизика и теоретическая теплотехника», старший научный сотрудник Института угля и углехимии ФГБНУ Федерального исследовательского центра угля и углехимии, 650000 г. Кемерово, пр. Советский 18. Тел. 8(3842)364129. E-mail рецензента: smirnovvg@mail.ru*

*Подпись Смирнова В. Г. заверяю,*

*заместитель директора по научной работе ФИЦ УУХ СО РАН*



*Зиновьев В. В., «14» апреля 2022 г.*

