

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»

(РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина)

119991, г. Москва, Ленинский просп., д. 65, корп. 1, телефон: (499) 507-88-88 (многоканальный)
ОКПО 02066612; ОГРН 1027739073845; ИНН/КПП 7736093127/773601001
E-mail: com@gubkin.ru; <http://www.gubkin.ru>



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
К.Т.Н., доцент

П. К. Калашников
П. К. Калашников

«27» *сентября* 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Фадеевой Ирины Игоревны «Количественная оценка содержания газогидратов в песчаных средах по данным лабораторных экспериментов», представленную на соискание степени учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.6.9 Геофизика

Диссертационная работа Фадеевой Ирины Игоревны посвящена разработке новых способов оценки гидратосодержания песчаных сред, на основе проведенных в таких средах теплофизических измерений.

Основную роль в исследованиях гидратосодержащих пород играют лабораторные исследования, как правило, требующие использования специально разработанных экспериментальных установок. Наличие гидратов природного газа в мерзлоте или донных отложениях устанавливается главным образом при исследованиях кернов в лабораторных условиях. Если керн породы извлекается в герметичном пробоотборнике, то гидратосодержание устанавливается по массе или объему газа-гидратообразователя в нем, если в негерметичном, то по количеству поглощённого при разложении газогидрата тепла (метод теплового инфракрасного сканирования керна извлеченной породы).

Таким образом, **актуальность диссертационной работы** объясняется необходимостью разработки и верификации в лабораторных условиях новых способов оценки гидратосодержания осадочных пород на примере простых песчаных сред с дальнейшим обоснованием области их применения.

Цель диссертационной работы состояла в развитии геотермического метода оценки количественного содержания газогидратов в осадочных породах на примере песчаных сред.

Новизна и научная значимость исследования состоит в разработке новых способов оценки количественного содержания газогидратов в песчаных образцах с разной газопроницаемостью и влажностью в стабильных и нестабильных для существования газогидрата условиях; и в создании экспериментальной лабораторной установки, позволяющей моделировать гидратосодержащие среды и определять их теплофизические характеристики в широком диапазоне теплопроводности от 0.02 до 5 Вт/(м·К).

Разработанные способы обеспечивают новый подход в количественной оценке гидратосодержания песчаных пород с разной влажностью и газопроницаемостью. Эти способы чувствительны к наличию малых количеств газогидрата в породе за счет сопоставления измерений, проведенных в условиях стабильного существования газогидрата в породе и вне последних условий. Они применимы при низких температурах и высоких давлениях и могут быть адаптированы для полевых работ погружными геотермическими зондами. Полученные результаты могут стать основой для создания погружных зондов, измеряющих как теплофизические, так и электрические и акустические характеристики осадочных пород, что позволит при работах на акваториях определять содержание гидратов в донных отложениях без их поднятия на судно.

Верификация предложенных способов была выполнена в лабораторных условиях на созданной соискателем установке, позволяющей изготавливать гидратосодержащие образцы с разной влажностью и газопроницаемостью, а также определять их теплофизические характеристики с погрешностью не более 10 % в расширенном диапазоне

теплопроводности от 0.02 до 5 Вт/(м·К). Игольчатые зонды и измерительная аппаратура проверялись в калибровочных экспериментах на образцах с известными, из справочных данных или полученными независимо на сертифицированном приборе, теплофизическими характеристиками, охватывающими большую часть осадочных пород (от 0.1 до 4 Вт/(м·К)).

Достоверность полученных научных результатов подтверждается публикациями в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК и в докладах на всероссийских и международных конференциях.

Рассматриваемая работа объемом 131 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (197 наименования) и двух приложений.

Содержание работы

Во **введении** определены актуальность, цели и задачи, охарактеризован используемый в диссертации фактический материал, сформулированы защищаемые результаты, отмечен личный вклад автора, научная новизна, отмечена практическая значимость исследования, приведен список всероссийских и международных конференций с докладами результатов исследований.

В **первой главе** представлено состояние изученности газовых гидратов и гидратосодержащих пород и приведены их физические свойства, проанализированы известные методы обнаружения и оценки содержания газовых гидратов в природных условиях. Автор отмечает, что известные сегодня геофизические методы исследований гидратосодержащих пород имеют свою область применимости и свои ограничения и обращает внимание на возможность обнаружения придонных гидратных скоплений геотермическим методом, которая впервые была отмечена в 1998 г. В.А. Голубевым [Голубев, 1998]. Была поставлена задача количественной оценки гидратосодержания осадочной породы согласно определению ее теплофизических характеристик и описанию процесса разложения газогидрата в ней. В главе также анализируются известные методики измерений теплофизических характеристик песчаных, глинистых и других

сред, способы экспериментальных исследований гидратосодержащих сред и математические модели разложения газовых гидратов в пористых средах.

Во **второй главе** описана экспериментальная установка, созданная для моделирования гидратосодержащих сред с разной влажностью и газопроницаемостью и их исследования при низких температурах и высоких давлениях. Описаны доработанные измерительные игольчатые зонды (одноигольчатый и двухигольчатый) с регистрирующей системой и методики измерения теплофизических характеристик: для сред с относительно низкой теплопроводностью (до $1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) с помощью одноигольчатого зонда и для сред с относительно высокой теплопроводностью (до $5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) с помощью двухигольчатого зонда при постоянной мощности нагревателя. Калибровка измерительной аппаратуры проводилась автором на однородных образцах с известными, из справочных данных или полученными независимо на сертифицированном приборе, теплофизическими характеристиками, охватывающими большую часть осадочных пород ($0.1 \div 4$) $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ [Бабичев и др., 1991].

В **третьей главе** автором описан и экспериментально проверен способ количественной оценки гидратосодержания сред с высокой проницаемостью для газа. Идея способа состоит в измерении (с помощью внедренного в исследуемую гидратосодержащую среду игольчатого зонда) двух типов экспериментальных термограмм: стабильной и термограммы с разложением газогидрата. Первую измеряют в стабильных для существования газогидрата условиях, при малых мощностях нагревателя (S-термограмма). Термограмму с разложением (D-термограмма) получают при высокой мощности линейного нагревателя, такой, что в процессе нагрева температура гидратосодержащей среды превышает температуру диссоциации газогидрата, гидрат распадается, происходит поглощение тепла, при этом оценивается затраченная на разложение газогидрата энергия и объем, в котором произошло его разложение, и далее рассчитывается количество гидрата в единице объема среды вокруг зонда [Фадеева и др., 2016].

В **четвертой главе** автором описан и экспериментально проверен способ оценки гидратосодержания песчаных сред с низкой проницаемостью

для газа. Предлагаемый способ подразумевает определение теплофизических характеристик среды в двух ее состояниях: с газовым гидратом в порах, т.е. в условиях его стабильного существования (состояние 1), и вне условий его стабильного существования, когда после его полного разложения в порах остается вода и газ (состояние 2) [Фадеева и др., 2020]. Теплопроводность и температуропроводность гидратосодержащих образцов определялась с помощью двухигольчатого зонда по описанной во второй главе методике. Объемная теплоемкость рассчитывалась как отношение теплопроводности к температуропроводности и использовалась для оценки количества содержащегося в порах образца газогидрата.

Замечания

Весьма важным результатом работы являются способ оценки гидратосодержания пород с помощью теплофизических измерений при нагревании гидрата на основе расчета затраченной на разложение газогидрата энергии с выходом на оценку массы разложившегося гидрата. Но практически более полезным представляется способ расчета гидратосодержания пород по результатам сопоставления результатов измерения теплоемкости пород вокруг зонда при наличии газогидрата и после его разложения, а не до формирования гидратов.

Способы не проверены в полевых условиях, отмечаемое в работе равномерное распределение гидрата редко отвечает реальным геологическим средам.

Недостатком разработанного автором способа проведения измерений и количественной оценки содержания газогидратов является отсутствие возможности измерений при глубоком расположении пород, содержащих газогидраты. Глубина измерений ограничена длиной зонда. Кроме того, способ не работает в мерзлых гидратосодержащих породах.

Из работы не ясно, учитывались ли влияние минерализации поровых вод на равновесные условия гидратообразования и эффект Джоуля-Томсона при разложении газогидратов. Также неясно, учитывалась ли растворимость

газов в поровой воде при проведении расчетов гидратосодержания по величине выделяющегося при разложении гидратов газа.

Выражение (4.2), видимо, получено автором, но то, что теплоемкость породы определяется минеральным составом, является известным фактом и соответствующая ссылка не помешала бы.

Для обозначения петрофизических коэффициентов (пористости, водонасыщенности и др.) не используются общепринятые обозначения (K_p , K_v , и др.).

Общее заключение по диссертации

В целом работа производит очень хорошее впечатление, и глубиной обзора, и анализом материала и возможностью дальнейшего ее развития в геофизическом направлении. В будущем для нас, как специалистов по термометрии будет, видимо, интересен анализ особенностей теплового поля в присутствии гидратов, не только в лаборатории, но и в условиях пласта для контроля их образования с помощью термических исследований.

Диссертационная работа Фадеевой И.И. является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной и оформленной в соответствии с требованиями ВАК, в которой предложен новый подход по количественной оценке гидратосодержания песчаных пород. Суть работы хорошо изложена, диссертация написана грамотно и аккуратно оформлена. В автореферате диссертации в достаточной для понимания форме изложено содержание всех глав диссертации. Работа отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям пунктом 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства России от 24 сентября 2013 г. № 842. к кандидатским диссертациям, а её автор Фадеева Ирина Игоревна заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 1.6.9 Геофизика.

Диссертационная работа, автореферат и отзыв рассмотрены, обсуждены и одобрены на совместном заседании кафедр геофизических информационных систем и разработки и эксплуатации газовых и газоконденсатных месторождений РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.

Присутствовало 22 человек, с правом решающего голоса – 15 человек, из них 5 докторов наук и 10 кандидатов наук.

Результаты голосования: «за» – 15, чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел. Протокол № 2 от «01» марта 2024 г.

Заведующий кафедрой

геофизических информационных систем

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина,

доктор геолого-минералогических наук (1.6.9 Геофизика),

профессор



Коваленко Казимир Викторович

25.03.2024

Профессор кафедры

разработки и эксплуатации газовых и газоконденсатных месторождений

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина,

доктор геолого-минералогических наук

(1.6.11. Геология, поиски, разведка и эксплуатация

нефтяных и газовых

месторождений)



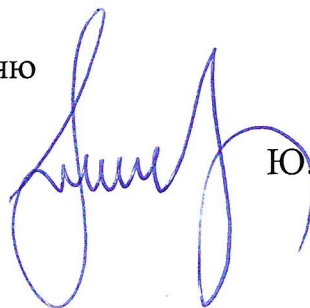
Якушев Владимир Станиславович

25.03.2024

Подписи Коваленко К.В. и Якушева В.С. заверяю

Начальник отдела кадров

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина



Ю.Е. Ширяев

РГУ нефти и газа (НИУ)
имени И.М. Губкина
Рег. № 2/400
от « 24 » 03 2024 г.