

Научная статья
УДК 531.3
DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-59-67

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ДИССОЦИАЦИИ ГАЗОГИДРАТА В ПЛАСТЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Сергей Михайлович Сысоев^{1✉}, Егор Аркадьевич Петров², Исмаил Эльшан оглы Джариев³
^{1,2,3} Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

¹ smsysyoev57@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-5180-571X>

² 86petrovegorg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4151-197X>

³ ismail.silver@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4068-1050>

Аннотация. В работе проведено численное исследование модели диссоциации газогидрата в пласте под действием сверхвысокочастотного электромагнитного излучения с частотами 400 МГц, 1 000 МГц и 2 450 МГц и показано, что процесс разложения газогидрата при этом воздействии идет быстрее при меньших значениях начальной гидратонасыщенности пласта, установлен значительно больший эффект частот 1 000 МГц и 2 450 МГц по сравнению с частотой 400 МГц и лучший результат при временах нагрева больших чем 400 ч с частотой 1 000 МГц по сравнению с частотой 2 450 МГц. С помощью предложенной математической модели можно определять оптимальные частоты источника излучения при заданном времени нагрева пласта конкретного месторождения, кроме того, полученный расчет энергоэффективности ($EROI \geq 10$) указанного метода добычи газа из газогидрата доказывает его конкурентоспособность по сравнению с традиционными методами термического воздействия на пласт.

Ключевые слова: математическая модель, пласт, гидратонасыщенность, сверхвысокочастотный электромагнитный нагрев, разложение газогидратов, добыча газа

Финансирование: настоящая работа выполнена в рамках проекта «Разработка, исследование и анализ физико-математических моделей для задач компьютерного инжиниринга высокотехнологичной продукции нефтегазовой отрасли» – победителя конкурсного отбора научных проектов в области фундаментальных и прикладных исследований, выполняемых научными коллективами образовательных организаций высшего образования, подведомственных Департаменту образования и науки Ханты-Мансийского автономного округа – Югры.

Для цитирования: Сысоев С. М., Петров Е. А., Джариев И. Э. Исследование модели диссоциации газогидрата в пласте под действием сверхвысокочастотного электромагнитного излучения // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 2. С. 59–67. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-59-67.

Original article

STUDYING THE GAS HYDRATE DISSOCIATION MODEL IN A RESERVOIR UNDER THE ACTION OF MICROWAVE RADIATION

Sergey M. Sysoev^{1✉}, Egor A. Petrov², Ismail E. Dzhariev³
^{1,2,3} Surgut State University, Surgut, Russia

¹ smsysyoev57@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-5180-571X>

² 86petrovegorg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4151-197X>

³ ismail.silver@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4068-1050>

Abstract. The article presents a numerical study of the gas hydrate dissociation model in a reservoir under the action of microwave electromagnetic radiation at 400 MHz, 1 000 MHz, and 2 450 MHz. The decomposition of gas hydrate under this influence is faster at lower values of the reservoir's initial hydrate saturation. The effects of 1 000 MHz and 2 450 MHz frequencies are much stronger than those of 400 MHz. The study shows that during heating times higher than 400 hours, 1 000 MHz frequency radiation electromagnetic heating is more efficient than that of 2 450 MHz frequency. Using the proposed mathematical model, it is possible to determine the

optimal frequencies of the radiation source at a given time of heating the reservoir of a particular field. Moreover, the resulting calculation of energy efficiency ($EROI \geq 10$) of this method for gas hydrate-extracted gas proves its competitiveness when compared to traditional methods of thermal impact on the reservoir.

Keywords: mathematical model, reservoir, hydrate saturation, microwave electromagnetic heating, gas hydrates decomposition, gas production

Funding: the study was carried out according to the project “Development, Research and Analysis of Physical and Mathematical Models for Computer Engineering Tasks of High-Tech Products of the Oil and Gas Industry”, which has won the competition of scientific projects in the field of fundamental and applied research carried out by research teams of educational institutions of higher education subordinate to the Department of Education and Science of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Ugra.

For citation Sysoev S. M., Petrov E. A., Dzhariev I. E. Studying the gas hydrate dissociation model in a reservoir under the action of microwave radiation. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(2):59–67. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-59-67.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие промышленности увеличивает потребность в энергетических ресурсах. Решением проблемы будут нетрадиционные источники углеводородного сырья, в частности газовые гидраты. Гидраты метана естественным образом образуются в определенных жестких условиях высокого давления и низкой температуры, главным образом на неглубоких континентальных окраинах, резко понижающемся морском дне и в районах вечной мерзлоты [1–5].

На молекулярном уровне гидраты метана представляют собой твердые кристаллические соединения, состоящие из извлекаемого газообразного метана, заключенного в ледяную оболочку из молекул воды. Извлечение метана из его гидрата требует индуцированного изменения состояния гидратного равновесия, которое может разрушить молекулярную оболочку воды и высвободить газообразный метан [1, 6]. Процесс диссоциации гидрата метана является эндотермическим по своей природе и, следовательно, требует дополнительного тепла от внешних источников. Наиболее широко распространенные методы извлечения газа включают сброс давления, термическую стимуляцию и химическое ингибирование.

С развитием технологий появилось также несколько новых методов термической стимуляции, например, сжигание и сверхвысокочастотный (СВЧ) электромагнитный нагрев. СВЧ-волны – это электромагнитные волны, которые обычно обладают длиной волны порядка от 1 мм до 1 м и частотами в диапазоне от 300 МГц до 300 ГГц [7–9]. Взаимодействие этих электромагнитных волн с диэлектрической средой вызывает значительные диполь-

ные вращения, которые генерируют распределенные источники тепла в диэлектрической среде. СВЧ-нагрев с номинальной частотой 400 МГц, 1 000 МГц и 2,45 ГГц играет важную роль во многих практических задачах, таких как обработка пищевых продуктов, термическая обработка, вулканизация и сушка. В контексте диссоциации гидрата метана СВЧ-излучение может обеспечить быстрый нагрев, альтернативный традиционным методам термической стимуляции [7–10]. Вода – это диэлектрический материал, обладающий отличной реакцией на микроволны. Наличие воды в гидратных залежах и выделение избытка воды из-за диссоциации гидрата создают благоприятные условия для применения нагрева СВЧ-излучением [9].

Теоретическое исследование тепломассопереноса в газогидратном пласте при его нагреве высокочастотным электромагнитным излучением проводилось на одно- и двумерных моделях. В исследованиях [11, 12] изучались процессы фильтрации в пористых средах, заполненных твердым газогидратом или жидкостью, с депрессией и тепловыми эффектами (в том числе электромагнитным нагревом), приводящими к фазовым переходам (разложение газогидрата, кипение жидкости). В качестве дополнения к вычислительному моделированию разложения гидрата газа в пористых средах под действием СВЧ электромагнитного нагрева предлагается применение решетчатой модели пористой среды на основе теории перколяции для прогнозирования динамики емкостных характеристик пластов при фильтровании различных активных растворов [13].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Моделирование разложения газового гидрата выполняется в среде, представляющей горизонтальный пласт толщиной H , помещенный между кровлей и подошвой, характеристики которых отличны от пласта. Газогидрат и скелет пористой породы являются несжимаемыми и неподвижными, газ совершенный, капиллярные эффекты не учитываются [14–16].

Источник, излучающий электромагнитные волны в радиальном направлении, помещен в скважину на уровне пласта. Поглощение электромагнитной энергии вокруг скважины приводит к разогреву пласта и прилегающих пород, вследствие вызывающее диссоциацию гидрата метана.

При моделировании используются уравнения баланса массы газовой, водной и гидратной фаз, уравнение энергетического баланса, обобщенный закон Дарси для воды и газа [16], уравнение кинетики Кима – Бишной [17] для реакции разложения гидрата. Система замкнута условием равновесия смеси. Система уравнений сводится к четырем дифференциальным уравнениям относительно температуры, давления, гидрато- и водонасыщенности с соответствующими граничными и начальными условиями.

Моделирование разложения гидрата газа в пористых средах под действием СВЧ электромагнитного нагрева проводилось методом конечных элементов. Значения физических параметров характерны для типичного газогидратного пласта [16].

В работе проведено численное исследование модели диссоциации газового гидрата в поровой среде пласта класса 3 под воздействием СВЧ-излучения. Расчеты были выполнены для разрешенных в промышленном использовании частот СВЧ-излучения 400 МГц, 1 000 МГц и 2,45 ГГц. Исследование модели было проведено для нагрева пласта СВЧ-излучением при условии, что давление в скважине было выше давления в пласте – режим репрессии. В этом случае происходит инжекция флюида в пласт.

При репрессиионном воздействии на пласт из-за созданного градиента давления между скважиной и пластом происходит течение воды и газа вдоль радиального направления от скважины. Наиболее интенсивное поглощение СВЧ-излучения водой происходит

в околоскважинной области. Течение нагретой воды вглубь пласта создает значительный конвективный теплоперенос, который способствует эффективной диссоциации газового гидрата.

Моделирование процесса нагрева пласта выполнялось методом конечных элементов с помощью пакета программ COMSOL Multiphysics – интерактивной среды для решения научных задач, использующих дифференциальные уравнения в частных производных. Вычислительный алгоритм метода конечных элементов основан на процедуре минимизации функционала, соответствующего решаемой непрерывной задаче. В результате выполнения указанной процедуры происходит замещение системы уравнений в частных производных системой алгебраических уравнений, имеющих в качестве коэффициентов аппроксимирующие функции, которые фактически являются значениями искомой функции в вершинах разбиения.

В настоящей работе вычислительный домен задачи разбивался приблизительно на 40 000 конечных элементов, имеющих вид треугольников. Сетка конечных элементов была неравномерная. Сгущение элементов производилось в областях предполагаемого наиболее сильного изменения температуры и напряженностей электромагнитного поля, т. е. вблизи источника излучения и на границах раздела пластоокружающие породы, где размер конечных элементов более чем в 10 раз был меньше длины волны излучения. В качестве базисных функций использовались кусочно-непрерывные квадратичные полиномы Лагранжа. Число степеней свободы задачи было равно приблизительно 170 000. Численное интегрирование, необходимое для нахождения элементов якобиана, выполнялось с помощью квадратурных формул Гаусса. Для решения систем линейных алгебраических уравнений использовался метод Гаусса, адаптированный к использованию сильно разреженных матриц. Относительная точность вычислений на каждом шаге итерационного процесса составляла 0,01. Вычисления выполнялись на компьютере, имеющем процессор с тактовой частотой 3,33 ГГц и оперативную память 64 Гб. Типичное время расчета составляло приблизительно 10 часов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе было проведено численное исследование модели диссоциации газового гидрата, вызванной нагревом гидратосодержащего пласта вследствие действия на него СВЧ электромагнитного излучения, для обоснования конкурентоспособности нового метода добычи газа из газогидрата по критерию энергоэффективности.

Пласт подвергался репрессзионному воздействию величиной ΔP от 10 до 40 атм. Гидратонасыщенность пласта s_h заключалась в диапазоне от 0,4 до 0,8. Исследуемый диапазон проницаемостей пласта от $K_0 = 3 \times 10^{-13} \text{ м}^2$ до $K_0 = 3 \times 10^{-15} \text{ м}^2$. Частоты СВЧ электромагнитного излучения принимались равными $f = 400 \text{ МГц}$; $1\,000 \text{ МГц}$; $2\,450 \text{ МГц}$. Мощность источника излучения равна $W = 5\,000 \text{ Вт}$. В результате исследования модели получены пространственные и временные распределения гидратонасыщенности s_h , водонасыщенности s_w и газонасыщенности s_g в пласте, а также рассчитаны масса диссоциировавшего под действием на него СВЧ электромагнитного излучения газогидрата и объем выделившегося вследствие разложения газогидрата газа.

При репрессзионном воздействии вода и газ вдавливаются в пласт, занимая освободившийся от газогидрата объем пор пласта, и осуществляют тепловой контакт с газогид-

ратом на фазовой границе. Таким образом, диссоциация газогидрата происходит как вследствие объемного выделения теплоты при поглощении им СВЧ электромагнитного излучения, так и на фазовой границе «вода – газогидрат» путем теплопередачи.

На рис. 1 приведены пространственные распределения гидратонасыщенности s_h , водонасыщенности s_w и газонасыщенности s_g в пласте вдоль радиального направления от источника излучения, находящегося в скважине, для двух значений начальной гидратонасыщенности – 0,4 и 0,8.

Из рис. 1 видно, что происходит пространственное разложение газогидрата в объемной области, заключенной в пределах от $r = 4,5 \text{ м}$ до $r = 15 \text{ м}$ для времени нагрева $t = 240 \text{ ч}$. Значительное увеличение водонасыщенности s_w наблюдается вблизи границы «вода – газогидрат», вызванное репрессзионным воздействием на пласт. При одинаковом воздействии СВЧ электромагнитного излучения на пласты с разными значениями начальной гидратонасыщенности объем зоны с полным разложением газогидрата больше для случая с меньшим значением начальной гидратонасыщенности.

На рис. 2 приведены зависимости массы разложившегося газогидрата от времени нагрева при репрессзионном воздействии на пласт для двух значений начальной гидратонасыщенности – 0,4 и 0,8.

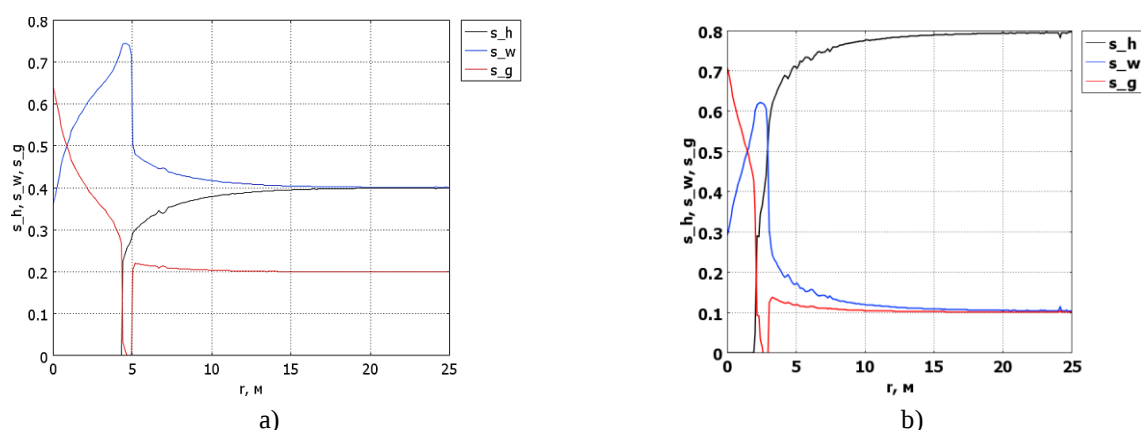


Рис. 1. Зависимость гидрато-, водо-, газонасыщенностей в пласте от радиального расстояния для времени нагрева $t = 240 \text{ ч}$ при репрессзионном воздействии на пласт:

а) начальная гидратонасыщенность $s_h = 0,4$; б) начальная гидратонасыщенность $s_h = 0,8$

(параметры источника излучения: частота излучения $f = 400 \text{ МГц}$, мощность $W = 5 \text{ кВт}$)

Примечание: составлено авторами.

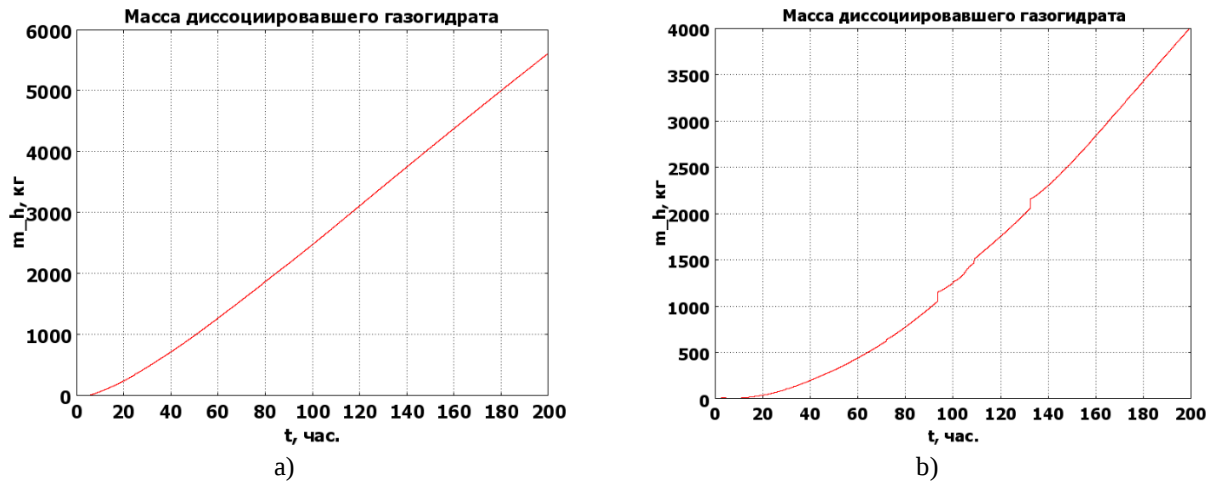


Рис. 2. Зависимость массы диссоциировавшего газогидрата от времени нагрева при репрессиионном воздействии на пласт:

а) начальная гидратонасыщенность $s_h = 0,4$; б) начальная гидратонасыщенность $s_h = 0,8$
(параметры источника излучения: частота излучения $f = 400$ МГц, мощность $W = 5$ кВт)

Примечание: составлено авторами.

Значение массы диссоциировавшего газогидрата за время нагрева пласта СВЧ электромагнитным излучением $t = 240$ ч составляет для пласта с начальной гидратонасыщенностью 0,4 – 5 500 кг, а для пласта с начальной гидратонасыщенностью 0,8 – 4 000 кг. Полученные значения массы диссоциировавшего газогидрата также указывают на то, что процесс разложения газогидрата под воздействием СВЧ электромагнитного излучения идет быстрее при меньших значениях начальной гидратонасыщенности.

В работе исследовалось влияние частоты СВЧ электромагнитного излучения на процесс диссоциации газогидрата в пласте. При исследовании модели частоты СВЧ электромагнитного излучения принимались равными $f = 400$ МГц; 1 000 МГц; 2 450 МГц. Мощность источника излучения равна 5 000 Вт.

На рис. 3–5 приведены зависимости массы диссоциировавшего газогидрата и объема выделившегося газа в пласте от времени нагрева СВЧ электромагнитным излучением с частотами 400 МГц, 1 000 МГц, 2 450 МГц соответственно.

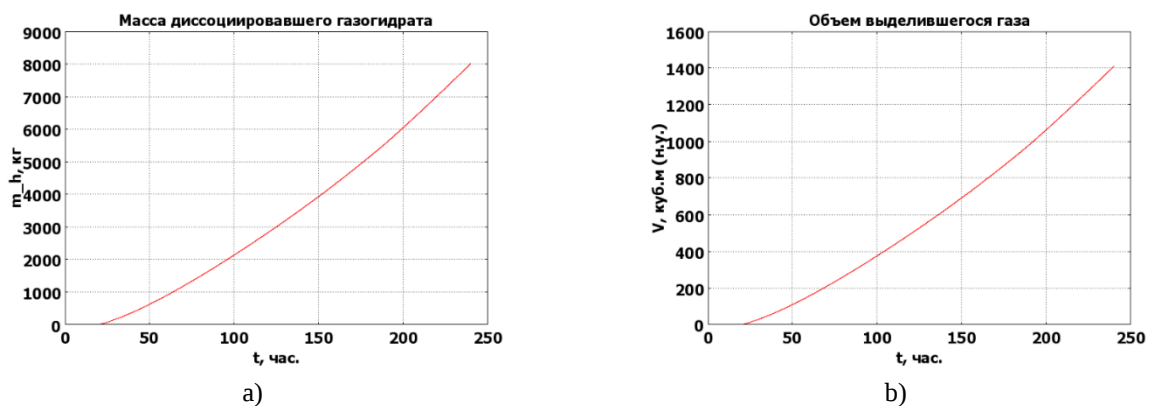


Рис. 3. Зависимость массы диссоциировавшего газогидрата (а) и объема выделившегося газа в пласте (б) от времени нагрева

(параметры источника излучения: частота излучения $f = 400$ МГц, мощность $W = 5$ кВт, начальная гидратонасыщенность $s_h = 0,4$)

Примечание: составлено авторами.

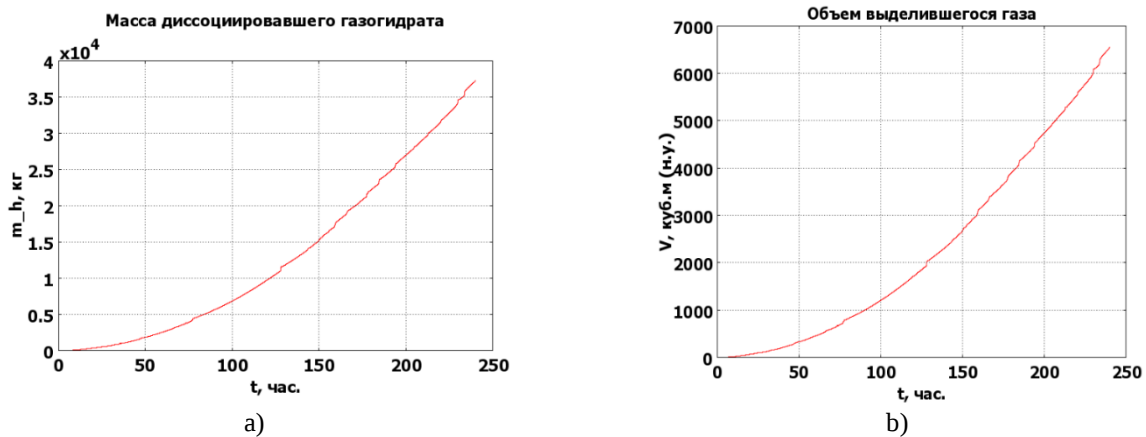


Рис. 4. Зависимость массы диссоциировавшего газогидрата (а) и объема выделившегося газа в пласте (б) от времени нагрева

(параметры источника излучения: частота излучения $f = 1\,000$ МГц,
мощность $W = 5$ кВт, начальная гидратонасыщенность $s_h = 0,4$)

Примечание: составлено авторами.

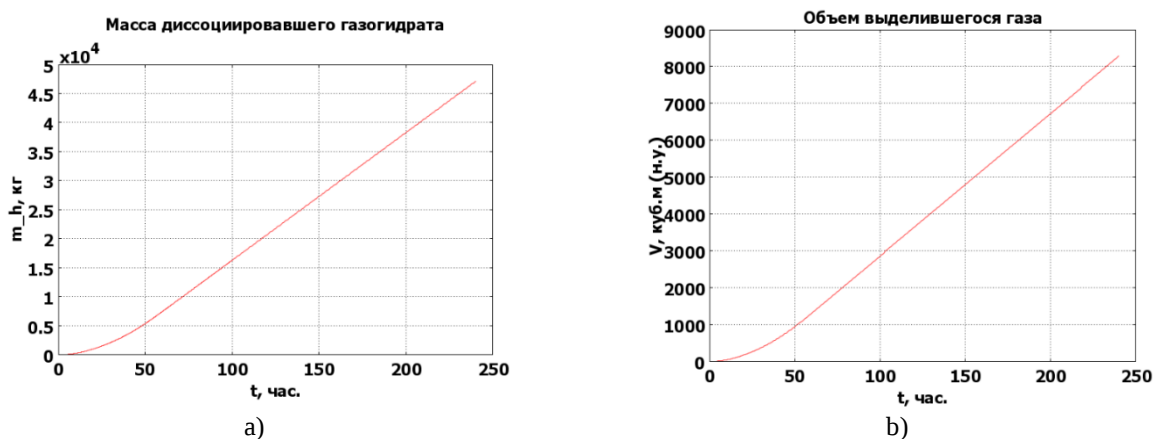


Рис. 5. Зависимость массы диссоциировавшего газогидрата (а) и объема выделившегося газа в пласте (б) от времени нагрева

(параметры источника излучения: частота излучения $f = 2\,450$ МГц,
мощностью $W = 5$ кВт, начальная гидратонасыщенность $s_h = 0,4$)

Примечание: составлено авторами.

Анализ представленных на рис. 3–5 результатов исследований модели показал, что за время нагрева пласта $t = 240$ ч СВЧ электромагнитным излучением с частотой 400 МГц получили значение массы диссоциировавшего газогидрата равное 8 000 кг, с частотой 1 000 МГц – 37 000 кг, с частотой 2 450 МГц – 47 000 кг. Видно, что СВЧ электромагнитного нагрева излучением с частотами 1 000 МГц и 2 450 МГц имеет значи-

тельно больший эффект по сравнению с частотой 400 МГц.

Дальнейшее сравнение результатов нагрева пласта СВЧ электромагнитным излучением с частотами 1 000 МГц и 2 450 МГц было проведено для больших времен нагрева.

На рис. 6 приведены зависимости массы диссоциировавшего газогидрата в пласте от времени нагрева в интервале от 0 до 720 ч СВЧ электромагнитным излучением с частотами 1 000 МГц и 2 450 МГц соответственно.

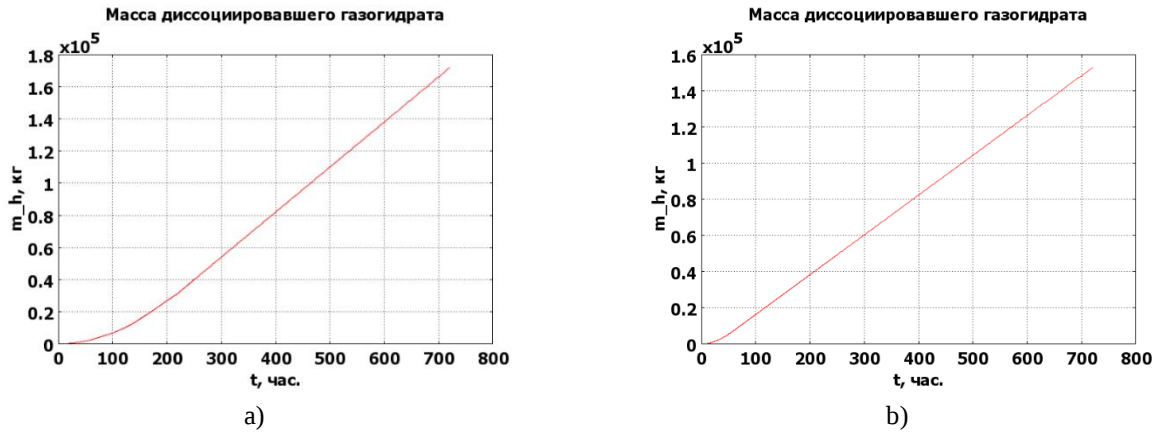


Рис. 6. Зависимость массы диссоциировавшего газогидрата от времени нагрева сверхвысокочастотным электромагнитным излучением с частотами:
а) $f = 1000 \text{ МГц}$; б) $f = 2450 \text{ МГц}$ (начальная гидратонасыщенность $S_h = 0,4$)
Примечание: составлено авторами.

Из рис. 6 видно, что за время нагрева пласта $t = 720$ ч СВЧ электромагнитным излучением с частотой 1000 МГц получили значение массы диссоциировавшего газогидрата равное 170000 кг , с частотой 2450 МГц – 150000 кг . Видно, что СВЧ электромагнитный нагрев излучением с частотой 1000 МГц имеет больший эффект по сравнению с частотой 2450 МГц при временах нагрева больших чем 400 ч.

В работе был произведен расчет энергоэффективности метода добычи газа из газогидрата с использованием СВЧ электромагнитного разогрева излучением с частотами 1000 МГц и 2450 МГц . Энергетическую эффективность

добычи газа из газогидрата с использованием СВЧ электромагнитного нагрева пласта определяем по коэффициенту энергоэффективности $K = \text{EROI}$ ($\text{EROI} = \text{Energy return on invested}$), равному отношению получаемой энергии в результате сжигания добытого газа Q_{CH_4} и потребленной энергии из-за работы источника СВЧ электромагнитного излучения $E_{ЭМ}$ [16].

На рис. 7 приведены зависимости коэффициента энергоэффективности K от времени нагрева в интервале от 0 до 720 ч СВЧ электромагнитным излучением с частотами 1000 МГц и 2450 МГц соответственно.

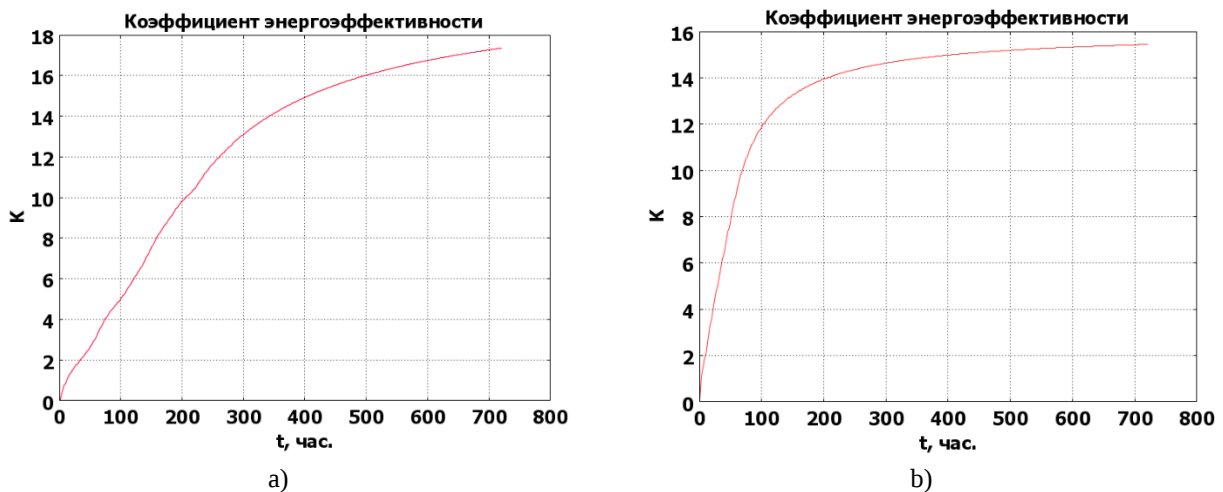


Рис. 7. Зависимость коэффициента энергоэффективности K от времени нагрева
а) $f = 1000 \text{ МГц}$; б) $f = 2450 \text{ МГц}$ (начальная гидратонасыщенность $S_h = 0,4$)
Примечание: составлено авторами.

Из рис. 7 видно, что коэффициент энергоэффективности превышает значение 10 при временах нагрева излучением с частотой 1 000 МГц больших чем 200 ч, с частотой 2 450 МГц – 80 ч. Принято считать, что технология эффективна, если $K = EROI \geq 10$. Таким образом, новый метод добычи газа путем диссоциации газового гидрата, вызванной нагревом гидратосодержащего пласта вследствие действия на него СВЧ электромагнитного излучения, можно считать приемлемым с точки зрения энергетической эффективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе впервые проведено исследование модели диссоциации газогидрата в пласте под действием сверхвысокочастотного электромагнитного излучения для разрешенных в промышленном использовании частот 400 МГц, 1 000 МГц и 2 450 МГц. В результате проведения численного исследования модели диссоциации газогидрата в пласте показано, что процесс разложения газогидрата под воздействием сверхвысокочастотного электромагнитного излучения идет быстрее при меньших значениях начальной гидратонасыщенности. Также было уста-

новлено, что электромагнитный нагрев излучением с частотами 1 000 МГц и 2 450 МГц имеет значительно больший эффект по сравнению с частотой 400 МГц. При временах нагрева больших чем 400 часов, электромагнитный нагрев излучением с частотой 1 000 МГц дает лучший результат по сравнению с частотой 2 450 МГц.

Таким образом, для повышения эффективности применения метода добычи газа из газогидрата путем сверхвысокочастотного электромагнитного нагрева газогидратного пласта можно с помощью предложенной в работе математической модели определять оптимальные частоты источника излучения при заданном времени нагрева пласта конкретного месторождения.

В работе произведен расчет энергоэффективности нового метода добычи газа из газогидрата с использованием сверхвысокочастотного электромагнитного разогрева излучением с частотами 1 000 МГц и 2 450 МГц и показано, что этот метод может быть эффективным ($EROI \geq 10$) и конкурентоспособным по сравнению с традиционными методами термического воздействия на пласт.

Список источников

1. Makogon Y. F. Natural gas hydrates – A promising source of energy. *Journal of natural gas science and engineering*. 2010;2(1):49–59.
2. Мастепанов А. М. Газогидраты в перспективном мировом энергетическом балансе: оценки, проблемы и необходимые условия // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2014. № 5. С. 42–48.
3. Chong Z. R., Yang S. H. B., Babu P. et al. Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges. *Applied Energy*. 2016;162:1633–1652.
4. Гудзенко В. Т., Вареничев А. А., Громова М. П. Мировая экономика и газогидраты // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 10. С. 43–57. DOI 10.25018/0236-1493-2018-10-0-43-57.
5. Yang J., Okwananke A., Tohidi B. et al. Flue gas injection into gas hydrate reservoirs for methane recovery and carbon dioxide sequestration. *Energy Convers Manage*. 2017;136:431–438.
6. Якушев В. С. Разработка нетрадиционных ресурсов газа в России // Газовая промышленность. 2013. № 6. С. 20–24.

References

1. Makogon Y. F. Natural gas hydrates – A promising source of energy. *Journal of natural gas science and engineering*. 2010;2(1):49–59.
2. Mastepanov A. M. Use of gas-hydrates in perspective world energy balance: Evaluation, problems and the required conditions. *Problems of Economics and Management of Oil and Gas Complex*. 2014;(5):42–48. (In Russian).
3. Chong Z. R., Yang S. H. B., Babu P. et al. Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges. *Applied Energy*. 2016;162:1633–1652.
4. Gudzenko V. T., Varenichev A. A., Gromova M. P. World economy and gas-hydrates. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(10):43–57. DOI 10.25018/0236-1493-2018-10-0-43-57. (In Russian).
5. Yang J., Okwananke A., Tohidi B. et al. Flue gas injection into gas hydrate reservoirs for methane recovery and carbon dioxide sequestration. *Energy Convers Manage*. 2017;136:431–438.
6. Yakushev V. S. Razrabotka netraditsionnykh resursov gaza v Rossii. *Gazovaia promyshlennost*. 2013;(6):20–24. (In Russian).
7. Shang S., Gu L., Zhan L. et al. Application of horizontal well to gas production from a hydrate reservoir

7. Shang S., Gu L., Zhan L. et al. Application of horizontal well to gas production from a hydrate reservoir with free gas and high irreducible water. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2021;94:104102.
8. Zhu J., Yi L., Yang Z. et al. Numerical simulation on the in situ upgrading of oil shale reservoir under microwave heating. *Fuel*. 2021;287:119553.
9. Zhao J., Liu Y., Guo X. et al. Gas production behavior from hydrate-bearing fine natural sediments through optimized step-wise depressurization. *Applied Energy*. 2020;260:114275.
10. Feng J. C., Wang Y., Li X.-S. Dissociation characteristics of water-saturated methane hydrate induced by huff and puff method. *Applied Energy*. 2018;211:1171–1178.
11. Wang B., Dong H., Fan Z. et al. Numerical analysis of microwave stimulation for enhancing energy recovery from depressurized methane hydrate sediments. *Applied Energy*. 2020;262:114559.
12. Gupta A. K., Yadav R., Das M. K. et al. Implementation of a multi-layer radiation propagation model for simulation of microwave heating in hydrate reservoirs. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2021;32(2):684–713.
13. Петров Е. А., Джариев И. Э., Попов О. Р. и др. Подход к прогнозированию универсальных динамических процессов на примере моделирования электромагнитного воздействия на газогидратные пласты // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 6. С. 56–66. DOI 10.25018/0236_1493_2023_6_0_56.
14. Сысоев С. М., Алексеев М. М. Численное моделирование нагрева нефтесодержащего пласта сверхвысокочастотным электромагнитным излучением // Вестник кибернетики. 2019. № 4. С. 6–16.
15. Джариев И. Э., Петров Е. А., Сысоев С. М. Учет долговременного влияния электромагнитного разогрева нефтяного пласта на дебит скважины // Проблемы и решения автоматизации XXI века : сб. материалов V Национал. науч.-практич. студ. конф., 25–26 марта 2022 г., г. Сургут. Сургут : ИЦ СурГУ, 2022. С. 27–33.
16. Сысоев С. М., Алексеев М. М., Петров Е. А. Численное моделирование процесса разложения газогидрата в пористой среде, вызванного сверхвысокочастотным электромагнитным нагревом // Вестник кибернетики. 2021. № 2. С. 60–71. DOI 10.34822/1999-7604-2021-2-60-71.
17. Kim H. C., Bishnoi P. R., Heidemann R. A. et al. Kinetics of methane hydrate decomposition. *Chemical Engineering Science*. 1987;42(7):1645–1653.
- with free gas and high irreducible water. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2021;94:104102.
8. Zhu J., Yi L., Yang Z. et al. Numerical simulation on the in situ upgrading of oil shale reservoir under microwave heating. *Fuel*. 2021;287:119553.
9. Zhao J., Liu Y., Guo X. et al. Gas production behavior from hydrate-bearing fine natural sediments through optimized step-wise depressurization. *Applied Energy*. 2020;260:114275.
10. Feng J. C., Wang Y., Li X.-S. Dissociation characteristics of water-saturated methane hydrate induced by huff and puff method. *Applied Energy*. 2018;211:1171–1178.
11. Wang B., Dong H., Fan Z. et al. Numerical analysis of microwave stimulation for enhancing energy recovery from depressurized methane hydrate sediments. *Applied Energy*. 2020;262:114559.
12. Gupta A. K., Yadav R., Das M. K. et al. Implementation of a multi-layer radiation propagation model for simulation of microwave heating in hydrate reservoirs. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2021;32(2):684–713.
13. Petrov E. A., Dzhariev I. E., Popov O. R. et al. An approach to prediction of universal dynamic processes: A case-study of modeling electromagnetic effect on gas-hydrate strata. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(6):56–66. DOI 10.25018/0236_1493_2023_6_0_56. (In Russian).
14. Sysoev S. M., Alekseev M. M. Numerical simulation of the microwave heating of an oil reservoir. *Proceedings in Cybernetics*. 2019;(4):6–16. (In Russian).
15. Dzhariev I. E., Petrov E. A., Sysoev S. M. Accounting for the long-term influence of the electromagnetic heating of the oil reservoir on the well yield. In: *Proceedings of the V National Research-to-Practice Conference "Problemy i resheniia avtomatizatsii XXI veka"*, March 25–26, 2022, Surgut. Surgut: Publishing House of SurSU; 2022. p. 27–33. (In Russian).
16. Sysoev S. M., Alekseev M. M., Petrov E. A. Numerical simulation of the decomposition of gas hydrate in a porous medium using microwave heating. *Proceedings in Cybernetics*. 2021;(2):60–71. DOI 10.34822/1999-7604-2021-2-60-71.
17. Kim H. C., Bishnoi P. R., Heidemann R. A. et al. Kinetics of methane hydrate decomposition. *Chemical Engineering Science*. 1987;42(7):1645–1653.

Информация об авторах

С. М. Сысоев – кандидат физико-математических наук.

Е. А. Петров – аспирант, младший научный сотрудник.

И. Э. Джариев – аспирант, младший научный сотрудник.

Information about the authors

S. M. Sysoev – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics).

E. A. Petrov – Postgraduate, Junior Researcher.

I. E. Dzhariev – Postgraduate, Junior Researcher.