


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ И КОМПЬЮТЕРНЫХ НАУК  
Кафедра фундаментальной математики и механики

РЕКОМЕНДОВАНО К ЗАЩИТЕ  
В ГЭК

Заведующий кафедрой  
(к.ф.-м.н.)

  
А. П. Девятков  
19 июня 2023 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
магистра

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТБОРА ГАЗА ИЗ ГИДРАТОНА-  
СЫЩЕННОГО ПЛАСТА**

01.04.01 «Математика»


Магистерская программа «Вычислительная механика»

Выполнил работу  
студент 2 курса  
очной  
формы обучения

  
(Подпись)


Гониев  
Валерий  
Алексеевич

Научный руководитель  
(д-р ф.-м.наук, проф.)

  
(Подпись)

Мусакаев  
Наиль  
Габсалимович

Рецензент  
(к.ф.-м. наук, уч. секр.  
Тюм. фил. ИТПМ СО РАН)

  
(Подпись)

Бородин  
Станислав  
Леонидович

Тюмень  
2023 год

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ОГЛАВЛЕНИЕ .....	2
ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО СТАТУСА ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ТЕЧЕНИЯ С УЧЕТОМ РАЗЛОЖЕНИЯ ИЛИ ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ .....	6
1.1. Некоторые сведения о газовых гидратах.....	6
1.2. Существующие математические модели и численные эксперименты по отбору газа из гидратонасыщенных залежей .....	9
ГЛАВА 2. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА И ВОДЫ С УЧЕТОМ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА.....	12
2.1. Основные уравнения.....	12
2.2. Физико-математическая модель одновременного процесса нагрева залежи и отбора газа на скважине .....	29
2.3. Физико-математическая модель отдельного процесса нагрева залежи и отбора газа на скважине .....	30
ГЛАВА 3. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ.....	32
3.1. Расчет гидратонасыщенности.....	32
3.2. Дискретизация основных уравнений .....	32
3.3. Алгоритм решения представленной задачи .....	35
ГЛАВА 4. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ.....	39
4.1. Одновременное тепловое и депрессионное воздействие на гидратонасыщенный пласт.....	39

4.2. Раздельное тепловое и депрессионное воздействие на гидратонасыщенный пласт.....	41
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	48
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	50

## ВВЕДЕНИЕ

Легкие углеводороды, такие как метан, этан и пропан, играют важную роль в мировой экономике. Они используются как топливо для отопления, производства электроэнергии и транспорта. Также легкие углеводороды используются как сырье для производства широкого спектра продуктов, таких как пластик, удобрения и химические вещества.

Благодаря своей сетчатой структуре единичный объём гидрата может содержать в себе до 180 объёмов газа. Это делает газогидраты потенциально очень значимым источником топлива в будущем. Оценки показывают, что мировые запасы углеводородов в гидратах могут составлять от  $1,8 \cdot 10^5$  до  $7,6 \cdot 10^9$  км<sup>3</sup>.

Математическое моделирование гидратонасыщенного пласта является важным инструментом для исследования процессов образования и диссоциации газогидратов в пористых средах в процессе разработки. Это может помочь определить оптимальные условия для добычи газа из газогидратных месторождений и предотвратить возможные осложнения при бурении скважин в льдо- и газогидратосодержащих породах. В будущем это может привести к более эффективному использованию ресурсов газогидратных месторождений и улучшению технологий добычи газа.

**Целью** данной работы является моделирование и анализ состояния гидратонасыщенной залежи при различных начальных параметрах и режимов работы добывающей скважины.

Для выполнения цели были поставлены следующие **задачи**:

- Усовершенствование физико-математической модели неизотермической фильтрации газа или газожидкостной смеси при учёте разложения газогидрата в пористой среде и добыче газа при нагреве гидратосодержащих пород вблизи ствола скважины.

- Создание алгоритма численной реализации математической модели, описывающей в одномерном приближении процесс воздействия теплом и на залежь, содержащую в начальном состоянии метан и одноименный гидрат.
- Исследование режима распада гидрата газа и распределения параметров в рассматриваемой области при изменении характеристик системы «поровое пространство – насыщающий флюид» и температуры на границе пористого пласта.
- Установление особенностей гидродинамических и тепломассообменных процессов, возникающих при добыче газа из пористого пласта, который в начальном состоянии содержит метан и одноименный гидрат, при повышении температуры и снижении давления на скважине.

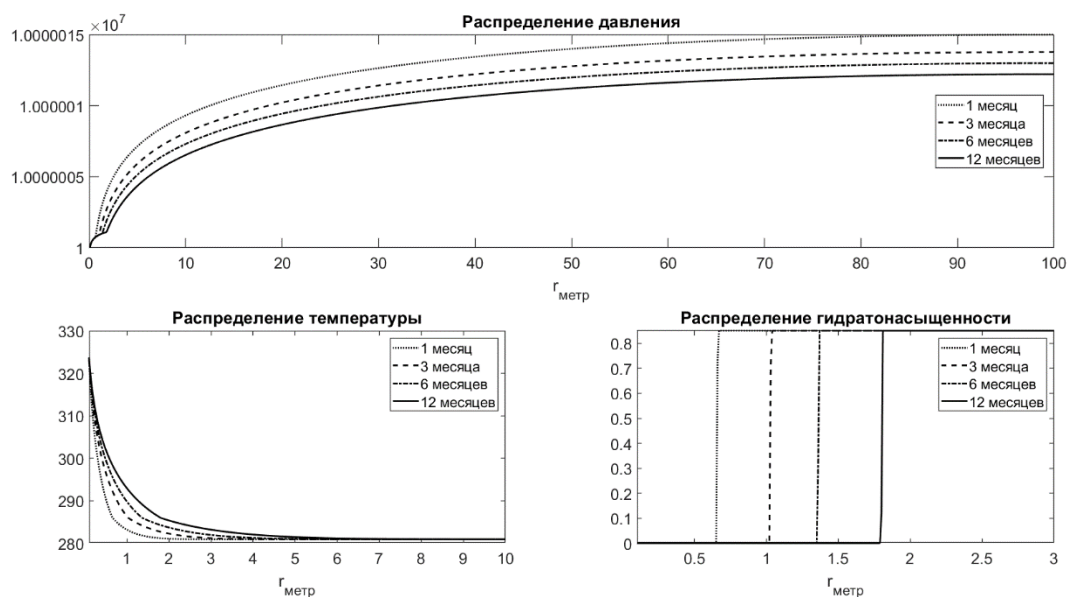
## ГЛАВА 4. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В качестве численных экспериментов рассмотрены две задачи: одновременное и раздельное тепловое, и депрессионное воздействие на гидратонасыщенный пласт. Обе задачи решаются с применением алгоритма, описанного в главе 3.

### 4.1. Одновременное тепловое и депрессионное воздействие на гидратонасыщенный пласт

При проведении расчётов были приняты следующие значения используемых параметров:  $T_0 = 281 \text{ К}$ ;  $P_0 = 1.5 \cdot 10^7 \text{ Па}$ ;  $P_e = 10^7 \text{ Па}$ ;  $T_e = 325 \text{ К}$ ;  $Q = 0.32 \text{ кг/сек}$ ;  $k_0 = 10^{-13} \text{ м}^2$ ;  $m = 0.35$ ;  $S_{h0} = 0.85$ ;  $c_g = 1560 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $c_w = 4200 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $c_{sk} = 1000 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $c_h = 2000 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $\lambda_g = 40 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;  $\lambda_w = 0.56 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;  $\lambda_h = 0.45 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;  $\lambda_{sk} = 1.5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;  $\mu_g = 11.4 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ;  $\rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_h = 910 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_{sk} = 2300 \text{ кг/м}^3$ ;  $G = 0.12$ ;  $L_h = 4.37 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$ ;  $R_g = 519.375 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ .

На рисунке 4.1 представлены распределения давления, температуры и гидратонасыщенности через 1, 3, 6 и 12 месяцев после начала работы скважины.

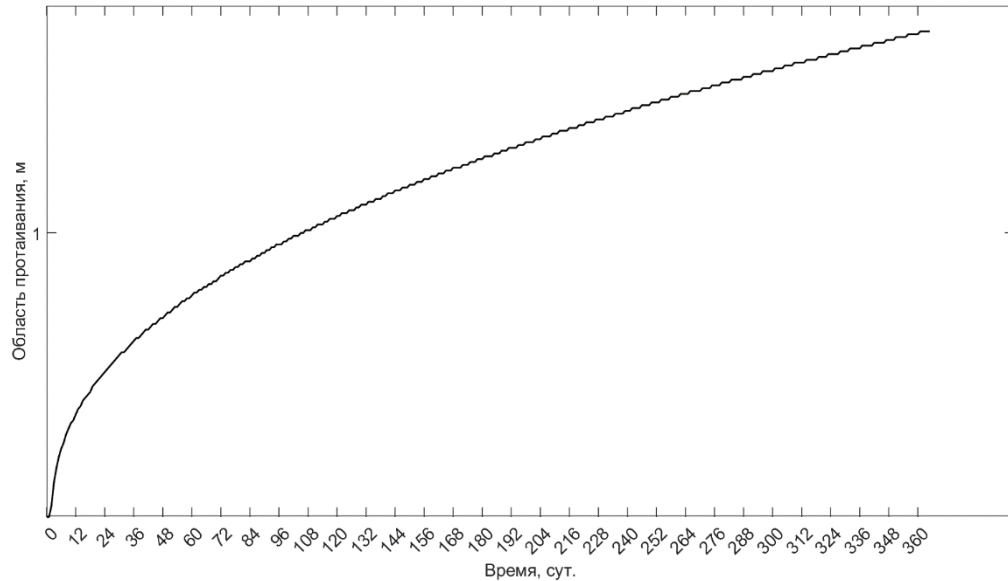


**Рисунок 4.1 – Распределение параметров системы «пористая среда – насыщающий флюид» по пространству при одновременном воздействии на залежь. Размерность давления – Па, температуры – К. Размерность пространства – в метрах.**

Видно, что при принятых значениях параметров разложение гидрата происходит на участке примыкающий к границе скважины. Фазовый переход происходит полностью на границе – разделяя гидратную зону и зону, насыщенную газом и водой. Область, насыщенная только газом и водой, со временем увеличивается, но темп продвижения границы разделах двух зон со временем падает, что также видно на профилях распределений пластового давления и температуры, где точка раздела двух зон является точкой, в которой меняется кривизна искомого распределения.

Падение пластового давления с увеличением времени вызвано работой добывающей скважины, однако также увеличивается значение температуры, что может быть связано с образованием гидрата в удалённой от скважины зоне, в связи с чем уменьшается протаивания газогидрата с течением времени.

На рисунке 4.2 представлена область протаивания газового гидрата за период работы добывающей скважины.



**Рисунок 4.2 – Область протаивания газогидрата за время работы добывающей скважины.**

В первый месяц работы добывающей скважины темп распада газогидрата резко увеличивается и достигается максимальный темп распада. Далее в период от первого до третьего месяца работы происходит стабилизация темпа распада газогидрата. От третьего месяца и до конца численного эксперимента темпы распада газогидрата снижаются.

#### **4.2. Раздельное тепловое и депрессионное воздействие на гидратонасыщенный пласт**

В поставленной задаче выполнялось несколько расчётов с различными значениями начальной гидратонасыщенности для анализа влияния данного параметра на процесс разработки моделируемой залежи.

Расчёт разделён на две части, а именно – только тепловое воздействие на пласт и только депрессионное. В период теплового воздействия, которое длится 30 дней, расход газа равен нулю и забойное и пластовое давления равны. Далее, в период депрессионного воздействия, который также длится 30 дней, тепловое воздействие полностью прекращается, добывающая скважина начинает работать с забойным давлением ниже давления фазового равновесия гидрата при пластовой температуре, а расход газа зависит от текущей депрессии на пласт.



При проведении расчётов были приняты следующие параметры:

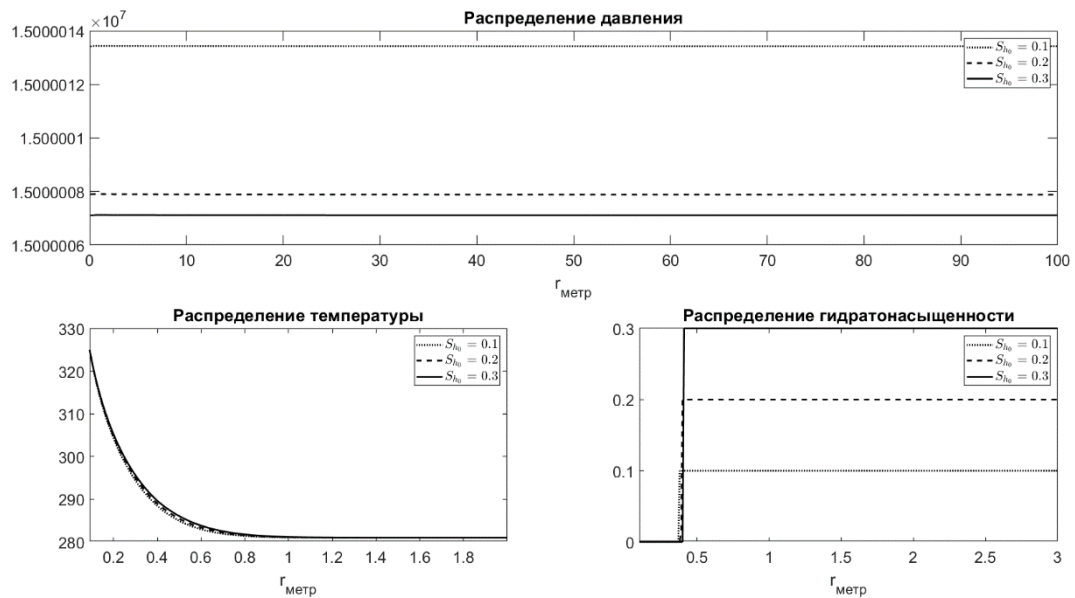
### 1. Период теплового воздействия:

$T_0 = 281 \text{ К}$ ;  $P_0 = 1.5 \cdot 10^7 \text{ Па}$ ;  $P_e = 1.5 \cdot 10^7 \text{ Па}$ ;  $T_e = 325 \text{ К}$ ;  $k_0 = 10^{-15} \text{ м}^2$ ;  
 $m = 0.35$ ;  $S_{h01} = 0.1$ ;  $S_{h02} = 0.2$ ;  $S_{h03} = 0.3$ ;  $c_g = 1560 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $c_w = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  
 $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $c_{sk} = 1000 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $c_h = 2000 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $\lambda_g = 40 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  
 $\lambda_w = 0.56 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $\lambda_h = 0.45 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $\lambda_{sk} = 1.5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $\mu_g = 11.4 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ;  
 $\rho_w = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_h = 910 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_{sk} = 2300 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $G = 0.12$ ;  $L_h = 4.37 \cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{кг}$ ;  
 $R_g = 519.375 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ,

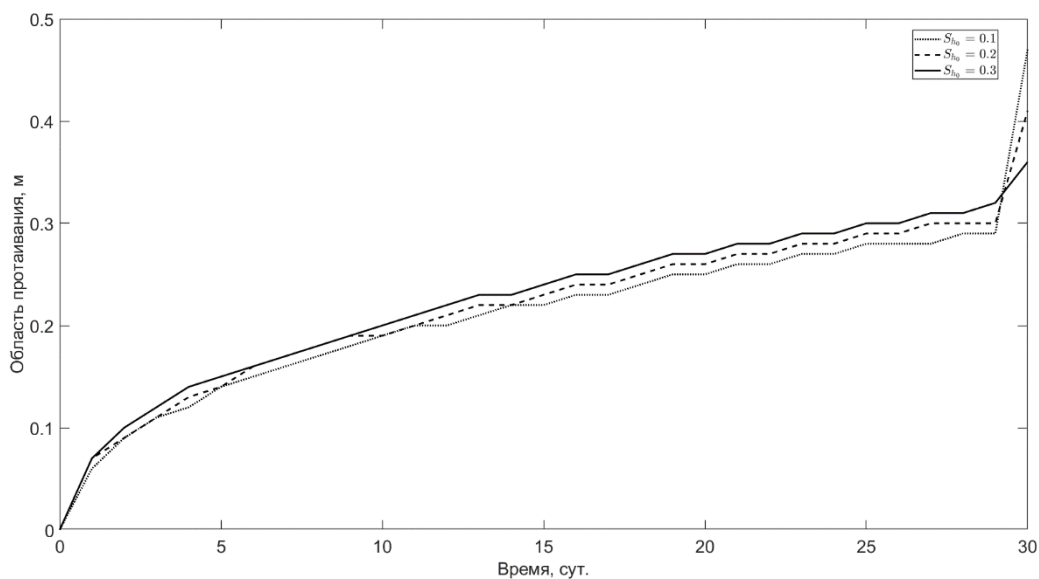
### 2. Период депрессионного воздействия:

$T_e = T_0 = 281 \text{ К}$ ,  $P_e = 5 \cdot 10^6 \text{ Па}$ , остальные параметры не изменяются.

На рисунках 4.3, 4.4 представлены результаты численного эксперимента для периода теплового воздействия:



**Рисунок 4.3 – Распределение параметров системы «пористая среда – насыщающий флюид» по пространству за время теплового воздействия.  $L = 100\text{м}$ . Размерность давления – Па, температуры – К. Размерность пространства – в метрах.**



**Рисунок 4.4 – Область протаивания газогидрата за время теплового воздействия на залежь.  $L = 100$  м.**

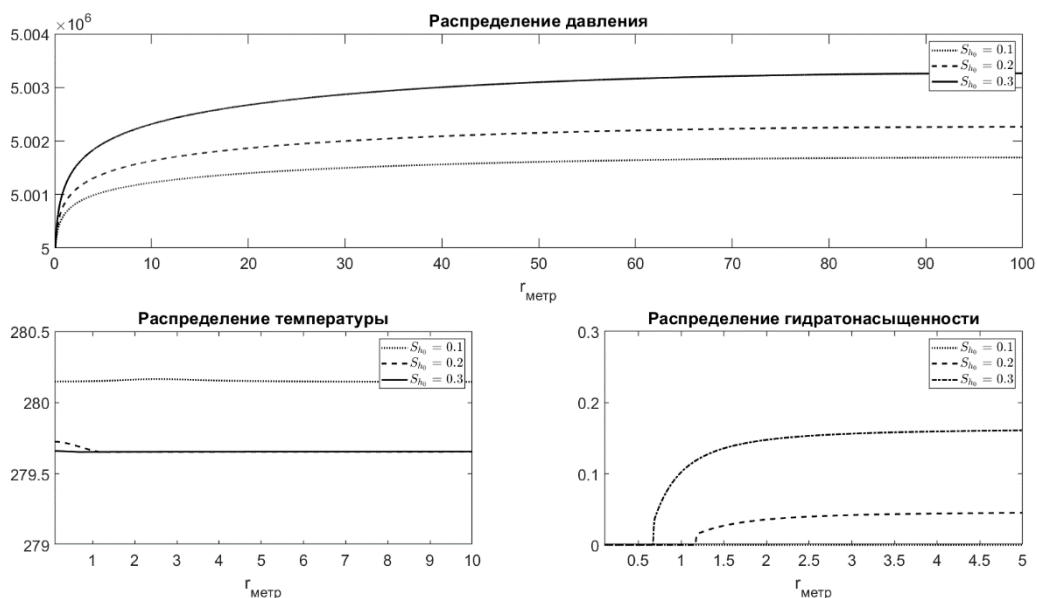
За время нагрева гидратосодержащей залежи значения температуры и гидратонасыщенности при различных начальных условиях схожи, однако, при меньшем значении начальной насыщенности гидратом происходит больший рост пластового давления и меньший рост температуры, что влечёт за собой меньшую область разложения гидрата. Это связано с тем, что при повышении давления также увеличивается и температура разложения гидрата, что приводит к смещению границы фазовых переходов к левой границе.

На рисунках 4.5, 4.6 представлены результаты численного эксперимента в период депрессионного воздействия на залежь.

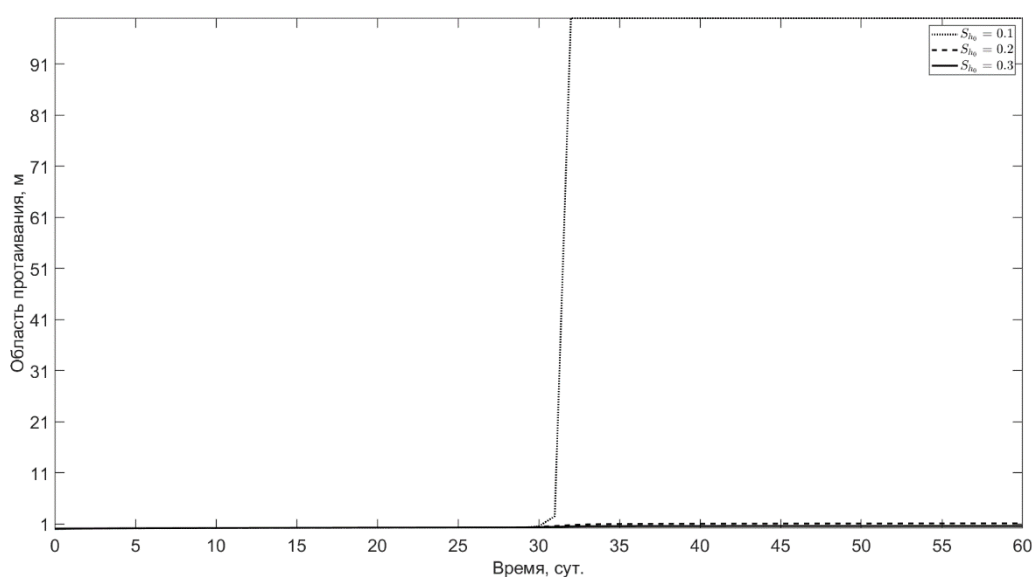
При увеличении значения начальной гидратонасыщенности, так же, как и в случае теплового воздействия, не значительно увеличивается текущее пластовое давление в залежи. При разложении гидрата в залежи повышается давление пласта, но так как добывающая скважина находится в работе и массовый расход зависит от давления, следовательно происходит меньшее снижение давления.

При начальной гидратонасыщенности  $Sh_0 = 0,1$  снижение температуры из-за распада гидрата, относительной начальной температуры пласта равной

281 К, не значительно – порядка 0,8 К, что так же связано с распадом гидрата. Однако при повышении начального значения гидратонасыщенности, снижение температуры в коллекторе более существенно, так как за время депрессионного воздействия газогидрат не распадается полностью, но общее значение гидратонасыщенности снижается.



**Рисунок 4.5 – Распределение параметров системы «пористая среда – насыщающий флюид» по пространству за время депрессионного воздействия.  $L = 100$  м. Размерность давления – Па, температуры – К. Размерность пространства – в метрах.**

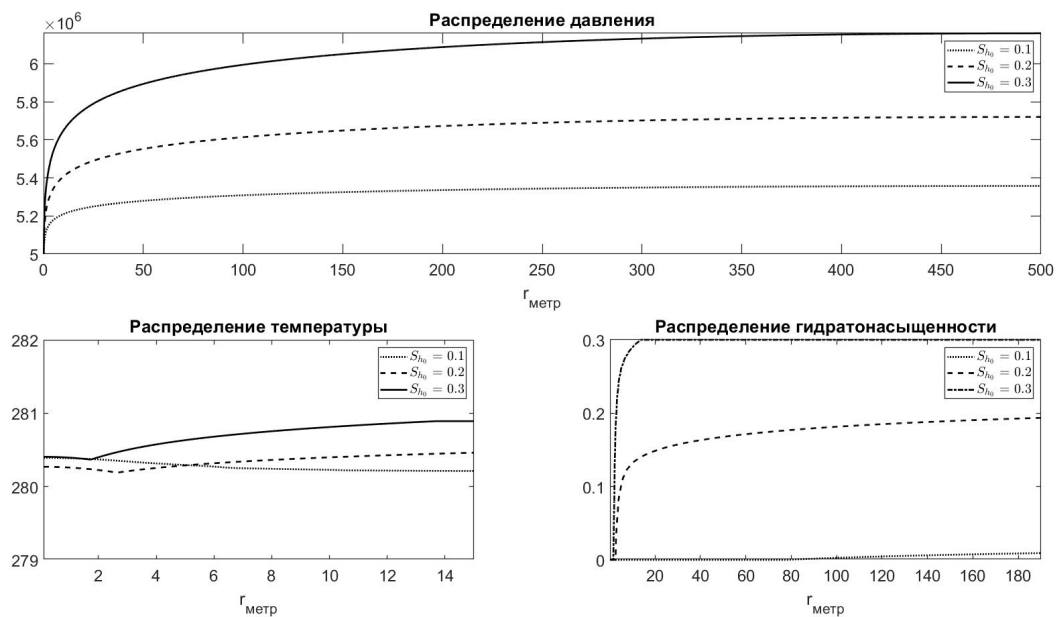


**Рисунок 4.6 – Область протаивания газогидрата за время депрессионного воздействия на залежь.**

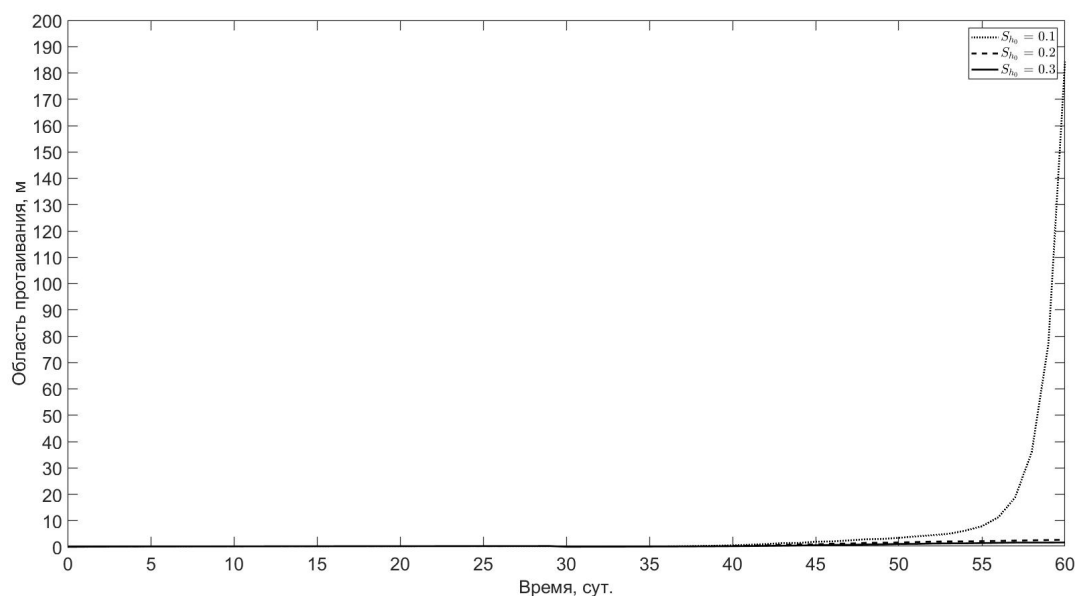
Из-за разгерметизации пласта и снижения пластового давления ниже давления фазового перехода при начальной гидратонасыщенности равной 0,1 происходит разложение гидрата на газ по всей длине залежи. При увеличении значения гидратонасыщенности не происходит столь резкого разложения гидрата, однако образуется область, в которой присутствует газ, одноименный гидрат и вода, что свидетельствует об отсутствии фронтального разложения при раздельном воздействии на залежь.

Из-за того, что при наименьшем значении гидратонасыщенности происходит полное разложение гидрата, дополнительно проведён численный эксперимент с представленными начальными значениями параметров, но в длина залежи  $L$  увеличена в пять раз – до 500 м.

На рисунках 4.6, 4.7 представлены результаты численного эксперимента при



**Рисунок 4.7 – Распределение параметров системы «пористая среда – насыщающий флюид» по пространству за время депрессионного воздействия.  $L = 500$  м. Размерность давления – Па, температуры – К. Размерность пространства – в метрах.**



**Рисунок 4.8 – Область протаивания газогидрата за время депрессионного воздействия на залежь при  $L = 500$  м.**

При увеличении области численного эксперимента распределение давления качественно не изменилось, однако присутствует меньшее снижения значения давления в среднем по области, так при  $L = 100$  м различие давлений на забое скважины и правой границе области составляет более  $3 \cdot 10^3$  Па, при начальной гидратонасыщенности  $Sh_0 = 0.3$ , тогда как при увеличении области различие значения давления составляет уже более  $1 \cdot 10^6$  Па. Данное явление говорит о том, что при увеличении коэффициента охвата залежи темп падения пластового давления будет уменьшаться, что позволит увеличить период разработки, так как необходимая для добычи газа депрессия будет сохраняться более продолжительное время.

При начальной гидратонасыщенности  $Sh_0 = 0,2$  и  $0,3$  в чисто газовой зоне значение температуры уменьшается, однако при достижении фронта диссоциации температура начинает увеличиваться. При максимальном значении начальной гидратонасыщенности, на представленном распределении, значение температуры почти равно начальной пластовой температуре. При минимальном же значении начальной гидратонасыщенности значение температуры только

уменьшается, так как фронт диссоциации находится в более чем 180 м от забоя скважины.

При минимальной начальной гидратонасыщенности на удалении от забоя скважины более чем 100 м начинается зона, в которой присутствует газ, одноименный гидрат и вода, так как значение текущей гидратонасыщенности меньше начального. Подобное явление наблюдается при остальных начальных значениях гидратонасыщенности. Однако при начальном значении равном 0,2 трёхфазная область не распространяется на всё пространство, охваченное численным экспериментом. При максимальном начальном значении гидратонасыщенности трёхфазная область распространяется менее чем на 20 м от забоя скважины, далее в залежи присутствует только газовый гидрат.

Так же, как и в эксперименте с длиной залежи равной 100 м, при минимальном значении гидратонасыщенности и забойном давлении на скважине меньше давления фазового равновесия происходит стремительное разложение гидрата, что в свою очередь будет увеличивать давление в коллекторе, а следовательно, и депрессию на пласт, что будет увеличивать расход газа на скважине. При увеличении начального значения гидратонасыщенности не происходит столь стремительного разложения гидрата, однако общая насыщенность залежи снижается, что говорит о том, что при увеличении продолжительности фазы депрессионного воздействия и снижении давления ниже фазового равновесия гидрат начнёт стремительно разлагаться и увеличивать массовый расход на скважине.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе проведено математическое моделирование и анализ состояния гидратонасыщенного коллектора при различных распределениях начальных параметров и режимов работы добывающей скважины.

Представлен численный метод решения уравнений реализованной одномерной физико-математической модели неизотермической фильтрации при тепловом воздействии на поровое пространство и одновременном или раздельном отборе газа, учитывающая разложение или образование газового гидрата в коллекторе.

Основные выводы и полученные результаты могут быть сформулированы следующим образом:

1. Развитие физико-математической модели тепло- и массопереноса, при разгерметизации и нагреве порового пространства вблизи скважины, при неизотермической фильтрации, учитывающей следующие факторы:

- движение в коллекторе газа и воды;
- образование или разложение гидрата;
- свойства реального газа;
- эффект дросселирования газа;
- эффект адиабатического расширения газа.

2. Для случая одновременного теплового и депрессионного воздействия на гидратосодержащую залежь расчётным путём доказано, что разложение газогидрата происходит только на фронтальной поверхности, разделяющей области пласта, которые насыщены газом и водой или газом и одноименным гидратом. Показана стабильная протяжённость зоны, в которой газовый гидрат разлагается, т. е. протяжённость зоны, насыщенной газогидратом, за длительный промежуток времени меняется незначительно.

3. Для случая раздельного воздействия теплом и снижением давления на коллектор расчётным путём доказано, что происходит прорыв фронта

диссоциации и снижении общего значения насыщенности гидратом залежи. Показано, что при такой комбинации типов воздействия на залежь протяжённость зоны газогидрата не стабильна. Так при минимальном значении начальной гидратонасыщенности происходит стремительно разложение гидрата, однако при увеличении значения насыщенности коллектора гидратом темпы разложения газогидрата уменьшаются.



**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Истомин В. А. Газовые гидраты в природных условиях / В. А. Истомин, В. С. Якушев. – М.: Недра, 1992. – 236 с
2. Demirbas A. Methane Gas Hydrate / A. Demirbas // Springer. 2010. 185 p
3. Englezos P. Clathrate Hydrates / P. Englezos // Industrial & Engineering Chemistry Research. 1993. Vol. 32. No 7. Pp. 1251-1274
4. Васильева, З.А. Моделирование процессов тепломассопереноса в системе «пласт–скважина–горные породы» с учетом фазовых превращений газовых гидратов: дисс. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук: 05.13.18 / Васильева Зоя Алексеевна. – Москва, 2019. – 227 с
5. Дядин Ю. А. Газовые гидраты / Ю. А. Дядин, А. Л. Гущин // Сороковский образовательный журнал. – 1998. – №3. – С.55-64
6. Запорожец Е. П. Расчет параметров образования и диссоциации гидратов газообразных углеводородов / Е. П. Запорожец, Н. А. Шостак // Журнал физической химии. 2015. Том 89. № 4. С. 638-643.
7. Istomin V. A. Self-Preservation Phenomenon of Gas Hydrates / V. A. Istomin, V. S. Yakushev, N. A. Makhonina, V. G. Kwon, E. M. Chuvilin // Gas Industry of Russia. 2006. No 4. Pp. 16-27
8. Шагапов В. Ш., Чиглинцева А. С., Русинов А. А. Теоретическое моделирование процесса извлечения газа из пористого газогидратного пласта, частично насыщенного газом, с учетом теплового взаимодействия с окружающими породами //Теоретические основы химической технологии. – 2016. – Т. 50. – №. 4. – С. 452-462.
9. Ahmadi G., Ji C., Smith D. H. Numerical solution for natural gas production from methane hydrate dissociation //Journal of petroleum science and engineering. – 2004. – Т. 41. – №. 4. – С. 269-285.

10. Liu S. et al. Accelerating gas production of the depressurization-induced natural gas hydrate by electrical heating //Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Т. 208. – С. 109735.
11. СУХОНОСЕНКО А. Л. ТЕРМОГИДРОДИАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗРАБОТКИ ГАЗОГИДРАТНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ. – 2013.
12. Moridis G. J. Numerical studies of gas production from methane hydrates //Spe Journal. – 2003. – Т. 8. – №. 04. – С. 359-370.
13. Moridis G. J., Kowalsky M. B., Pruess K. Depressurization-induced gas production from Class 1 hydrate deposits. SPE 97266 //2005 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, USA. – 2005. – С. 9-12.
14. Мусакаев Н.Г. Математическое моделирование процесса добычи газа из газогидратной залежи с учетом образования льда / Н. Г. Мусакаев, М. К. Хасанов // Вестник Тюменского государственного университета. 86 Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2014. №7. С.43-50.; Шагапов В. Ш. Динамика образования и разложения гидратов в системах добычи, транспортировки и хранения газа / В. Ш. Шагапов, Н. Г. Мусакаев – М.: Наука, 2016. – 238 с
15. Басниев К. С. Подземная гидромеханика: учебник для вузов / К. С. Басниев, И. Н Кочина, В. М. Максимов – М.: Недра, 1993. – 416 с.
16. Латонов В. В. Расчет коэффициента сжимаемости природного газа / В. В. Латонов, Г. Р. Гуревич // Газовая промышленность. 1969. № 2. С. 7-9.
17. Phirani Jyoti. Kinetic Simulation of CO<sub>2</sub> Flooding of Methane Hydrates / Jyoti Phirani, Kishore K. Mohanty // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Florence, Italy, September 2010
18. Федоров А. А. Метод двухуровневого распараллеливания прогонки для решения трехдиагональных линейных систем на гибридных ЭВМ с многоядерными сопроцессорами / А. А. Федоров, А. Н. Быков // Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии. 2016. Том 17. № 3. С. 234-244.

19. Чемодуров В. Т. Численные методы в строительстве / В. Т. Чемодуров, М. С. Сеитжелилов – Симферополь: ООО ИТ АРИАЛ, 2016. – 112 с
20. Бельских, Д.С. Процесс теплового воздействия на гидратонасыщенную залежь с учётом разложения газового гидрата: дисс. на соиск. учен. степ. докт. физ.-мат. Наук: 1.3.14 / Бельских Денис Сергеевич. - Тюмень, 2022, - 95 с
21. Musakaev N. G. Mathematical modeling of thermal impact on hydrate saturated reservoir / N. G. Musakaev, S. L. Borodin, D. S. Belskikh // Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering. 2020. Vol. 20. No. 1. Pp. 43-51.
22. Musakaev N. G. To the question of the interpolation of the phase equilibrium curves for the hydrates of methane and carbon dioxide / N. G. Musakaev, S. L. Borodin // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 115. 05002.
23. Макогон Ю. Ф. Гидраты природных газов / Ю. Ф. Макогон – М.: Недра, 1974. – 208 с