

УДК 553.981.6;4;8

**В.М. Троицкий, А.Ф. Соколов, В.А. Истомин, С.Г. Рассохин, В.П. Ваньков, А.В. Мизин**

## Образование и разложение газовых гидратов метана при фильтрации газа

В настоящее время наблюдается устойчивый интерес к изучению газовых гидратов как природных [1], так и техногенных [2]. Ежегодно в научной литературе появляется более 3000 публикаций, посвященных данной теме. Особое внимание уделяется гидратам природного газа, поскольку они рассматриваются как наиболее перспективный для человечества энергетический ресурс. Ресурсы газогидратного газа превышают ресурсы традиционного как минимум в несколько раз.

Исследования условий гидратообразования газов в пористой среде (влагонасыщенные образцы песчаников) на полуколичественном уровне впервые были выполнены еще Ю.Ф. Макогоном в середине 1960-х гг. В настоящее время осуществлено значительное количество работ по термодинамике и кинетике гидратообразования в пористых средах. Отметим один из результатов последнего времени в этом направлении [3] – экспериментальные данные по остаточному содержанию неперешедшей в гидрат (неклатратной воды) поровой влаги при равновесии с гидратной фазой в зависимости от термобарических условий. При этом проведена аналогия неклатратной воды с незамерзшей водой (изучаемой в геокриологии).

Что касается следующего этапа – моделирования процессов образования и разложения гидратов в пористой среде при фильтрации газа в призабойной зоне пласта, то эти процессы на сегодняшний день изучены недостаточно. Следует особо отметить, что пионерами в этом направлении исследований были российские исследователи А.С. Схаляхо [4] и В.А. Ненахов [5]. На экспериментальных установках ВНИИГАЗа (ныне – ООО «Газпром ВНИИГАЗ») и МИНХ и ГП (ныне – РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина) были выполнены исследования по моделированию фильтрации газа и воды в дисперсных породах в условиях гидратообразования. А.С. Схаляхо [4] еще в 1974 г. получил первую экспериментальную зависимость проницаемости по газу от гидратонасыщенности керна. В 1982 г. В.А. Ненахов [5] исследовал на гидратах фреона фильтрационные свойства гидратосодержащих пород при фильтрации жидкой воды. Была обнаружена нелинейная зависимость относительной проницаемости гидратосодержащего песка по воде от градиента давлений на торцах образца, и тем самым – наличие «начального градиента давления». На основании проведенных экспериментов сделан вывод, что в гидратонасыщенных средах вода ведет себя как неньютоновская жидкость вследствие специфического поверхностного взаимодействия воды и гидрата.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования процессов образования и разложения гидратов метана на керновых моделях пласта двух месторождений: Чаюдинского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) и месторождения Харасавэй-море. Газ-гидратообразователь (метан) фильтровался через модель пористой среды с заданной начальной водонасыщенностью ( $S_{wo}$ ) в гидратном термобарическом режиме, и проводилось наблюдение за изменением фильтрационных характеристик в ходе процесса гидратообразования.

### Методика проведения эксперимента

На базе действующей трехфазной фильтрационной установки [6] была разработана и собрана специализированная гидравлическая схема закачки/отбора газа в модель пласта, позволяющая обеспечить наблюдение и регистрацию фильтрационных характеристик пластовой системы в термобарических условиях, соответствующих условиям образования газовых гидратов. Указанная схема оснащена оригинальной системой

### Ключевые слова:

метан, гидрат, керновая модель пласта, установка трехфазной фильтрации.

### Keywords:

methane, hydrate, core model of the reservoir, three-phase filtration unit.

термостатирования [7], обеспечивающей изменение и поддержание температуры в моделях пласта в интервале от 5 до 25 °С с погрешностью измерения  $\pm 0,2$  °С. Давление в моделях пласта при этом может варьироваться в диапазоне 0,1–70 МПа.

На рис. 1 представлена функциональная блок-схема экспериментальной установки для газогидратных исследований.

Основными узлами измерительной установки являются:

- блок насосов фильтрации, обеспечивающий подачу газа в образец с различным расходом при пластовом давлении;
- содержащий модель пласта кернодержатель;
- блок создания и поддержания горного давления;
- блок аккумуляторов для подачи жидкостей и газов;
- система термостатирования;
- система управления, контроля и регистрации данных (для регистрации изменений состояния керна, вызванных образованием или разложением гидратов);
- система измерения перепада давления.

Система фильтрации может быть дополнительно оснащена блоком измерения текущей флюидонасыщенности – компьютерным томографом или рентгеновским сканером насыщенности. В схеме фильтрации применяются две пары насосных систем Quizix SP-5200 (производство США), осуществляющих нагнетание и отбор исследуемого флюида непосредственно. Аналогичная насосная система используется для создания и поддержания горного давления. Характеристики насосов и другие параметры установки фильтрации указаны в табл. 1.

Для исследований на установке могут применяться два типа кернодержателей – хасслеровский (одноосевого обжима) и гидростатический (двухосевого обжима), выполненных в стальном корпусе, длиной до 100 см и диаметром 3 см. Перепад давления на модели пласта измеряется с помощью датчиков дифференциального давления Validyne Engineering (производство США) типа DP378, а температура – датчиками температуры (преобразователи термосопротивления PT-100) фирмы Honeywell Sensotec (производство США).

Блок аккумулятора представляет собой сосуд высокого давления с плавающим поршнем



Рис. 1. Функциональная блок-схема экспериментальной установки для исследования поведения гидратов метана в пористой среде

Таблица 1

**Технологические параметры модифицированной трехфазной установки фильтрации**

Параметр	Установка трехфазной фильтрации
Пластовое давление, МПа	До 70
Горное (обжимное) давление, МПа	До 70
Рабочая температура, °С	От +5 до 150
Линейная скорость флюидов в керне, м/сут	0,04–160
Диапазон задаваемых расходов при фильтрации, см <sup>3</sup> /мин	0,000408–15
Точность поддержания расхода насосами, % от установленного значения	±0,2
Длина керна, м	До 3
Диаметр керна, м	0,03

и вентильной арматурой, в который предварительно заправляется метан, подаваемый блоком насосов на вход кернодержателя. На выход кернодержателя для поддержания пластового давления устанавливается вторая пара насосов Quizix. Все конструктивные элементы установки трехфазной фильтрации размещены в термощкафу, обеспечивающем поддержание температуры в интервале от 5 до 150 °С с погрешностью ±0,1–0,2 °С.

Для обеспечения создания пластовых температурных условий Чаядинского НГКМ в установке предусмотрено использование специально изготовленного термостата (патент РФ [7]), обеспечивающего длительное термостагирование системы при аномально низкой пластовой температуре до 5 °С.

Управление установки двухфазной фильтрации полностью автоматизировано. Специальной системой управления осуществляются контроль состояния системы и регистрация всех рабочих параметров: температуры в нескольких точках; пластового давления; давления по каждому насосу отдельно; горного давления (обжим); перепада давления на модели пласта.

**Подготовка моделей пласта**

В кернодержатель двухосевого обжима устанавливается модель пласта. Исходный керновый материал для моделей пласта представляет собой выбуренные параллельно напластованию цилиндрические образцы правильной формы длиной 30–50 мм и диаметром 30 мм. Перед измерениями образцы подвергаются экстракции спиртобензольной смесью (соотношение компонентов 1:3) для удаления углеводородов и иных флюидов, заполняющих пористую среду, и высушиванию до постоянной массы при температуре 102–105 °С. Формирование составной модели пласта производится в соответствии со значениями измеренной на каждом индивидуальном образце абсолютной проницаемости по газу. Порядок компоновки принимается таким, чтобы по направлению фильтрации каждый последующий образец имел меньшую проницаемость.

В качестве методической основы для подготовки образцов и флюидов к испытанию и проведению экспериментальных работ используются нормативные документы [8–9].

Образцы для модели пласта месторождения Харасавэй-море отбирались из отложений

Таблица 2

**Характеристики образцов для создания модели пласта месторождения Харасавэй-море**

№ образца	Диаметр образца, D, см	Длина образца, L, см	Пористость, K <sub>п</sub> , %	Проницаемость, K <sub>пр</sub> , мД	Водонасыщенность, S <sub>вод</sub> , %
45X	2,9725	2,845	27,7	384	64,16
46X	2,97	2,915	27,4	360	
64X	2,975	2,725	27,6	374	
65X	2,965	2,785	28,1	413	
73X	2,9625	2,845	27,8	522	
77X	2,97	2,855	28,3	459	
Модель	2,969	16,97	27,8	418,67	

танопчинской свиты (пласт ТП<sub>1-4</sub>), представленных терригенными песчано-алевритовыми породами с глубины 1513–1620 м. Здесь преобладают мелкозернистые алевритистые песчаники и крупнозернистые песчанистые алевролиты. Характеристики сформированной модели пласта танопчинской свиты приведены в табл. 2. Средняя остаточная водонасыщенность модели пласта составила 64,16 %.

Для модели пласта Чайндинского НГКМ использован керновый материал из разреза талахского горизонта с глубины 1756,5–1763,5 м. Перед проведением эксперимента образцы породы предварительно были отмыты от солей дистиллированной водой. Сначала все образцы были помещены в кернодержатель, который затем подключили в гидравлическую схему с выходом в атмосферу. После этого было сделано прокачивание дистиллированной воды через сформированную модель при температуре 23 °С. В табл. 3 представлены характеристики образцов сформированной модели после отмывки их от солей.

В исследованиях процессов гидратообразования большое значение имеет создание в модели пласта точного значения начальной  $S_{\text{во}}$ . Остаточную водонасыщенность (используемая дистиллированная вода) создавали в каждом отдельно взятом образце составной модели пласта. Средняя остаточная водонасыщенность для модели пласта Чайндинского НГКМ составила 63,51 %.

### Подготовка пластовых флюидов

Для моделирования пластовых процессов в качестве флюидов были использованы дистиллированная вода и метан. Метан выбирался особой чистоты (согласно ТУ 51-841-87). Требования физико-химических показателей для метана указаны в табл. 4. Известно [3], что компоненты природного газа (предельные углеводороды  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ , а также  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  и др.) образуют как индивидуальные, так и смешанные гидраты. Поэтому предварительно был сделан хроматографический анализ газа метана, используемого в экспериментах, с целью уточнения его компонентного состава и наличия примесей.

Анализ проб метана проводился на хроматографе Varian CP 3800, предназначенном для определения компонентного состава природного газа: углеводородных ( $\text{C}_1$ – $\text{C}_9$ ) и неуглеводородных (гелий, водород, азот, кислород, диоксид углерода, сероводород) компонентов.

В составе метана (99,99 % мол.) в качестве примеси обнаружены  $\text{O}_2$  (0,0015 % мол.) и  $\text{N}_2$  (0,0056 % мол.), что соответствует ТУ 51-841-87 на метан газообразный (суммарная объемная доля примесей кислорода, азота, этана и пропана – не более 0,01 %).

### Создание начальной водонасыщенности

Процессы гидратообразования исследовались в режиме фильтрации сухого метана через водонасыщенную модель пласта при следующих

Таблица 3

Параметры модели пласта Чайндинского НГКМ

№ образца	Проницаемость, $K_{\text{пр}}$ , мД	Длина, $L$ , см	Диаметр, $D$ , см	Пористость, $m$ , %	Объем пор, $V_{\text{пор}}$ , см <sup>3</sup>	Водонасыщенность, $S_{\text{во}}$ , %
556/13	46,3	3,001	2,963	10,51	2,20438	62,18
564/13	35,4	3,002	2,967	11,67	2,43985	64,14
554/13	29,4	3,00	2,962	14,2	2,95648	64,15
560/13	16,1	3,00	2,965	13,21	2,78059	63,33
Модель	28,6	12,003	2,973	12,40	10,3813	63,51

Таблица 4

Требования к физико-химическим показателям баллонного метана согласно ТУ 51-841-87

Параметр	Значение параметра, соответствующее норме ТУ
Объемная доля метана, %, не менее	99,9
Суммарная объемная доля этана и пропана, %, не более	0,03
Суммарная объемная азота и кислорода, %, не более	0,07
Содержание водяных паров, г/м <sup>3</sup> , не более	0,03

барических условиях: пластовое давление ( $P_{пл}$ ) – 20 МПа; горное давление ( $P_{горн}$ ) – 35 МПа. Температура модели пласта непрерывно изменялась при нагреве или охлаждении в интервале значений от 25 до 14 °С. Известно [1, 2], что при этих термобарических условиях возможно образование газовых гидратов метана.

Так как планировалось исследование процесса гидратообразования по изменению фильтрационных характеристик моделей пласта, то выбору начальной  $S_{wo}$  моделей пласта придавалось особое значение. Конкретные значения начальной  $S_{wo}$  моделей определялись в ходе дополнительных экспериментов по измерению проницаемости образцов керна по азоту при различных значениях водонасыщенности при комнатной температуре и атмосферном давлении (безгидратная область).

На рис. 2 показана зависимость проницаемости образца керна месторождения Харасавэй-море от водонасыщенности. При  $S_{wo} > 64\%$  параметр проницаемости будет особенно чувствителен к явлениям гидратообразования.

### Результаты эксперимента

Модель пласта месторождения Харасавэй-море, заполненную метаном при  $S_{wo} = 64,16\%$  и находящуюся под  $P_{пл} = 20$  МПа и  $P_{горн} = 35$  МПа при  $T = 22,8$  °С, начали равномерно охлаждать до 19,5 °С. Кривые изменения температуры ( $T_{м.п.}$ ) и перепада давления ( $\Delta P_{м.п.}$ ) на модели пласта во времени показаны на рис. 3. До температуры 19,5 °С фильтрация метана через модель осуществляется стабильно; приблизительно постоянный  $\Delta P$  на модели пласта свидетельствует об отсутствии гидратообразования.

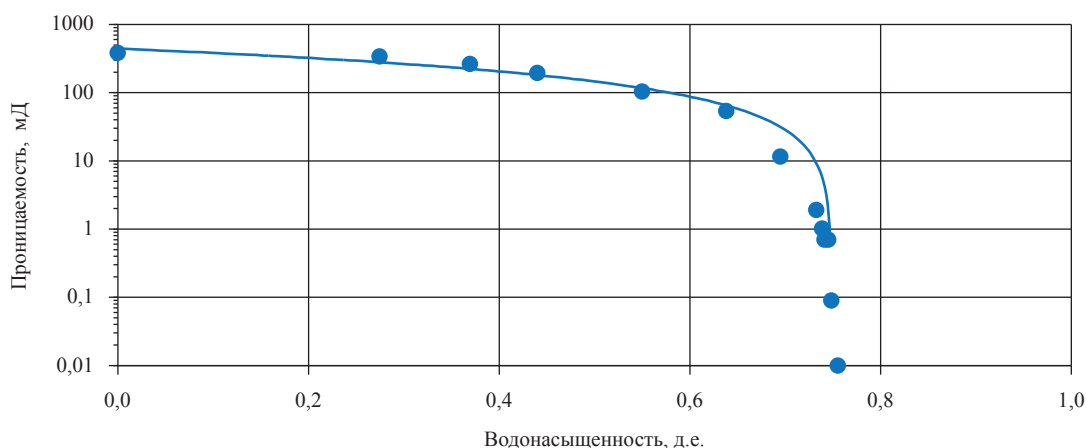


Рис. 2. Зависимость проницаемости образца керна № 45X по азоту от водонасыщенности при атмосферных условиях ( $P = 0,1$  МПа,  $T = 22-23$  °С)

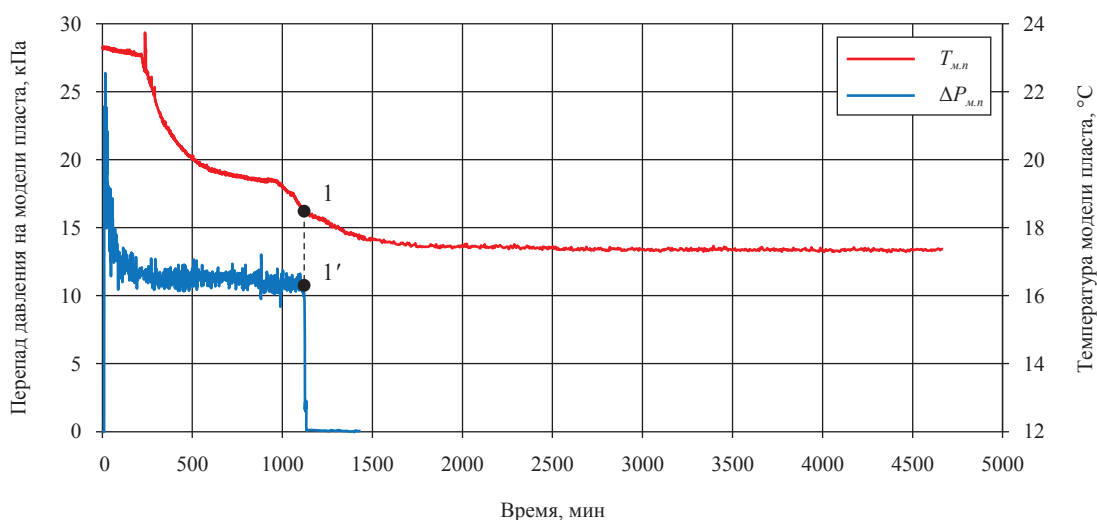


Рис. 3. Динамика перепада давления на модели пласта при фильтрации метана и изменение температуры от 22,8 до 18,6 °С

Далее процесс охлаждения модели пласта был продолжен. При достижении  $T_1 = 18,6\text{ }^\circ\text{C}$  (точка 1) фильтрация метана через модель пласта прекратилась в результате образования газогидратов. Давление на входе и выходе ( $P_{\text{вх}}$  и  $P_{\text{вых}}$ ) модели пласта установилось на уровне 20 МПа (перепад давления стал равен нулю, точка 1'). Дальнейшее уменьшение температуры до  $17,3\text{ }^\circ\text{C}$  и выдержка модели пласта при этой температуре в течение 2,5 сут не повлияли на фильтрационные характеристики: модель пласта оставалась непроницаемой для метана.

Таким образом, проведенный эксперимент показал, что процессы гидратообразования можно регистрировать по моменту резкого падения  $\Delta P$  (точка 1) и практически до нуля.

Следует заметить, что процесс гидратообразования начинается на входе модели пласта, так как  $P_{\text{вх}}$  несколько превышает  $P_{\text{вых}}$  модели пласта (на величину  $\Delta P$ ), и значит, условия гидратообразования по мере охлаждения будут прежде всего выполнены для входной зоны модели пласта. По мере дальнейшего понижения температуры и дальнейшего гидратообразования гидраты постепенно заполняют поровое пространство модели пласта от входа модели пласта до выхода. Однако это практически никак не отражается на кривой поведения  $\Delta P$ , так как проницаемость всей модели пласта (а значит, и  $\Delta P$ ) определяется самым низкопроницае-

мым участком, который находится на входе модели пласта и практически уже стабилен.

Для детального исследования процессов разложения сформировавшихся газогидратов модель пласта месторождения Харасавэй-море отключалась от холодильника-термостата, а ее температура за счет естественного притока теплоты из помещения плавно повышалась до комнатной ( $T = 22,8\text{ }^\circ\text{C}$ ) (рис. 4). При этом в кернодержателе с помощью измерительного насоса поддерживалось постоянное  $P_{\text{пл}} = 20\text{ МПа}$ .

На рис. 4 представлены графики изменения температуры модели пласта ( $T_{\text{м.п(изм)}}$ ) и объема выделяющегося метана ( $\Delta V$ ) во времени при нагревании модели пласта и разложении газогидратов. Изменение  $\Delta V$  контролировалось высокоточными насосами Quizix с точностью до  $0,1\text{ мм}^3$ . Температуру начала разложения газогидратов ( $T_{\text{р.с(н)}}$ ) можно определить по точке резкого излома производной (по времени) объема выделившегося метана при разложении газовых гидратов. Наглядно отражено, что эта точка  $T_{\text{р.с(н)}}$  составляет около  $19,3\text{ }^\circ\text{C}$ , при этом процесс разложения газогидратов полностью заканчивается при температуре  $21,3\text{ }^\circ\text{C}$  (точка 2).  $T_{\text{р.с(н)}}$  можно также определить по поведению температурной кривой. Действительно, при нагревании модели и достижении температуры разложения газовых гидратов происходит поглощение теплоты системой (теплота плавления гидрата), в результате чего температур-

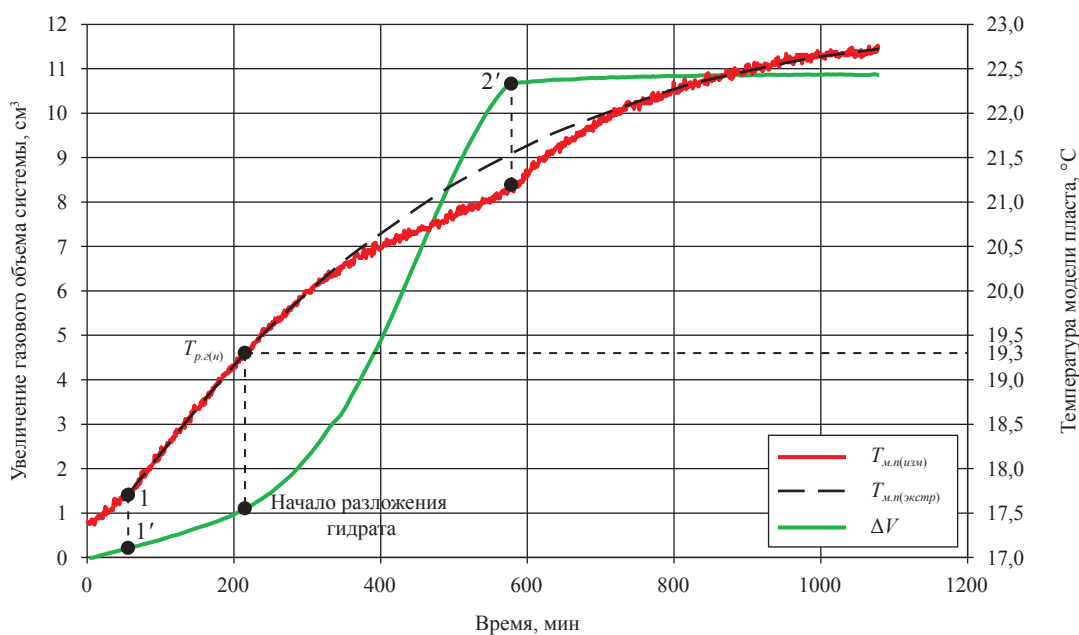


Рис. 4. Динамика изменения объема метана на выходе из модели пласта при изменении температуры модели пласта от  $17,3$  до  $22,8\text{ }^\circ\text{C}$ , полученных при разложении газогидратов



ная зависимость (кривая  $T_{м.п(изм)}$ ) отклоняется от трендового (ожидаемого) закона нарастания температуры (кривая  $T_{м.п(эксп)}$ ). При этом в модели начинается высвобождение метана из гидратного состояния в газовое, что характеризуется выделением большого количества газа (метана) и подъемом  $\Delta P$ . Тогда точка отклонения  $T_{м.п(изм)}$  от  $T_{м.п(эксп)}$  обусловлена процессами плавления газовых гидратов, и будет соответствовать температуре  $T_{р.з(н)}$ .

Таким образом, температура начала гидратообразования ( $T_{о.з}$ ), равная 18,6 °С и полученная при охлаждении модели пласта по  $\Delta P$  (см. рис. 3), несколько отличается от  $T_{р.з(н)} = 19,3$  °С при нагревании модели пласта, определенной из анализа кривых изменения объема выделившегося газа в процессе разложения газовых гидратов. Это различие связано с кинетикой процесса образования/разложения гидрата метана в пористой среде.

Далее эксперимент по охлаждению модели пласта месторождения Харасавэй-море был повторен при большей скорости охлаждения. На рис. 5 показаны временные зависимости  $T_{м.п}$  и  $\Delta P$  на модели пласта для этого случая. В интервале температур 22,8–19,7 °С перепад давления на модели пласта плавно снижается. Существенный скачок  $\Delta P$  происходит при  $T_{м.п} \approx 19,7$  °С (точка 1'). В интервале снижения температуры с 19,7 до 18,5 °С наблюдается его стабилизация на уровне 2 кПа,

и при достижении  $T_{м.п} \approx 18,2$  °С (точки 2 и 2') перепад давления практически приблизился к нулю. Выдержка модели пласта при температуре  $\approx 18,0$  °С в течение приблизительно 14 ч и дальнейшее понижение температуры модели пласта до  $\approx 14,8$  °С не повлияли на процесс фильтрации метана: она осуществлялась в небольших количествах вплоть до остановки эксперимента.

Сопоставляя два идентичных эксперимента, выполненных при разных скоростях охлаждения (см. рис. 3 и 5), можно отметить некоторое различие: при большой скорости охлаждения (см. рис. 5)  $T_{о.з} = 19,7$  °С, что несколько выше, чем при медленной скорости охлаждения модели (см. рис. 3), когда которой  $T_{о.з} = 18,3$  °С. Эти различия обусловлены кинетическими особенностями образования гидратов в керновой модели пласта.

Рассмотрим кривую зависимости  $\Delta P$  от времени (см. рис. 5), полученную в процессе охлаждения модели пласта с 23 до 14,8 °С.

На этой кривой можно выделить три основных участка:

- 1) выход на режим и охлаждение до температуры 19,7 °С (временной интервал – 50–300 мин);
- 1) охлаждение модели пласта с 19,7 до 18,5 °С (временной интервал – 300–420 мин);
- 2) стабилизация температуры на уровне  $\approx 18,0$  °С (временной интервал – 420–1580 мин).

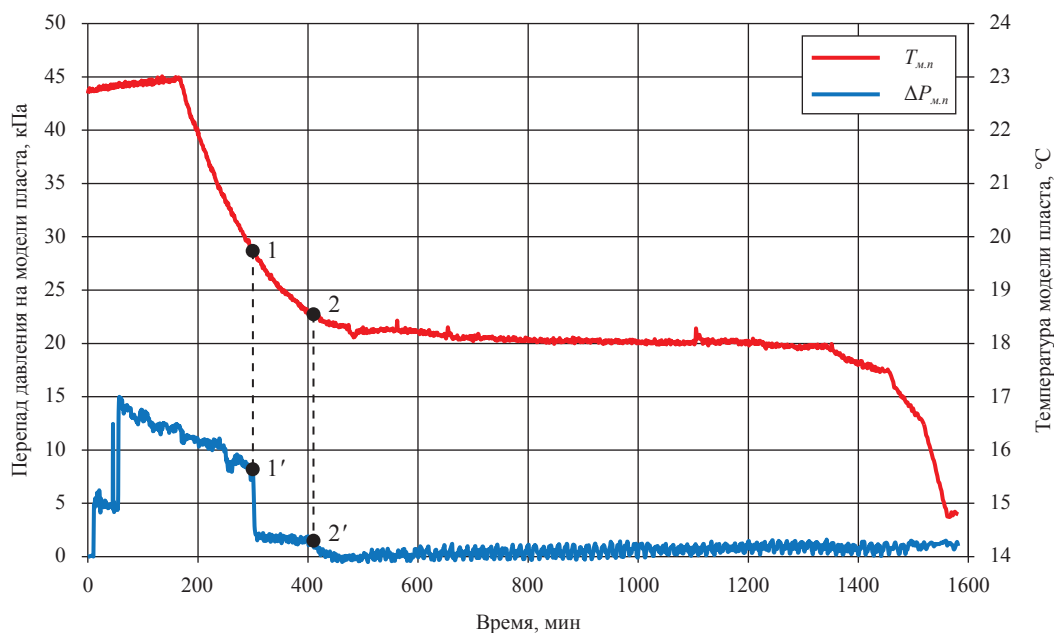


Рис. 5. Динамика перепада давления на модели пласта при изменении температуры с 23 до 14,8 °С (образование газовых гидратов)

На первом участке происходят перераспределение влажности вдоль модели пласта при фильтрации метана и некоторое уменьшение водонасыщенности с 59 до 48 %. Результатом такого перераспределения влажности и ее уменьшения является уменьшение  $\Delta P$  на этом участке.

В начале второго участка наблюдается резкий скачок  $\Delta P$  (в сторону уменьшения) с 8 (0,008 МПа) до 2 кПа (0,002 МПа), обусловленный интенсивным гидратообразованием при достижении температуры модели пласта 19,7 °С. При дальнейшем охлаждении модели пласта с 19,7 до 18,5 °С  $\Delta P$  практически не изменялся, оставаясь на уровне 2 кПа (0,002 МПа).

В начале третьего участка также наблюдается дополнительный скачок  $\Delta P$  от 2 кПа (0,002 МПа) до практически нулевого значения. При этом фильтрация метана через модели пласта продолжалась. Дальнейшая стабилизация температуры на уровне  $\approx 18,0$  °С (в течение почти 14 ч) и дальнейшее снижение температуры до 14,8 °С практически не изменили условий фильтрации: перепад давления приблизительно равнялся нулю с незначительной тенденцией его возрастания при уменьшении температуры.

Таким образом, в эксперименте наблюдается характерный эффект, по наличию которого четко идентифицируется момент начала гидратообразования в керновой модели пористой среды.

Эффект заключается в динамическом (и мгновенно регистрируемом аппаратурой) уменьшении  $\Delta P_{м.п.}$ , обусловленном тем, что фильтрующийся углеводородный газ (метан) при данных термобарических условиях начинает образовывать газовые гидраты. При этом в отсутствие существенных препятствий в виде накопившихся гидратов газ продолжает свободно фильтроваться через модель пласта. А за счет уменьшения количества газа (связывающегося в этот момент времени в гидратную форму) как раз и фиксируется уменьшение разности давления между выходом и входом. Данное уменьшение  $\Delta P_{м.п.}$  является динамически нестабильной величиной и не отражает изменений в проницаемости образца по газу, а свидетельствует о происходящем в текущий момент времени процессе перехода газа в гидратную фазу и «стока в твердую фазу» некоторой части газа из фильтрационного потока (или «путевой отбор газа» – по терминологии, используемой в магистральном транспорте).

Таким образом,  $T_{о.с.}$  при охлаждении модели пласта (см. рис. 3) меньше  $T_{р.с.}$  при нагревании модели пласта (см. рис. 4). Следует иметь в виду, что  $T_{о.с.}$  оценивалась по  $\Delta P_{м.п.}$ , а  $T_{р.с.}$  – по кривой изменения  $\Delta V$  при разложении газовых гидратов.

Далее исследования процесса образования/разложения гидрата метана были продолжены на модели пласта Чайядинского НГКМ.

На рис. 6 показана динамика изменения перепада давления  $\Delta P_{м.п.}$  при фильтрации сухого метана через модель пласта Чайядинского НГКМ с остаточной водонасыщенностью 63,51 % при последовательном уменьшении температуры. Расход метана устанавливался на уровне 0,05 см<sup>3</sup>/мин при постоянном пластовом давлении 20 МПа. Температура модели пласта понижалась постепенно – в два приема при непрерывной фильтрации метана через пористую среду:

- сначала с 24 до 17 °С в течение  $\approx 15$  ч; при этом  $\Delta P$  на керновой модели пласта почти сразу снизился до 13 кПа (0,013 МПа) и установился на этом постоянном уровне;
- затем осуществлялось дальнейшее снижение температуры (в точке 1, рис. 6), при этом сразу же уменьшился  $\Delta P$  до 7,4 кПа, а разница закачанного и выходящего  $\Delta V$  резко возросла (рис. 7, точка 1);
- в точке 2 (см. рис. 6 и 7), когда температура системы достигает 14,8 °С,  $\Delta P$  уменьшается с 7,4 кПа до 0 в течение нескольких минут.

В дальнейшем в точке 2 (см. рис. 6 и 7) снижение температуры системы было приостановлено, но она продолжала по инерции снижаться до 14,3 °С (точка 3). При этом  $P_{м.п.}$  начало плавно нарастать от момента времени в точке 2 до момента времени в точке 3, что свидетельствовало о растущем сопротивлении потоку метана со стороны пористой среды. При этом величина  $\Delta V$  также нарастала, свидетельствуя об уменьшении объема выходящего газа из модели пласта. Логично предположить, что практически весь подаваемый на вход модели пласта газ идет на гидратообразование.

В результате в момент времени в точке 3 (см. рис. 6 и 7) произошло перекрытие всех фильтрационных каналов в испытываемой керновой модели пласта, и фильтрация метана через нее прекратилась.

Таким образом, параметры  $P_{м.п.}$  (см. рис. 6) и разница закачанного и выходящего объема газа (см. рис. 7) являются чувствительными для



исследования процессов гидратообразования в пористой среде.

Для изучения разложения гидратов в пористой среде модель пласта Чайнинского НГКМ, уже содержащая газовые гидраты метана (см. рис. 6 и 7), подвергалась нагреванию до комнатной температуры. При этом как вход, так и выход модели пласта подключались к точному измерительному насосу, поддерживаю-

щему постоянное давление в модели 20 МПа, а холодильная установка отключалась. Таким образом, как и в случае исследования модели месторождения Харасавэй-море, температура модели пласта Чайнинского НГКМ плавно повышалась до комнатной температуры 22,8 °С за счет естественного притока теплоты из помещения при постоянном пластовом давлении 20 МПа. Помимо регистрации температуры

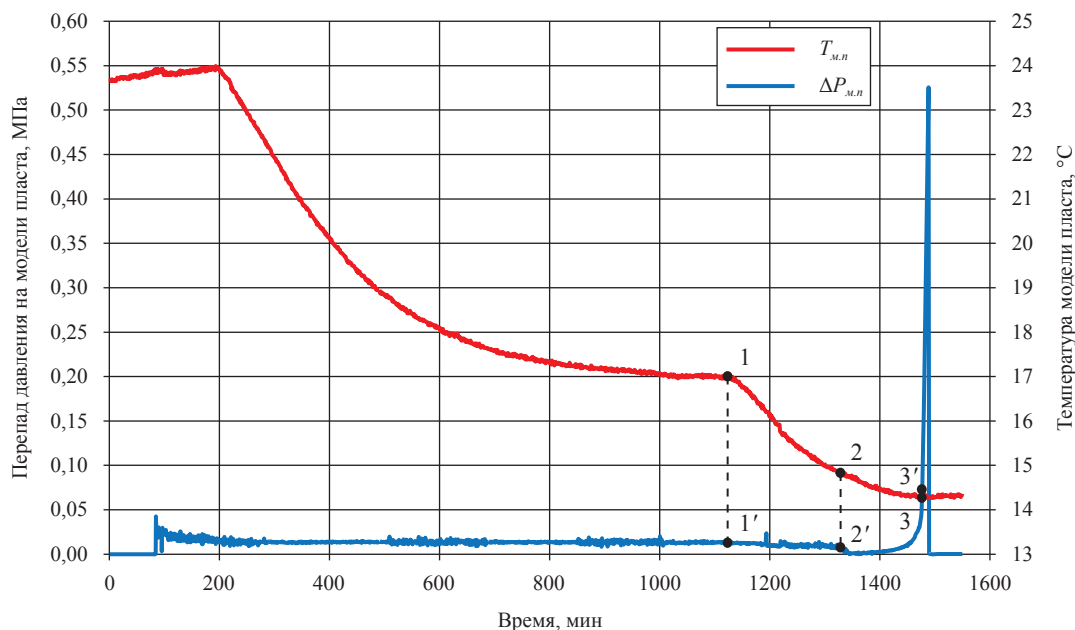


Рис. 6. Динамика перепада давления на керновой модели пласта при фильтрации метана через керновую модель пласта в процессе охлаждения

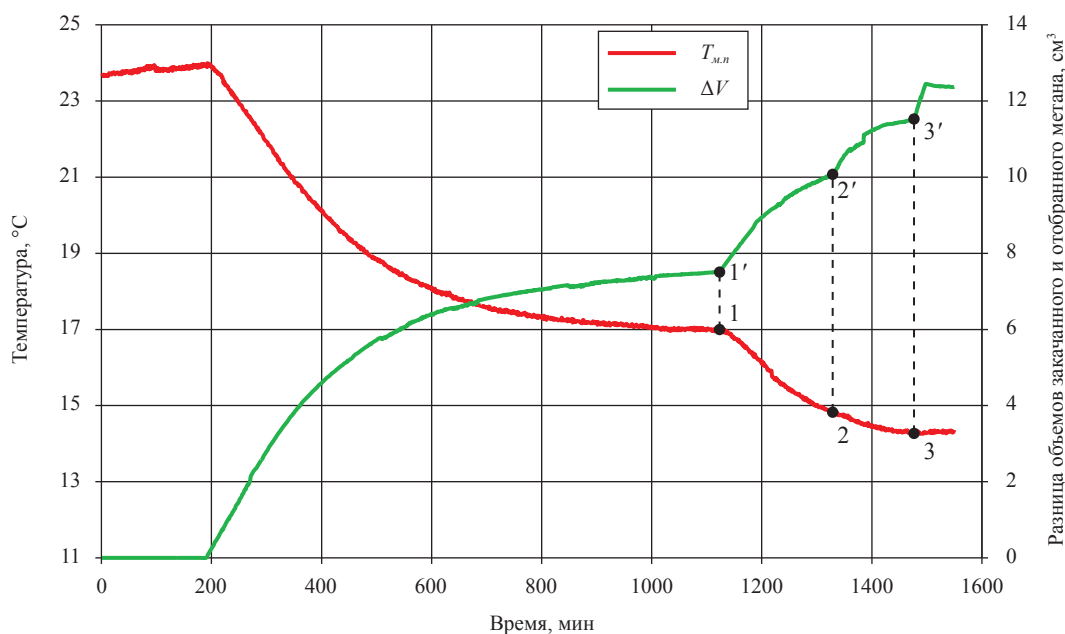


Рис. 7. Динамика разницы накопленных объемов нагнетающего и отбирающего метан насосов в процессе охлаждения

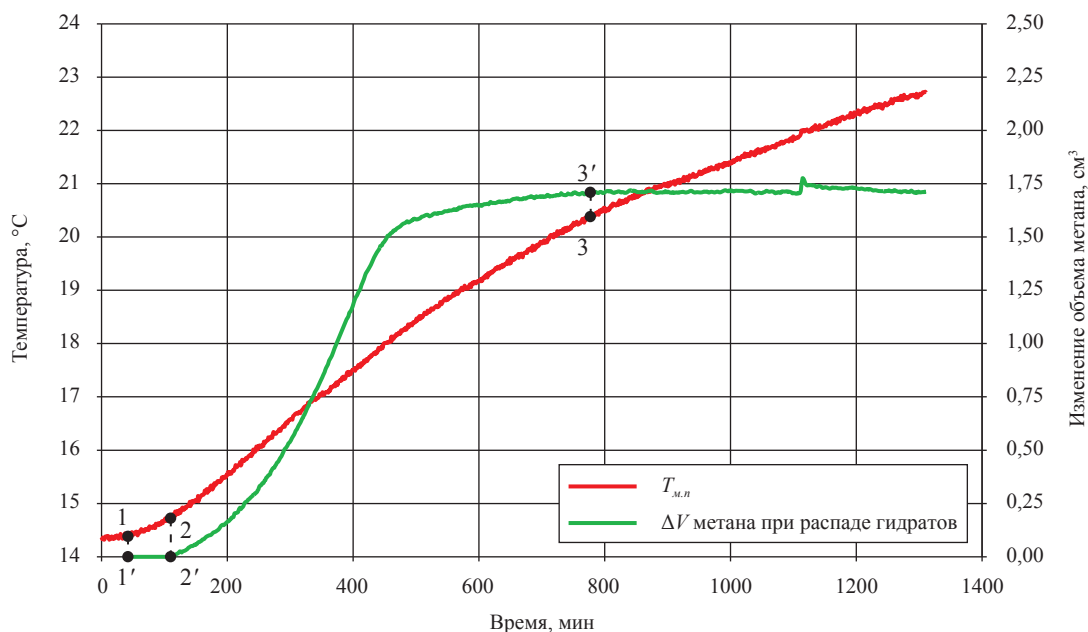


Рис. 8. Динамика объема выделяющегося из крновой модели пласта метана при разложении газогидратов в процессе нагревания

модели пласта производилась также запись избыточного  $\Delta V$  метана, появляющегося при разложении гидратов.

На рис. 8 показаны изменения  $T_{м.п.}$  и  $\Delta V$ , выделившегося из модели пласта при разложении газогидратов в процессе нагревания крновой модели Чаяндинского НГКМ: в точке 2 при  $T_{м.п.} \approx 14,7$  °C начинается процесс разложения газогидратов, который полностью заканчивается в точке 3 при  $T_{м.п.} \approx 20,4$  °C. Следовательно, в случае модели пласта Чаяндинского НГКМ зафиксированные  $T_{о.г.} = 14,8$  °C и  $T_{р.г.} = 14,7$  °C практически совпадают (при точности измерения температуры  $\pm 0,2$  °C). Сопоставление с литературными данными по трехфазному равновесию «газ – вода – гидрат» [1] и проведенный анализ возможного влияния пористой среды на сдвиг кривой гидратообразования (по схеме [3]) при заданной влажности крновой модели показывают, что в случае модели Чаяндинского НГКМ существенную роль играет метастабильное состояние системы (в отличие от модели месторождения Харасавэй-море).

Таким образом, проявление эффектов метастабильности при образовании и разложении гидратов метана при фильтрации газа существенно зависит от характеристик пористой сре-

ды. Сравнивая параметры исследованных моделей (см. табл. 2 и 3), отметим, что крновой материал месторождения Харасавэй-море характеризуется более чем в два раза большей пористостью и почти в 15 раз большей проницаемостью, чем крновой материал Чаяндинского НГКМ.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Разработана методика изучения закономерностей процессов образования и разложения газовых гидратов в пористой среде в реальных динамических условиях фильтрации флюидов и пластовых термобарических условиях.

2. Проведены исследования образования и разложения гидратов метана в моделях пласта месторождения Харасавэй-море и Чаяндинского НГКМ.

3. Выявлены фильтрационные параметры  $\Delta P$ , а также избыточного  $\Delta V$ , выделяющегося при разложении гидратов, как наиболее чувствительные к процессам образования и разложения газовых гидратов.

4. Замечено существенное влияние структуры порового пространства (пористости и проницаемости) на кинетику процессов образования/разложения газовых гидратов при фильтрации газа. Эта особенность заслуживает специального экспериментального изучения.

### Список литературы

1. Истомин В.А. Газовые гидраты в природных условиях / В.А. Истомин, В.С. Якушев. – М.: Недра, 1992. – 236 с.
2. Истомин В.А. Предупреждение и ликвидация газовых гидратов в системах добычи газа / В.А. Истомин, В.Г. Квон. – М.: ИРЦ Газпром, 2004. – 508 с.
3. Chuvilin E.V. Residual nonclathrated water in sediments in equilibrium with gas hydrate, comparison with unfrozen water / E.V. Chuvilin, V.A. Istomin, S.S. Safonov // *Cols Region Science and Technology*. – 2011. – V. 68. – P. 68–73.
4. Схаляхо А.С. Исследование условий образования природных газов в пористой среде и их влияние на продуктивную характеристику скважин: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.С. Схаляхо. – М., 1974. – 24 с.
5. Схаляхо А.С. Особенности фильтрации воды через гидратонасыщенные пористые среды / А.С. Схаляхо // *Сб. науч. тр. ЭИ «ВНИИЭГазпром»*. – 1982. – № 10. – С. 9–10. – (Серия «Геология, бурение и разработка газовых месторождений»).
6. Тер-Саркисов Р.М. Компьютеризированные установки многофазной фильтрации и их применение при разработке методов повышения конденсатоотдачи / Р.М. Тер-Саркисов, В.А. Николаев, С.Г. Рассохин и др. // *Повышение углеводородоотдачи пласта газоконденсатных месторождений*. – М.: ВНИИГАЗ, 1998. – С. 27–38.
7. Пат. 103408 Российская Федерация, МПК 8: G05 D 23/30. Термостат / А.Ф. Соколов, А.Е. Рыжов, С.Г. Рассохин и др.; заявитель и патентообладатель ООО «Газпром ВНИИГАЗ». – № 2010136544. – Оpubл. 10.04.2011. Бюл. № 10.
8. ОСТ 39-195-86. Нефть. Метод определения коэффициента вытеснения нефти водой в лабораторных условиях.
9. ОСТ 39-235-89. Нефть. Метод определения фазовых проницаемостей в лабораторных условиях при совместной стационарной фильтрации.

### References

1. Istomin V. A. Gas hydrates in natural conditions / V.A. Istomin, V.S. Yakushev. – Moscow: Nedra, 1992. – 236 p.
2. Istomin V. A. Prevention and liquidation of gas hydrates in gas production systems / V.A. Istomin, V.G. Kvon. – Moscow: IRTs Gazprom, 2004. – 508 p.
3. Chuvilin E.V. Residual nonclathrated water in sediments in equilibrium with gas hydrate, comparison with unfrozen water / E.V. Chuvilin, V.A. Istomin, S.S. Safonov // *Cols Region Science and Technology*. – 2011. – V. 68. – P. 68–73.
4. Skhalyakho A.S. Study of natural gas formation conditions in porous medium and their impact on productive characteristics of wells: synopsis of thesis ... of the candidate of engineering / A.S. Skhalyakho. – Moscow, 1974. – 24 p.
5. Skhalyakho A.S. Peculiar features of water filtration through hydrate-saturated porous media / A.S. Skhalyakho // *Collection of scientific papers of EI VNIIEGazprom*. – 1982. – № 10. – P. 9–10. – (Geology, Drilling and Exploitation of Gas Fields).
6. Ter-Sarkisov R.M. Computerized units of multi-phase filtration and their use for development of condensate recovery improvement methods / R.M. Ter-Sarkisov, V.A. Nikolayev, S.G. Rassokhin et al. // *Improvement of hydrocarbon recovery of the reservoir at gas-condensate fields*. – Moscow: VNIIGAZ, 1998. – P. 27–38.
7. Pat. 103408 Russian Federation, IPC 8: G05 D 23/30. Thermostat / A.F. Sokolov, A.E. Ryzhov, S.G. Rassokhin et al.; bidder and patent owner of Gazprom VNIIGAZ LLC. – № 2010136544. – Published on 10.04.2011. Bulletin № 10.
8. OST 39-195-86. Oil. Method for determination of the coefficient of oil replacement with water in laboratory conditions.
9. OST 39-235-89. Oil. Method for determination of phase permeability in laboratory conditions in the event of joint stationary filtration.