

эффицентом трения (латеральные силы). Размер отдельного образования колеблется от 10 до 20 нм, а граница между ними составляет 2-5 нм.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что метод АСМ может успешно применяться для исследований поверхностной структуры и характеристик пленок серебра. Наблюдение нанообъектов указывает на возможность получения нанопленок гальванометодом. Характерной особенностью пленок серебра, полученных гальваническим способом, является наличие строго ориентированных нитей кристаллитов и присутствие фигур роста, предположительно являющихся кластерными образованиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коротаев А.Д., Мошков В.Ю., Овчинников С.В. и др. Наноструктурные и нанокондитные сверттвердые покрытия / Физическая мезомеханика. Т. 8. 2005. Вып. 5. С. 103-116.
2. Грабов В.М., Демидов Е.В., Комаров В.А. Атомно-силовая микроскопия пленок висмута / Физика твердого тела. Т. 50. 2008. Вып. 7. С. 1312-1316.
3. Решетняк Е.Н., Стрельницкий В.Е. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий / Вопросы атомной науки и техники: Сер. «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2008. № 2. С. 119.

*Александр Борисович ШАБАРОВ —
зав. кафедрой механики многофазных систем,
доктор технических наук, профессор*

*Альбина Вольфовна ШИРШОВА —
доцент кафедры механики многофазных систем,
кандидат физико-математических наук*

*Михаил Юрьевич ДАНЬКО —
аспирант кафедры механики многофазных систем*

Тюменский государственный университет

*Надежда Сергеевна КОМИССАРОВА —
исследователь Института криосферы Земли СО РАН
ashabarov@utmn.ru*

УДК 546.212

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОГИДРООБРАЗОВАНИЯ ПРОПАН-БУТАНОВОЙ СМЕСИ EXPERIMENTAL STUDY OF GAS HYDRATE FORMATION OF PROPANE-BUTANE MIXTURE

АННОТАЦИЯ. Разработана экспериментальная методика определения скорости роста газового гидрата, основанная на циклическом изменении давления газа. Представлены результаты для пропан-бутановой смеси в области положительных температур. Впервые, на основе полученных экспериментальных результатов и известных данных о структуре газогидратов, рассчитаны кинетические параметры и проведена оценка коэффициента диффузии газа в газогидрат.

SUMMARY. A new experimental method to determine the gas hydrate evolution velocity is developed. It is based on gas pressure cyclical changing. The results for propane-butane mixture in the range of over temperatures are presented. For the first time, kinetic parameters were calculated on the basis of experimental results and structure data. Also the diffusion coefficient for gas to gas hydrate is evaluated.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Газогидраты, скорость роста, коэффициент диффузии.
KEY WORDS. Gas hydrate, evolution velocity, diffusion coefficient.

В последнее время значительно возрос интерес к исследованию свойств газовых гидратов. Природные газовые гидраты рассматриваются как перспективные источники углеводородного сырья. Согласно имеющимся оценкам, запасы природного газа, сосредоточенного в газогидратной фазе, весьма значительны [1]. Вместе с тем газовые гидраты, существующие при температурах и давлениях, близких к условиям их разложения, представляют потенциальную экологическую опасность — в случае смещения теплового равновесия освободившийся метан может внести весомый вклад в «парниковый эффект» [2]. В связи с этим знание термодинамических свойств газовых гидратов весьма важно для оценки их поведения как при освоении газогидратных месторождений, так и для совершенствования технологий транспорта и хранения природного и нефтяного газов.

Однако основное внимание в большинстве работ уделяется изучению гидратообразования метана [3], [4], тогда как исследование газогидратов, полученных из смесей других газов, также входящих в состав природного газа, (например, пропан-бутановой смеси) проводятся сравнительно редко. Эти исследования представляют научный интерес с точки зрения изучения возможностей транспортировки бытового газа в твердом состоянии, а также изучения способа разделения смеси газов при помощи газогидратации. В нашей работе описывается экспериментальное исследование скорости роста газогидрата на примере пропан-бутановой смеси.

Описание экспериментальной установки. На рис. 1. показана схема экспериментальной установки, предназначенной для изучения кинетики роста и диссоциации газовых гидратов, созданной на кафедре механики многофазных систем Тюменского государственного университета. Установка рассчитана на давление порядка 1,6 МПа и температуру до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. С ее помощью можно получать не только гидраты пропана, но и гидраты некоторых других газов, например, фреона.

Основным элементом установки является реактор высокого давления, в котором при контролируемых условиях образуются (диссоциируют) газогидраты. Реактор представляет собой ячейку, изготовленную из оргстекла, что позволяет осуществлять визуальный контроль процессов, происходящих внутри него. Ячейка имеет форму цилиндрического стакана объемом около 286 см^3 . Толщина ее стенки — 12 мм, что дает возможность работать при давлении до 1,6 МПа. В него помещается реагент (вода) и закачивается газ. Ячейка герметизируется фланцевым соединением. Контроль давления в реакторе осуществляется датчиком давления (Wika). Для соединения патрубков главного и дополнительного баллонов, а также патрубка самого реактора в установке предусмотрен тройник. Он позволяет связать элементы установки в одну систему. На тройнике имеются 3 крана, позволяющие регулировать давление в элементах системы. С помощью тройника можно понизить давление в реакторе или же полностью стравить газ, не разбирая реактор.

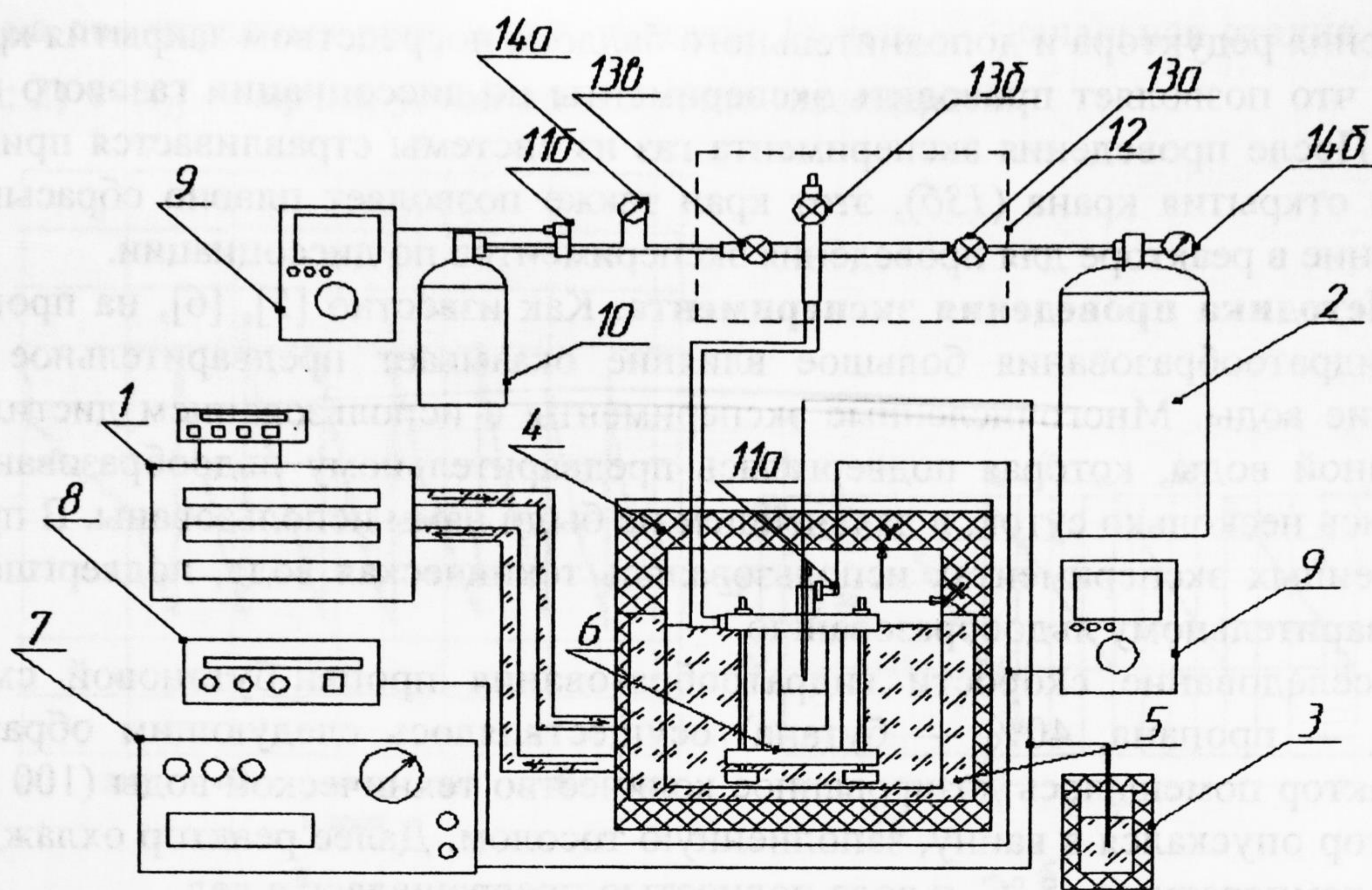


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

- 1 — термостат; 2 — баллон с газом; 3 — термостат для контрольного щупа термопары; 4 — крышка теплообменника; 5 — первый контур теплообменника; 6 — реактор; 7 — компаратор (прибор для измерения малых потенциалов); 8 — источник тока для питания мешалки и датчика давления; 9 — мультиметр; 10 — дополнительный баллон; 11а, 11б — датчики давления; 12 — тройник; 13а, 13б, 13в — игольчатые вентили; 14а, 14б — редукторы

Контроль температуры производится при помощи медь-константановой термопары. Сигналы с датчика давления и термопары принимаются и усиливаются компаратором, обеспечивающим высокую точность измерений. Например, температуру можно измерить с точностью до сотой градуса, а давление с точностью до 0,01 МПа. Термопара устанавливается в крышке реактора и закрепляется с двух сторон конусным уплотнением, что дает возможность регулировать ее положение по высоте.

Для изменения и поддержания температуры используется термостат KRIO-VT-01. В термостате имеется встроенный насос, конструктивным недостатком которого является то, что с его помощью нельзя организовать циркуляцию хладагента (тосола) в открытом сосуде. Поэтому в установке предусмотрен теплообменник (размер 400×400×300 мм), состоящий из двух контуров. По внешнему контуру осуществляется циркуляция тосола из термостата. Во внутреннем, также заполненном тосолом, находится реактор.

Конструктивной особенностью установки является возможность поддержания постоянного давления на протяжении длительного промежутка времени. Поэтому в установке используются фитинговые соединения, выдерживающие давления до 80 атм. Для плавной регулировки давления применяются игольчатые краны WHITEY (фирма SWAGELOK), рассчитанные на давление 50 атм. Кран (13а) обеспечивает подключение системы к баллону с сжиженным газом. Основным элементом системы контроля количества газа является редуктор (14), который поддерживает постоянное давление внутри реактора, отбирая газ из дополнительного баллона (13). К нему подключен датчик давления (11а), по показаниям которого снимается кривая скорости роста газового гидрата в ячейке. В системе предусмотрена возможность от-

ключения редуктора и дополнительного баллона посредством закрытия крана (13в), что позволяет проводить эксперименты по диссоциации газового гидрата. После проведения эксперимента газ из системы стравливается при помощи открытия крана (13б), этот кран также позволяет плавно сбрасывать давление в реакторе для проведения экспериментов по диссоциации.

Методика проведения эксперимента. Как известно [5], [6], на процесс газогидратообразования большое влияние оказывает предварительное состояние воды. Многочисленные эксперименты с использованием дистиллированной воды, которая подвергалась предварительному льдообразованию, длились несколько суток, в дальнейшем не были нами использованы. В представленных экспериментах использовались техническая вода, подвергшаяся предварительному льдообразованию.

Исследование скорости гидратообразования пропан-бутановой смеси (60% — пропана, 40% — бутана) осуществлялось следующим образом. В реактор помещалось дозированное количество технической воды (100 мл). Реактор опускался в ванну, заполненную тосолом. Далее реактор охлаждался до температуры $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, и вода полностью превращалась в лед.

Перед подачей газа система нагревалась до наступления положительной температуры в реакторе, в диапазоне от $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Затем температура в реакторе стабилизировалась, а оттаявшая вода насыщалась газом при давлении, равном давлению насыщения при данной температуре. В таком состоянии система выдерживалась 50-60 минут. Затем давление повышалось, и начинался рост газогидрата, что фиксировалось по падению давления. Кроме того, процесс гидратообразования контролировался визуально. Таким образом, стабильность протекания процесса гидратообразования обеспечивалась поддержанием в реакторе определенных термобарических условий. В частности, в наших экспериментах температура устанавливалась постоянной, а давление периодически восстанавливалось до постоянного максимального значения. Допускалось падение давления на величину от 1 до 1,5 атм. в разных экспериментах. Временной интервал, на котором происходило падение давления на допустимую условиями эксперимента величину, в дальнейшем обозначим периодом T .

В качестве варьируемых параметров в экспериментах выбраны: степень переохлаждения Δt и степень пересыщения ΔP :

$$\Delta t = t - t_n, \quad \Delta P = P - P_n,$$

где t_n и P_n — температура и давление равновесия (насыщения), определяемые из фазовой диаграммы газогидратов.

К выходным величинам эксперимента относятся:

1) T — период, за который давление падает на 0,15 МПа.

2) $\frac{\Delta P}{\Delta \tau} = v_p$ МПа/с — скорость изменения давления за время $\Delta \tau$.

Результаты эксперимента. Поскольку процесс гидратообразования протекает при постоянной температуре с периодической подкачкой газа до первоначально принятой максимальной величины давления, исходная экспериментальная кривая изменения давления от времени имеет пилообразный характер (рис. 2а). Как видно из рис. 2б, кривую $P(\tau)$ можно условно разде-

лить на два неравных временных участка: 1) $\tau < \tau_0$ — начальная стадия процесса; 2) $\tau > \tau_0$ — время устойчивого роста газогидрата.

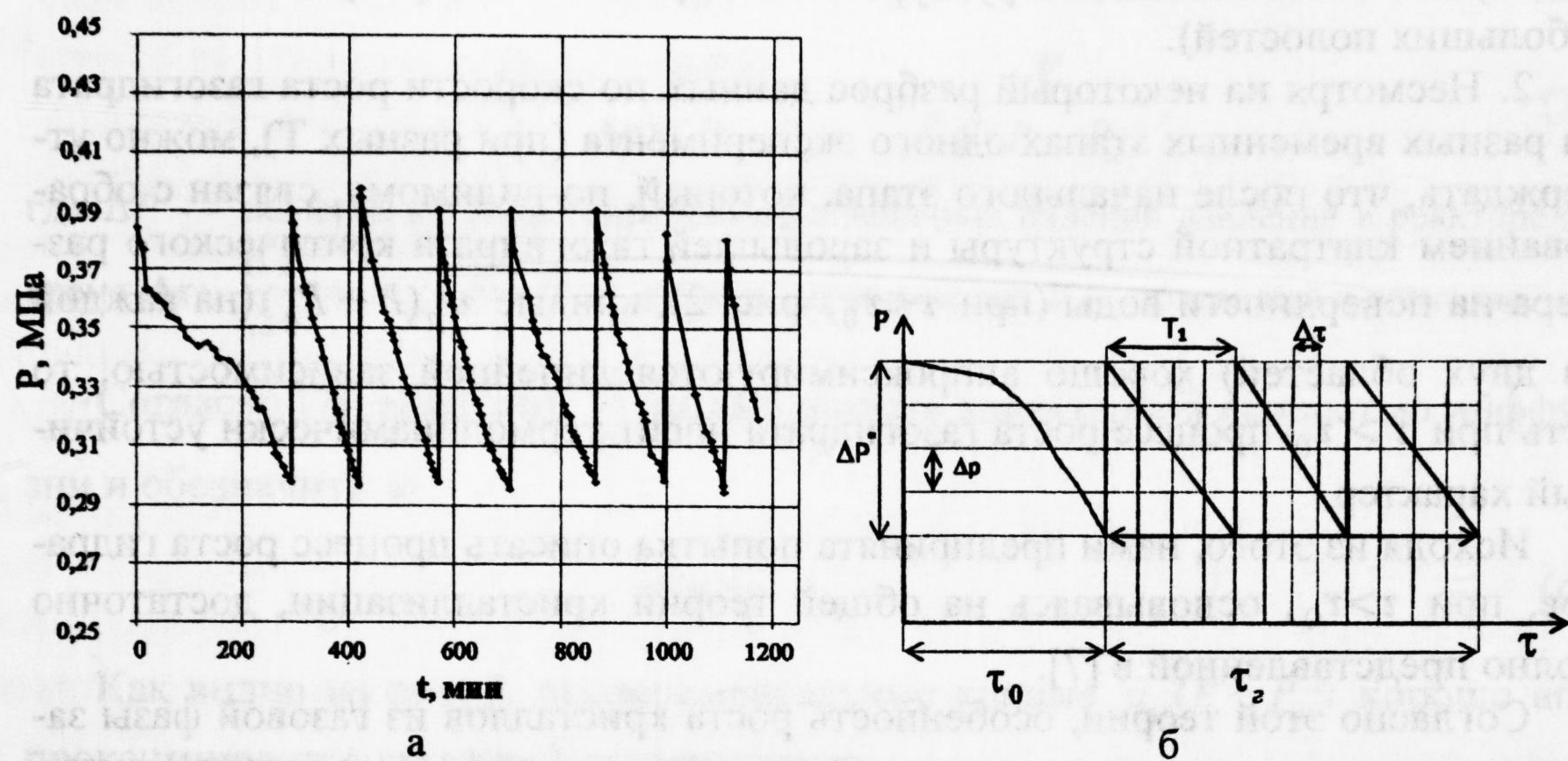


Рис. 2. Зависимость давления от времени при $t=4,1\text{ }^\circ\text{C}$:
 верхняя кривая — экспериментальная; нижняя — общий вид зависимости,
 поясняющий методику обработки кривой на рис. 2а

Для нахождения скорости падения давления v_p на экспериментальную кривую $P(\tau)$, при $\tau < \tau_0$ наносились линии сетки, шаг которой по давлению выбирался по таблицам исходных экспериментальных данных (рис. 2б) При такой схеме вычислений шаг времени также не являлся постоянной величиной. На рис. 3 представлены кривые изменения v_p от приращения давления $(P - P_n)$, полученные при обработке описанным выше методом результатов двух экспериментов.

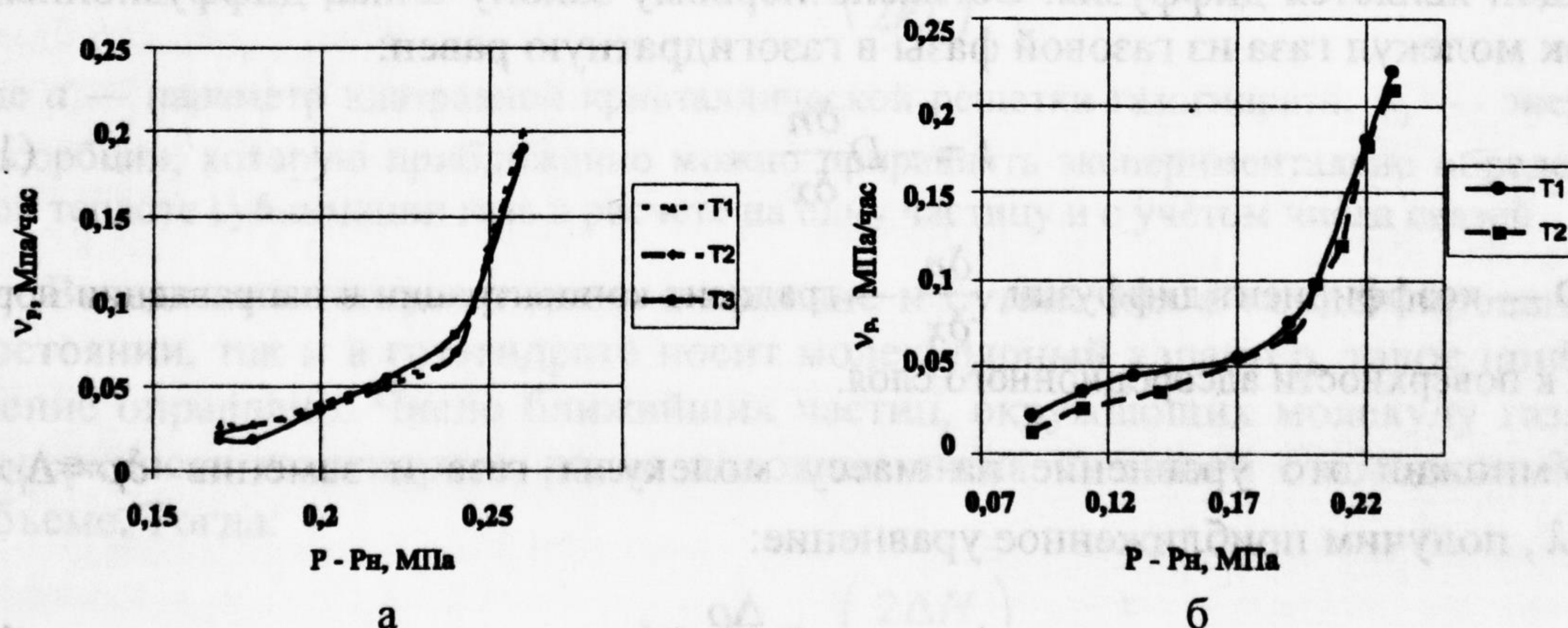


Рис.3. Зависимость скорости гидратообразования v_p от степени пересыщения $P - P_n$ при разных периодах T эксперимента: а) $t=4,1\text{ }^\circ\text{C}$, б) $t=2,0\text{ }^\circ\text{C}$

Обсуждение результатов эксперимента. Расчет кинетических параметров гидратообразования. Проанализировав кривые $v_p = v_p(P - P_n)$, мы пришли к следующим основным выводам.

1. На всех кривых имеются резко выраженные две области, отличающиеся углом наклона, то есть имеется точка излома, ниже которой скорость роста

уменьшается значительно медленнее с уменьшением степени пересыщения, что можно объяснить или наличием в газе- гидрообразователе молекул двух видов, или особенностями структуры газогидрата КС-II (присутствием малых и больших полостей).

2. Несмотря на некоторый разброс данных по скорости роста газогидрата на разных временных этапах одного эксперимента (при разных T), можно утверждать, что после начального этапа, который, по-видимому, связан с образованием клатратной структуры и зародышей газогидрата критического размера на поверхности воды (при $\tau < \tau_0$, рис. 2), кривые $v_p(P - P_n)$ (на каждой из двух областей) хорошо аппроксимируются линейной зависимостью, то есть при $\tau > \tau_0$ процесс роста газогидрата носит термодинамически устойчивый характер.

Исходя из этого, нами предпринята попытка описать процесс роста гидратов, при $\tau > \tau_0$, основываясь на общей теории кристаллизации, достаточно полно представленной в [7].

Согласно этой теории, особенность роста кристаллов из газовой фазы заключается в том, что на поверхности раздела кристалла (газогидрата) существует адсорбционный слой, который отличается по свойствам и от кристалла и от газовой среды. Явления в этом слое в газогидратах еще недостаточно изучены. Различают две основных стадии поверхностных процессов: 1) переход газа в адсорбционный слой; 2) встраивание молекул газа непосредственно в уже имеющуюся клатратную решетку.

В отличие от работ [8], [9], основанных на традиционных допущениях общей теории кристаллизации и уравнении диффузии, нам удалось рассчитать некоторые кинетические параметры и оценить коэффициент диффузии газа в газогидрат, используя экспериментальные результаты и известные данные о кристаллической структуре газогидратов.

Как известно, при рассмотрении процесса роста газогидратов определяющей является диффузия. Согласно первому закону Фика, диффузионный поток молекул газа из газовой фазы в газогидратную равен:

$$I = -D \frac{\delta n}{\delta x}, \quad (1)$$

где D — коэффициент диффузии, $\frac{\delta n}{\delta x}$ — градиент концентрации в направлении нормали к поверхности адсорбционного слоя.

Умножив это уравнение на массу молекулы газа и заменив $\delta \rho \approx \Delta \rho$, $\delta x \approx \lambda$, получим приближенное уравнение:

$$\Delta m_2 = -D \frac{\Delta \rho}{\lambda} S \Delta \tau, \quad (2)$$

где Δm_2 — масса газа, перешедшая в гидрат за время $\Delta \tau$, S — площадь адсорбционного слоя; $\Delta \rho$ — разность плотностей газа над адсорбционным слоем и в нем; λ — средняя длина диффузионного пробега.

Величину Δm_2 можно рассчитать по уравнению состояния идеального газа через экспериментально определяемое падение давления (расчет для

реального газа по формуле Редлиха–Квонга отличается лишь на 5%). Тогда приняв, что $\Delta\rho \approx \rho - \rho_n$ и $\rho = \frac{PM}{RT}$ (2) можно записать в виде:

$$\frac{D}{\lambda} = \frac{\Delta PV}{\Delta\tau S(P - P_n)} = v_p \frac{V}{S(P - P_n)}, \quad (3)$$

где ΔP — экспериментально определяемая величина падения давления в реакторе за время $\Delta\tau$; $\frac{\Delta P}{\Delta\tau} = v_p$, $P - P_n$ — степень пересыщения; V — объем газа в реакторе.

Согласно [7], величину $\frac{D}{\lambda}$ можно назвать характерной скоростью диффузии и обозначить ω :

$$\omega = \frac{D}{\lambda} \quad (4)$$

Как видно из рис. 3, экспериментальные кривые $v_p(P - P_n)$ хорошо аппроксимируются линейной зависимостью:

$$v_p = \beta_p(P - P_n), \quad (5)$$

где β_p — кинетический коэффициент [7] равный тангенсу угла наклона прямых.

Вводя кинетический коэффициент β_p в (3) получаем:

$$\omega = \beta_p \frac{V}{S}. \quad (6)$$

Для расчета λ (4) (длина диффузионного пробега) воспользуемся следующей формулой, также предложенной в [7]:

$$\lambda = 2a \exp\left(\frac{\varepsilon_s}{2kT}\right), \quad (7)$$

где a — параметр клатратной кристаллической решетки газогидрата; ε_s — энергия адсорбции, которую приближенно можно приравнять экспериментально определенной теплоте сублимации газа в расчете на одну частицу и с учетом числа связей.

Вследствие того, что связь в пропане и бутане как в конденсированном состоянии, так и в газогидрате носит молекулярный характер, такое приближение оправдано. Число ближайших частиц, окружающих молекулу газа на поверхности газогидрата, равно половине числа Z связей с соседями в его объеме. Тогда:

$$\lambda = 2a \exp\left(\frac{2\Delta H}{2RTz_1}\right), \quad (8)$$

где индекс 1 означает учет только ближайших соседей; ΔH — экспериментально определяемая молярная теплота сублимации.

Для молекулярных и водородных связей этот учет является достаточно точным приближением.

Для пропана и бутана удельные теплоты сублимации $\Delta H^{уд}$ равны соответственно 426,5 кДж/кг, 386 кДж/кг [10], то есть отличаются не более чем на

10%. И, следовательно, итоговая формула нахождения коэффициента диффузии имеет вид:

$$D = \lambda\omega = 2a \exp\left(\frac{\Delta H^{yo} M}{z_1 RT}\right) \beta_p \frac{V}{S}, \quad (9)$$

где M — молярная масса газа; ΔH^{yo} — удельная теплота сублимации газа.

Так как исследуемый нами газогидрат пропан-бутановой смеси имеет структуру вида КС-II, то для него характерны полости в водных клатратных каркасах: D[5¹²] и H [5¹²6³]. Число ближайших соседей, окружающих молекулу газа в пентагондодекаэдрических полостях в объеме газогидрата составляет $z_1=20$ (число вершин многогранника).

Результаты расчета для трех экспериментов, отличающихся температурой и различным состоянием воды, представлены в табл. 1. Учитывая, что все кривые $v_p(P - P_n)$ имеют две резко выраженные области, отличающиеся углом наклона, нами были рассчитаны кинетические параметры для двух диапазонов ($P - P_n$).

Таблица 1

Результаты расчета кинетических параметров гидратообразования пропан-бутановой смеси

Кинетические параметры	Условия эксперимента		
	t=2,0 °C вода, ранее не подвергнутая газогидратообразованию	t=3,1 °C вода, ранее не подвергнутая газогидратообразованию	t=4,1 °C вода, ранее подвергнутая газогидратообразованию
$\beta_I, 1/\text{час}$	0,65±0,05	0,70±0,03	0,62±0,06
$\beta_{II}, 1/\text{час}$	3,11±0,06	3,10±0,09	6,52±0,07
$\omega_I, 10^{-6} \text{ м/с}$	18,8	19,6	17,6
$\omega_{II}, 10^{-6} \text{ м/с}$	85,2	85,2	184,8
$\lambda, 10^{-9} \text{ м}$	5,2		
$D_I, 10^{-14} \text{ м}^2/\text{с}$	9,8	10,2	9,2
$D_{II}, 10^{-14} \text{ м}^2/\text{с}$	44,3	44,3	96,3

Примечание. Индексы I и II в таблице относятся к областям с низкими и высокими давлениями, соответственно.

Из таблицы видно, что для всех трех экспериментов с учетом погрешности, значения кинетического коэффициента в первой области (при малых значениях пересыщения) совпадают, во второй области (для двух экспериментов) значения β_p совпадают и более чем в 4 раза превышают таковые в первой области, а для третьего эксперимента эта величина во второй области на порядок больше, чем на первой. Последний результат можно объяснить тем, что

в третьем опыте была использована вода, ранее подвергнутая гидратообразованию и, следовательно, остатки клатратной структуры воды сохранились во всем объеме воды. Таким образом, предыстория воды существенно влияет не только на время начала массового гидратообразования (τ_0 , рис. 2), но и на скорость роста при $\tau > \tau_0$.

Относительная погрешность в определении характерной скорости диффузии ω определяется погрешностью измерения экспериментальной величины β_p и, как видно из таблицы, не превышает 10%. Полученное нами значение D (коэффициент диффузии газа в газогидрат) носит оценочный характер, так как величина λ — средняя длина диффузионного пробега в (9) рассчитывалась для идеальной кристаллической структуры газогидрата и только для адсорбционного слоя.

Однако, сопоставляя полученный нами порядок величины D с известными в литературе теоретическими оценками для метана ($D \approx 10^{-14}$ м²/с) [11], у которого число полостей в кристаллической решетке газогидрата в три раза меньше, чем у пропана и бутана, можно утверждать об удовлетворительности предложенной нами методики расчета коэффициента диффузии газа в газогидрат.

Выводы

1. Создана экспериментальная установка для исследования кинетики газогидратообразования.

2. Разработана экспериментальная методика определения скорости газогидратообразования, основанная на циклическом изменении давления.

3. Получены результаты по изучению кинетики роста газогидрата на основе пропан-бутановой смеси в области положительных температур.

4. На кривых зависимости скорости газогидратообразования от степени пересыщения обнаружена точка излома, разделяющая кривые на две области с кинетическими коэффициентами β_p , отличающимися более чем в 4 раза.

5. Предложен метод определения коэффициента диффузии газа в газогидрат, основанный на экспериментальных результатах и известных данных о структуре газогидрата. Порядок полученной величины D для пропан-бутановой смеси соответствует теоретическими оценками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басниев К.С. Природные газогидраты: ресурсы, проблемы, перспективы // Сер. «Академические чтения». Вып. 28. М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. 20 с.

2. Бык С.Ш. Исследование условий образования гидратов природного газа // Газовая промышленность. № 7. 1957. С. 33-35.

3. Истомин В.А. Термодинамика природного газа. М.: ИРЦ Газпром, ВНИИГАЗ, 1999. 106 с.

4. Истомин В.А., Деревягин А.М. Фундаментальные исследования свойств газовых гидратов для решения проблем добычи и хранения природного газа / Современное состояние газогидратных исследований в мире и практические результаты для газовой промышленности. М.: ИРЦ Газпром, 2004. С. 17-20.

5. Bishnoi, P.R., Natarajan, V., Kalogerakis, N. A unified description of the kinetics of hydrate nucleation, growth, and decomposition // Ann. NY Acad. Sci. V. 715. 1994. P. 311-321.

6. Макогон Ю.Ф. Природные газогидраты: открытие и перспективы // Газовая промышленность. 2001. № 5. С. 10-16.

7. Чернов А.А. и др. Современная кристаллография. Т. 3. Образование кристаллов. М.: Наука, 1980. 411 с.
8. Bishnoi, P.R., Natarajan, V., Kalogerakis, N. A unified description of the kinetics of hydrate nucleation, growth, and decomposition // Ann. NY Acad. Sci. V. 715. 1994. P. 311-321.
9. Истомин В.А., Якушев В.С. Исследования газовых гидратов в России // Газовая промышленность. 2001. № 6. С. 49-53.
10. Волков А.И., Жарский И.М. Большой химический справочник: Совр. школа. 2005. 607 с.
11. Гройсман А.Г. Теплофизические свойства газовых гидратов. Новосибирск: Наука, 1985. 184 с.

Юрий Вавилович ПАХАРУКОВ —
профессор кафедры механики многофазных систем,
доктор физико-математических наук

Геннадий Викторович БАХМАТ —
профессор кафедры механики многофазных систем,
кандидат технических наук
gennadiy.bakhmat@gmail.com

Тюменский государственный университет

УДК 621.928.37

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕВОГО РАЗДЕЛЕНИЯ МНОГОФАЗНЫХ СИСТЕМ

PHYSICS-MATHEMATICAL MODELLING OF SWIRLING DEVISION OF MULTIPHASE SYSTEM

АННОТАЦИЯ. Показано, что изменение сжимаемости в газонасыщенной жидкости в результате закрутки потока делает систему неустойчивой за счет перевода в область, близкую к спинодали. Процесс дегазации при этом является результатом выхода системы в область неустойчивости и проявляется как фазовый переход первого рода.

SUMMARY. The article shows that changing the pressing in gas-saturated liquid as a result of the flow swirling makes the system unstable because of transfer to the field close to spinodal. The process of degassing at this time is the result of system's entering the field of instability and is manifested as a phase transfer of the first type.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Дегазация, вихревой поток, неустойчивость жидкость газ, диспергированность.

KEY WORDS. Degassing, vortex flow, instability of liquid gas, dispersion.

В настоящее время сокращение потерь жидкой фазы решается путем применения многоступенчатых методов дегазации с обязательным плавным изменением давления в широком диапазоне. Использование объемных гравитационных трапов-газосепараторов позволяет частично решать эти задачи. Однако низкая скорость движения газа, невысокая степень дегазации в объемных трапах делают эти методы малоэффективными.

В существующих в настоящее время конструкциях гидроциклонов для дегазации нефти отделение свободного газа происходит в основном за счет сил гравитации, а центробежные силы используются недостаточно эффективно.

Технологии вихревого разделения многофазных углеводородных смесей в вихревых камерах позволяют за счет оптимального использования энергии потока значительно увеличить производительность оборудования, снизить