

# ФИЗИКА

© И.К. ГИМАЛТДИНОВ, Н.Г. МУСАКАЕВ,  
М.К. ХАСАНОВ, М.В. СТОЛПОВСКИЙ

*iljas\_g@mail.ru, timms@tmn.ru, hasanovmk@mail.ru, s\_maxim.pmm@mail.ru*

УДК 532.546:536.421

## **ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА РАЗЛОЖЕНИЯ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ ПРИ ТЕПЛОВОМ И ДЕПРЕССИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИЯХ В ПЛАСТЕ КОНЕЧНОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ\***

*АННОТАЦИЯ. Представлены решения задачи о разложении газового гидрата при отборе газа из пористого пласта конечной протяженности, изначально насыщенного газом и гидратом.*

*SUMMARY. The article offers the solution of a problem on dissociation of gas hydrate at selection of gas from the porous reservoir of final extent, initially sated with gas and hydrate.*

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Газовый гидрат, пористый пласт, отбор газа, диссоциация.*

*KEY WORDS. Gas hydrates, porous reservoir, gas selection, dissociation.*

В настоящее время газовые гидраты — соединения, образующиеся из газа и воды при определенных термобарических условиях — многими исследователями рассматриваются в качестве потенциального источника природного газа. В этой связи возникает необходимость в исследованиях процесса разложения газовых гидратов в пористых структурах. Некоторые особенности данного процесса представлены в статьях [1], [2]. В данной работе на основе конечно-разностного метода построены решения задачи о разложении газового гидрата в пористых пластах конечной длины.

Рассмотрим плоскоодномерную задачу об отборе газа (метана) из пласта, содержащего в исходном состоянии газ и гидрат. При теоретическом описании процессов тепломассопереноса примем следующие допущения: пористость постоянна, газ калорически совершенный, скелет пористой среды, гидрат и вода несжимаемы и неподвижны.

С учетом принятых допущений уравнения сохранения масс, импульсов, энергии и уравнение состояния для газа можно записать в виде [3]:

---

\* Работа выполнена при финансовом содействии Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-4381.2010.1).

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_g m S_g) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g m S_g v_g) &= -m G \rho_h \frac{\partial S_h}{\partial t}, \\ \frac{\partial}{\partial t}(m \rho_l S_l) &= -m(1-G) \rho_h \frac{\partial S_h}{\partial t}, \quad m S_g v_g = -\frac{k_g}{\mu_g} \frac{\partial p}{\partial x}, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho c T) + \rho_g c_g m S_g v_g \frac{\partial T}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + m \rho_h L_h \frac{\partial S_h}{\partial t}, \quad p = \rho_g R_g T. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь и далее нижние индексы  $sk, h, l$  и  $g$  относятся к параметрам скелета, гидрата, воды и газа соответственно;  $m$  — пористость;  $G$  — массовая концентрация газа в гидрате;  $\rho_j$  и  $S_j$  ( $j=sk, h, l, g$ ) — истинные плотности и насыщенности пор  $j$ -й фазы;  $v_g, k_g, c_g$  и  $\mu_g$  — соответственно скорость, проницаемость, удельная теплоемкость и динамическая вязкость газовой фазы;  $p$  — давление;  $T$  — температура;  $L_h$  — удельная теплота гидратообразования;  $\rho c$  и  $\lambda$  — удельная объемная теплоемкость и коэффициент теплопроводности системы. В рамках принятых допущений можно пренебречь переменностью удельной объемной теплоемкости  $\rho c$  и коэффициента теплопроводности системы  $\lambda$ .

Система уравнений (1) описывает процессы фильтрации и теплопереноса, сопровождающиеся диссоциацией газогидрата в пористой среде. Данная система уравнений дополняется зависимостью коэффициента проницаемости для газа от газонасыщенности, заданной на основе формулы Козени:  $k_g = k_0 S_g^3$ , где  $k_0$  — абсолютная проницаемость пласта.

Пусть пористый пласт длины  $L$  в начальный момент времени насыщен газом и гидратом, давление  $p_0$  и температура  $T_0$  которых в исходном состоянии соответствуют термодинамическим условиям существования их в свободном состоянии и изначально одинаковы во всем пласте:

$$t=0: S_h=v, T=T_0, p=p \quad (0 \leq x \leq L). \quad (2)$$

Через левую границу пласта, температура  $T_e$  которой поддерживается постоянной (например, с помощью нагревателя, помещенного на забой скважины), отбирается под давлением  $p_e$  газ, причем параметры  $p_e$  и  $T_e$  соответствуют условиям стабильного существования газа и воды и поддерживаются на этой границе постоянными:

$$x=0: T=T_e, p=p_e \quad (t > 0). \quad (3)$$

В общем случае при разложении гидрата возникают три характерные области: ближняя, насыщенная газом и водой и дальняя, заполненная газом и гидратом, а также промежуточная область, в которой газ, гидрат и вода находятся в состоянии термодинамического равновесия. При этом возникают две фронтальные границы  $x=x_{(i)}$  ( $i=n, d$ ), разделяющие между собой указанные области. На этих поверхностях, где терпят скачки насыщенности фаз, а также потоки массы и тепла, выполняются соотношения, следующие из условий баланса массы и тепла:

$$\begin{aligned} [m(S_h \rho_h(1-G) + S_l \rho_l) \dot{x}_{(i)}] &= 0, \\ [m(\rho_g S_g(v_g - \dot{x}_{(i)}) - \rho_h S_g G \dot{x}_{(i)}) = 0], \quad \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] &= [m \rho_h L_h S_h \dot{x}_{(i)}]. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $[\psi]$  — скачок параметра  $\psi$  на границе между зонами;  $\dot{x}_{(i)}$  — скорость движения  $i$ -й границы. Температура и давление на этих границах полагаются непрерывными.

В трехфазной области, где одновременно присутствуют газ, вода и гидрат, запишем условие равновесия фаз:

$$T = T_0 + T_* \ln(p/p_{s0}), \quad (5)$$

где  $T_0$  — исходная температура системы,  $p_{s0}$  — равновесное давление, соответствующее исходной температуре,  $T_*$  — эмпирический параметр, зависящий от вида газового гидрата.

Процесс диссоциации газогидрата возможен одновременно как в промежуточной области, так и на поверхности  $x = x_{(n)}$ , разделяющей ближнюю и промежуточную области. Поэтому будем полагать, что на данной поверхности происходит скачок гидратонасыщенности от  $S_h^- = 0$  до  $S_h^+ > 0$ , обусловленный разложением на этой границе некоторого количества гидрата. На поверхности  $x = x_{(d)}$ , разделяющей дальнюю и промежуточную области (на второй границе) и на которой процесс диссоциации гидрата заканчивается, значение гидратонасыщенности будем считать непрерывным и равным исходной гидратонасыщенности пласта:  $S_{h(d)}^- = S_{h(d)}^+ = v$ .

На правой границе пласта ( $x=L$ ) примем условие отсутствия кондуктивного потока тепла и постоянство давления (равное давлению в начальный момент времени  $p_0$ ):

$$x = L: \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad p = p_0 \quad (t > 0). \quad (6)$$

На основе системы уравнений (1) можно получить уравнения пьезо- и теплопроводности, которые описывают распределения давления и температуры в ближней и дальней областях:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{p}{T} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\aleph^{(p)}}{T} \frac{\partial p}{\partial x} \right), \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \aleph^{(T)} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\rho_g k_g c_g}{\mu_g \rho c} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (7)$$

где  $\aleph^{(T)} = \lambda / \rho c$  и  $\aleph^{(p)} = k_g p / \mu_g m S_g$  — коэффициенты температуропроводности и пьезопроводности.

В промежуточной области ( $x_{(n)} \leq x \leq x_{(d)}$ ) на основе системы (1) получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{p S_g}{T} \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{k_g p}{\mu_g T} \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \\ &- \rho c \frac{G R_g}{L_h} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\rho_g c_g k_g G R_g}{\mu_g L_h} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \lambda \frac{G R_g}{L_h} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (8) \\ \frac{\partial S_h}{\partial t} &= \frac{1}{\Delta T} \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\rho_g k_g c_g}{m \rho_h \mu_g L_h} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\lambda}{m \rho_h L_h} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \end{aligned}$$

где  $\Delta T = m \rho_h L_h / \rho c$ .

Кроме того, температура и давление в этой области связаны условием фазового равновесия (5), откуда следует:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_*}{p} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_*}{p} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{T_*}{p^2} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right)^2.$$

Для численного решения задачи (7), (8) с граничными условиями (2), (3) и (6) введем равномерную сетку с шагом  $\Delta x$ . Так как решение ищется в областях с двумя неизвестными границами фазовых переходов, то будем использовать метод ловли фронтов в узлы пространственной сетки [4]. Суть данного метода заключается в следующем: за один временной шаг фронт  $x = x_{(n)}$  перемещается по координате  $x$  ровно на один шаг, а узел, соответствующий границе  $x = x_{(d)}$ , находится в ходе решения задачи. При этом значения параметров на границе фазовых переходов, а также значение временного шага определяются из системы (4).

Все расчеты были проведены для системы «пористая среда-твердый газогидрат-газ» со следующими параметрами:  $m=0.1$ ,  $G=0.12$ ,  $k_0=10^{-13}$  м<sup>2</sup>,  $v=0.2$ ,  $\mu_g=10^{-5}$  Па·с,  $\lambda=2$  Вт/(м·К),  $\rho c=2.6 \cdot 10^6$  Дж/(кг·К),  $L_h=5 \cdot 10^5$  Дж/кг,  $\rho_h=900$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_l=1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $T_0=280$  К,  $T_*=10$  К,  $p_0=7$  МПа,  $p_{s0}=5.5$  МПа,  $c_g=1560$  Дж/(кг·К). При этом длина модельного пласта полагалась равной  $L=1$  м, шаг по пространственной координате  $\Delta x=0.001$  м.

Анализ полученных решений при отборе газа под давлениями  $p_e=5$  МПа и  $p_e=6$  МПа показал, что результаты расчетов на начальном этапе процесса диссоциации газового гидрата при отборе газа через левую границу пласта конечной протяженности практически совпадают с результатами автономной постановки задачи, т.е. в зависимости от параметров нагнетания газа и пористой среды газогидрат может разлагаться как на фронтальной поверхности, так и в протяженной области.

На рис. 1 представлено положение границы фазового перехода во времени при диссоциации газогидрата в случае отбора газа. Параметры газа на левой границе пласта ( $x=0$ ) равны  $p_e=6$  МПа,  $T_e=282$  К; начальные параметры пласта полагались равными  $p_0=7$  МПа,  $T_0=280$  К,  $v=0.2$ .

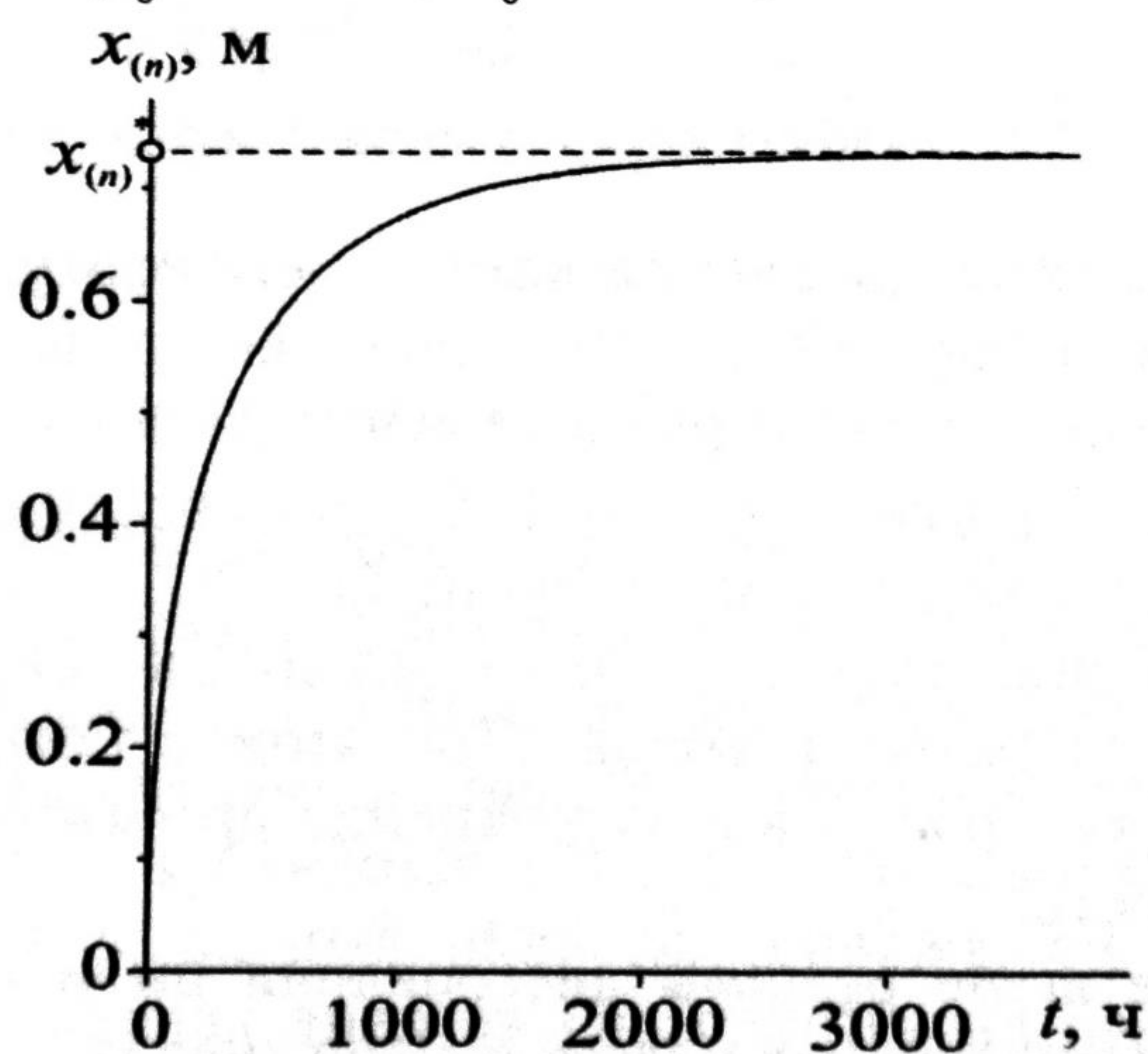


Рис. 1. Эволюция во времени границы фазового перехода при отборе газа

Как видно из рисунка, при данных параметрах нагнетаемого газа происходит «остановка» границы фазового перехода (обозначена через  $x_{(n)}^*$ ) В этой связи газовый гидрат в пласте полностью не разлагается.

На рис. 2 представлена фазовая диаграмма процесса диссоциации гидрата. Точкой «0» изображено состояние, соответствующее начальному состоянию пористой среды, а точкой «e» — условие на левой границе пласта ( $x = 0$ ). Пунктирная линия, построенная на основе распределения давления в пласте, соответствует равновесной температуре; сплошные линии 1, 2 и 3 построены в моменты времени  $t = 1.4, 13.8$  и  $51.7$  часа. Как следует из данного рисунка, с течением времени температура пласта становится равной температуре нагнетаемого газа. Однако профиль равновесной температуры пласта имеет вид линейной зависимости, возрастающей в глубь пласта. Поэтому при дальнейшем отборе газа в области ( $x > x_{(n)}^*$ ) температура пласта становится ниже равновесной температуры, т.е. в этой области присутствуют только газ и гидрат. Таким образом, на границе  $x = x_{(n)}^*$  процесс разложения гидрата заканчивается. Из рис. 2 также следует, что на этой границе давление с течением времени стремится к  $p_0$ . Поэтому, чтобы процесс разложения гидрата не прекращался, необходимо, чтобы температура на левой границе пласта была выше, чем равновесная температура, соответствующая начальному давлению на границе  $x = L$ :  $T_e > T_0 + T_* \ln(p/p_{s0})$

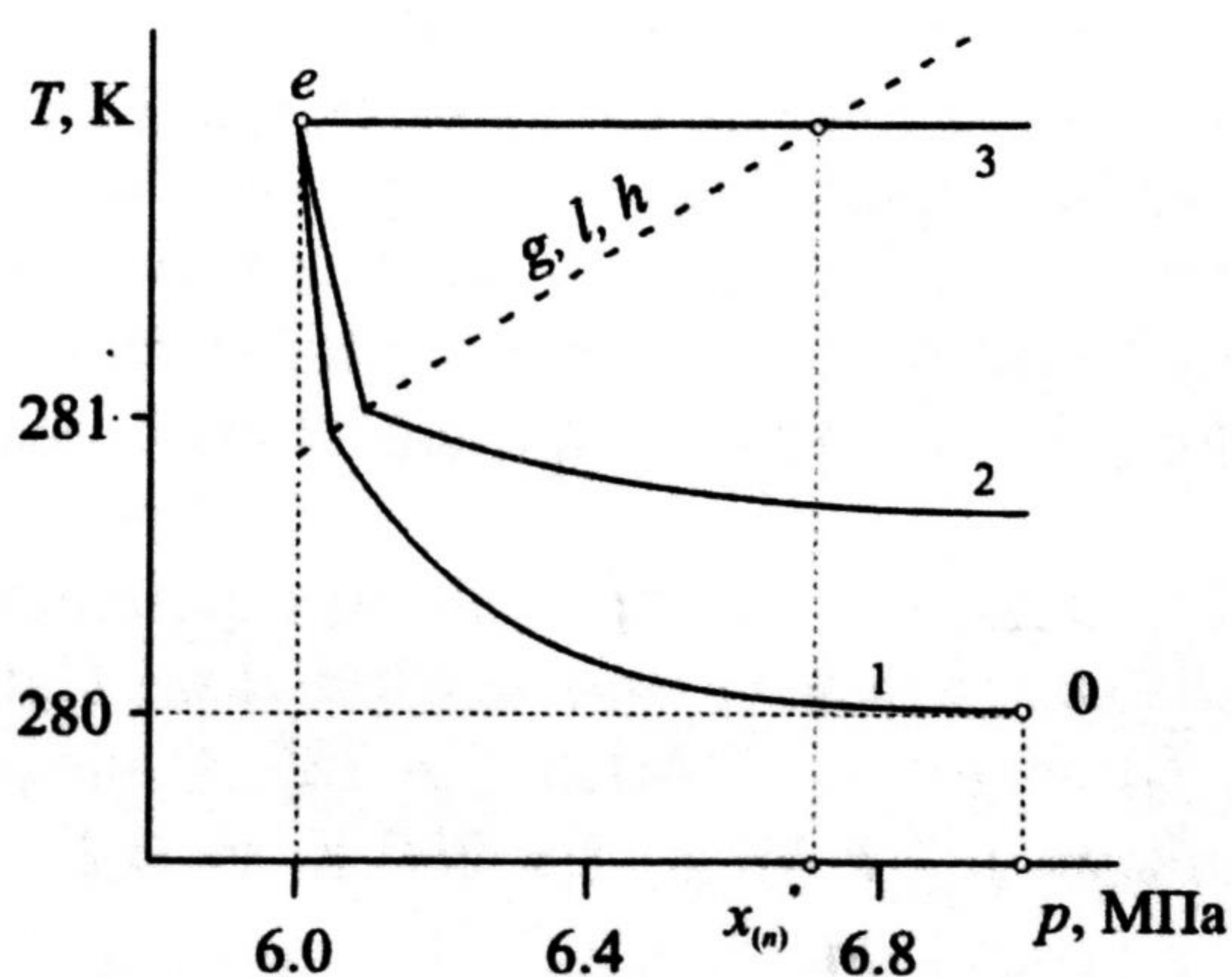


Рис. 2. Фазовая диаграмма разложения гидрата

На рис. 3 представлены распределения температуры и гидратонасыщенности пласта при отборе газа под давлением  $p_e = 5$  МПа и температурой  $T_e = 285$  К. Начальные параметры системы полагались равными  $p_0 = 6$  МПа,  $T_0 = 280$  К,  $v = 0.2$ . Как следует из рис. 2, при диссоциации газового гидрата в протяженной области задний ее фронт ( $x = x_{(n)}$ ) движется в глубь пласта быстрее, чем передний ( $x = x_{(d)}$ ), что приводит к сокращению области, насыщенной газом, гидратом и водой. При этом в некоторый момент происходит смыкание двух фронтов и вырождение протяженной области во фронтальную поверхность.

Рассмотренные выше режимы диссоциации были исследованы в предположении, что на левой границе пласта поддерживалась определенная темпера-

тура. В этом случае фронт диссоциации в любом случае доходит до правой границы пласта. Рассмотрим режим диссоциации газогидрата при отборе газа из пласта, когда в систему не подводится тепло, т.е. на левой границе  $x = 0$  ставятся условия:  $x=0: \frac{\partial T}{\partial x} p=p_e (t > 0)$ .

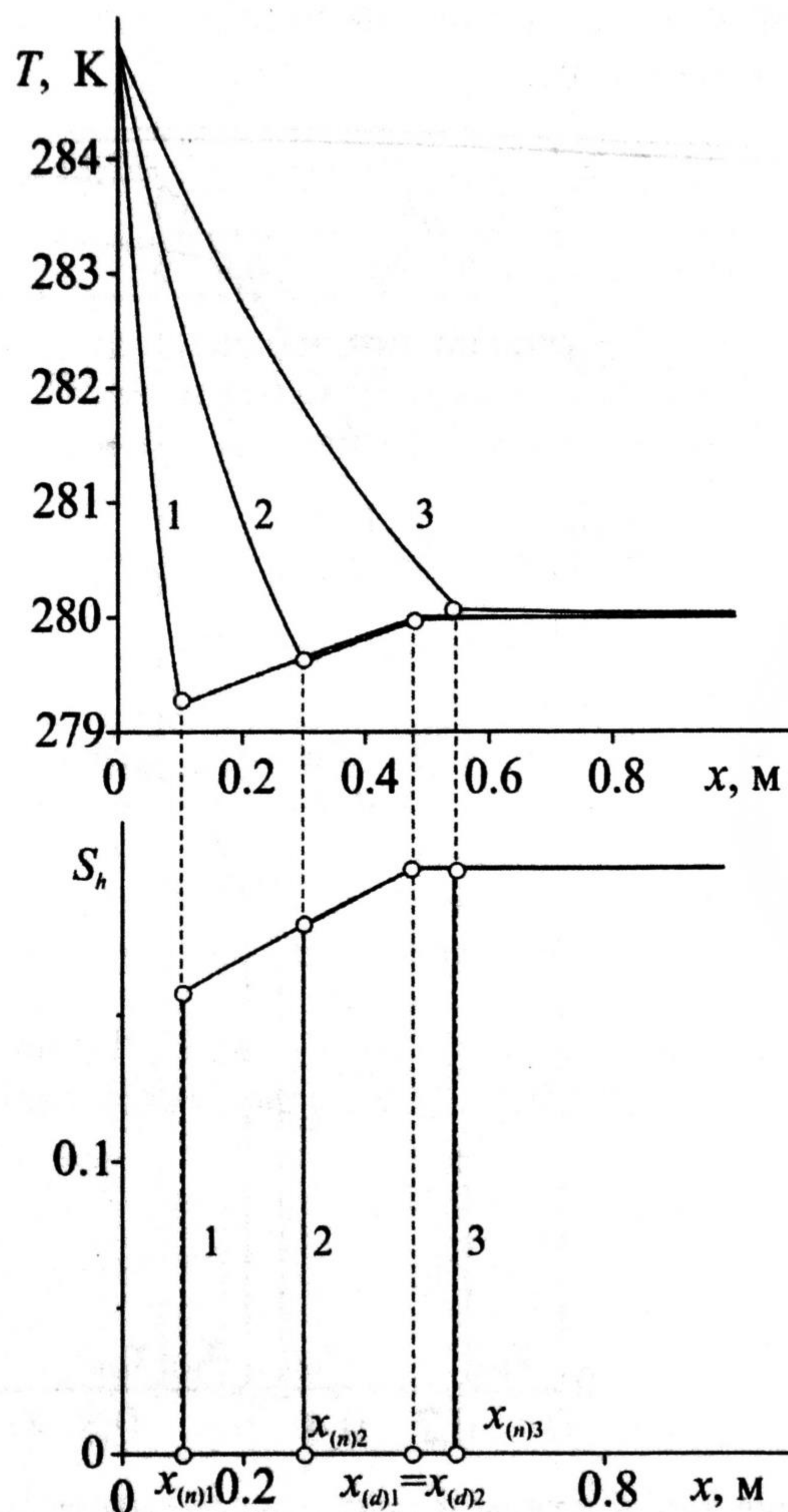


Рис. 3. Распределение температуры и гидратонасыщенности пласта при отборе газа в различные моменты времени. Линии 1, 2 и 3 соответствуют моментам времени  $t = 1.4, 13.8$  и  $51.7$  ч

На рис. 4 представлены распределения температуры и гидратонасыщенности пласта при отборе газа под давлением  $p_e = 5$  МПа. Начальные параметры системы  $p_0 = 6$  МПа,  $T_0 = 280$  К,  $v = 0.2$ . Абсолютная проницаемость пласта  $k_0 = 10^{-13}$  м<sup>2</sup>. Как следует из рис. 3, с течением времени происходит повышение температуры в ближней области, насыщенной газом и водой, а также ее понижение в дальней области, содержащей газ и гидрат. Это связано с тем, что начальная энергия расходуется на разложение газового

гидрата, которое приводит к понижению температуры системы и образованию газового гидрата в протяженной области. Кривая 3 соответствует моменту времени, когда происходит смыкание границ протяженной области и вырождение ее фронтальной поверхности, т.е. с этого времени в пласте существует только две области: ближняя, насыщенная газом и водой, и дальняя, в которой присутствуют газ и гидрат. Данный момент времени соответствует «остановке» границы фазового перехода, т.е. разложения газогидрата больше происходить не будет.

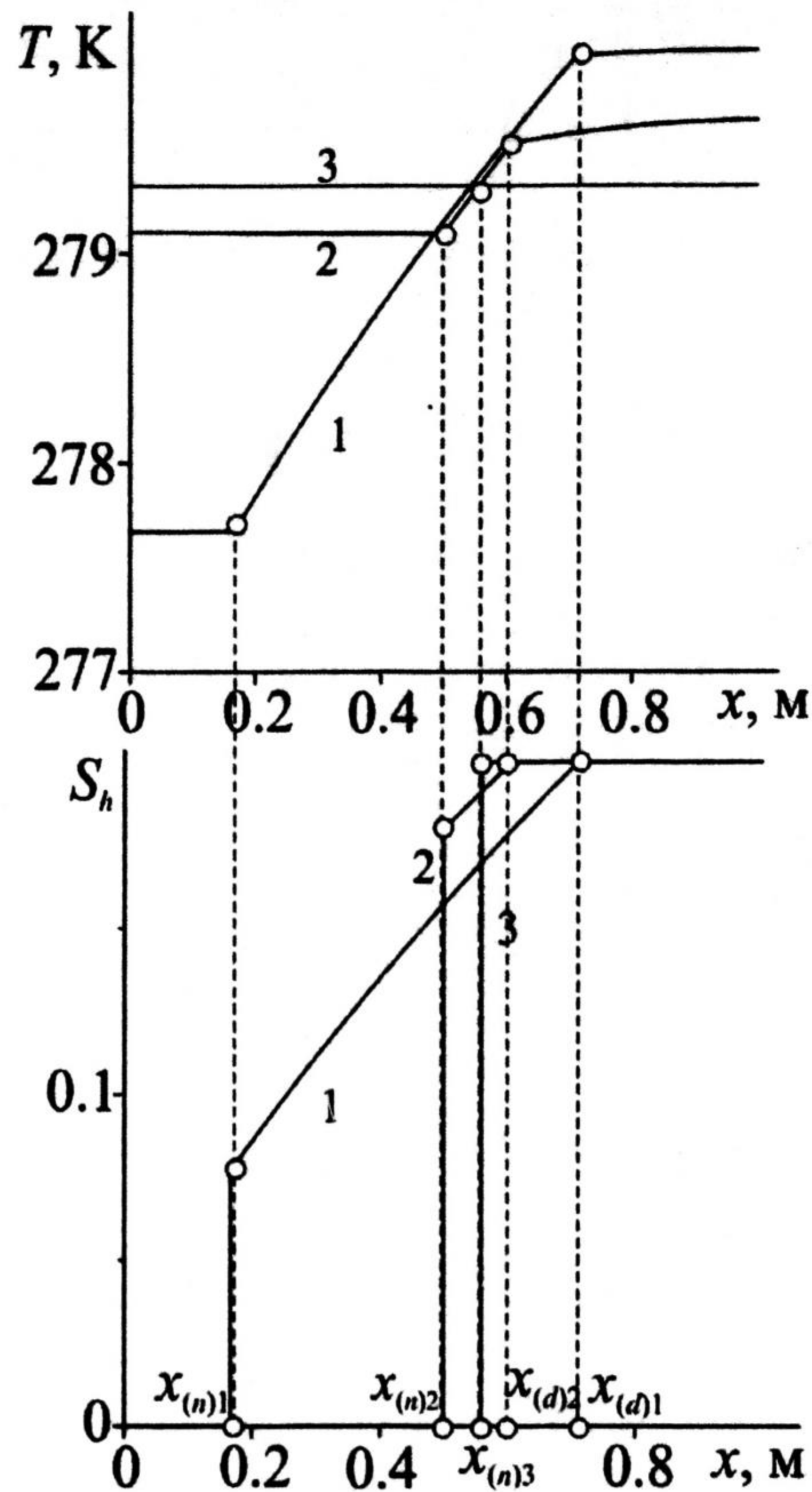


Рис. 4. Распределение температуры и гидратонасыщенности пласта при отборе газа без подвода тепла в различные моменты времени. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют моментам времени  $t = 10.4, 34$  и  $90$  ч

На рис. 5 для момента времени  $t = 90$  ч представлены распределения температуры пласта и равновесной температуры. Как следует из рисунка, температура всего пласта становится одинаковой и ниже начальной температуры, что объясняется расходом энергии системы на диссоциацию гидрата. Точка пересечения кривых 1 и 2 есть точка «остановки» границы фазового перехода (на рис. 4 обозначена через  $x_{(n)}^*$ ). Таким образом, при отборе газа из пласта без подвода тепла полностью газовый гидрат разложить в пласте невозможно.

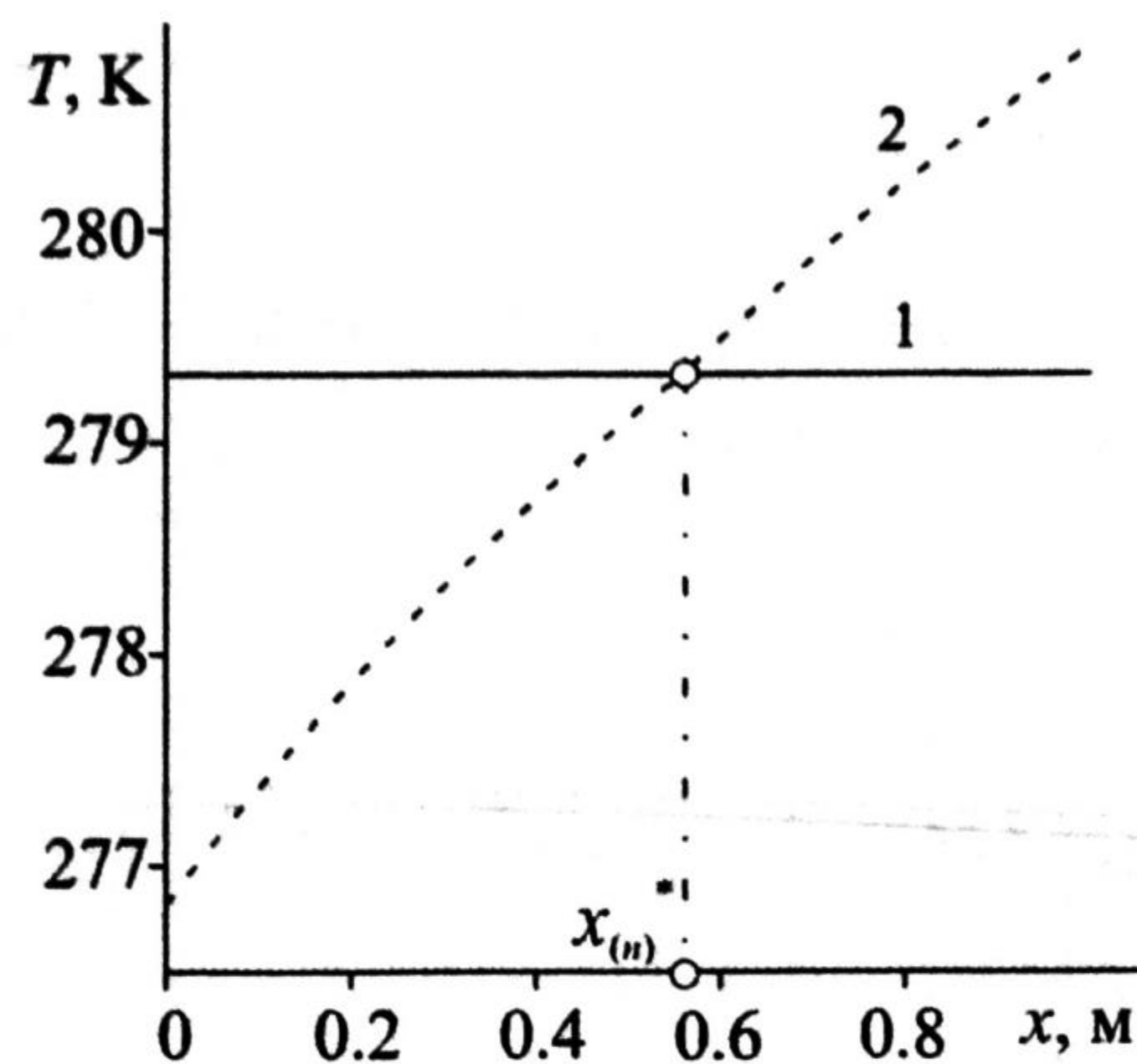


Рис. 5. Фазовая диаграмма процесса диссоциации гидрата без подвода тепла. Сплошная линия — распределение температуры пласта в момент времени  $t = 90$  ч, пунктирная — равновесная температура

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шагапов В.Ш., Сыртланов В.Р. Диссоциация гидратов в пористой среде при депрессионном воздействии. // ПМТФ. 1995. Т. 36. № 4. С. 120-130.
2. Васильев В.И., Попов В.В., Цыпкин Г.Г. Численное исследование разложения газовых гидратов, сосуществующих с газом в природных пластах // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2006. № 4. С. 127-134.
3. Шагапов В.Ш., Мусакаев Н.Г., Хасанов М.К. Нагнетание газа в пористый резервуар, насыщенный газом и водой // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12. № 4. С. 645-656.
4. Васильев В.И., Попов В.В., Тимофеева Т.С. Вычислительные методы в разработке месторождений нефти и газа. Новосибирск, 2000. 127 с.