

УДК 622.279:548.562

## О ВОЗМОЖНОСТИ СОХРАНЕНИЯ РЕЛИКТОВЫХ ГИДРАТОВ НИЖЕ ЗОНЫ СТАБИЛЬНОСТИ В НИЗКОПРОНИЦАЕМЫХ ПЛАСТАХ БЕРЕЗОВСКОЙ СВИТЫ НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Сергей Евгеньевич Ершов<sup>1</sup>✉, Сергей Владимирович Нерсесов<sup>2</sup>, Родион Анатольевич Соколовский<sup>3</sup>, Александр Александрович Дорошенко<sup>4</sup>, Анатолий Владимирович Ершов<sup>5</sup>, Яна Олеговна Карымова<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ershsere@mail.ru✉

<sup>2</sup> ООО «Газпром добыча Надым», Надым, Россия; nersesov@nadym-dobycha.gazprom.ru

<sup>3</sup> ООО «Газпром добыча Надым», Надым, Россия; sokolovskii.ra@nadym-dobycha.gazprom.ru

<sup>4</sup> ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (г. Тюмень), Тюмень, Россия; ssdoro.47@mail.ru

<sup>5</sup> ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (г. Тюмень), Тюмень, Россия; a.ershov@gazprom.nedra.ru

<sup>6</sup> ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (г. Тюмень), Тюмень, Россия; ya.karymova@nedra.gazprom.ru

**Аннотация.** Рассмотрен возможный механизм сохранения реликтовых гидратов в низкопроницаемых коллекторах березовской свиты Медвежьего месторождения при пластовой температуре, превышающей равновесную температуру их диссоциации.

**Ключевые слова:** Западная Сибирь, березовская свита, реликтовые гидраты, низкопроницаемые коллекторы, начальный градиент давления, механизм сохранения гидратов

**Для цитирования:** Ершов С.Е., Нерсесов С.В., Соколовский Р.А., Дорошенко А.А., Ершов А.В., Карымова Я.О. О возможности сохранения реликтовых гидратов ниже зоны стабильности в низкопроницаемых пластах березовской свиты на севере Западной Сибири // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 3. С. 37–44.

## ON THE POSSIBILITY OF PRESERVING RELIC HYDRATES BELOW THE STABILITY ZONE IN THE LOW-PERMEABILITY LAYERS OF THE BEREZOVSKAYA FORMATION OF THE NORTH OF WESTERN SIBERIA

Sergey E. Ershov<sup>1</sup>✉, Sergey V. Nersesov<sup>2</sup>, Rodion A. Sokolovsky<sup>3</sup>, Alexandr A. Doroshenko<sup>4</sup>, Anatoly V. Ershov<sup>5</sup>, Yana O. Karymova<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ershsere@mail.ru✉

<sup>2</sup> Gazprom Dobycha Nadym LLC, Nadym, Russia; nersesov@nadym-dobycha.gazprom.ru

<sup>3</sup> Gazprom Dobycha Nadym LLC, Nadym, Russia; sokolovskii.ra@nadym-dobycha.gazprom.ru

<sup>4</sup> Gazprom VNIIGAZ LLC (Tyumen), Tyumen, Russia; ssdoro.47@mail.ru

<sup>5</sup> Gazprom VNIIGAZ LLC (Tyumen), Tyumen, Russia; a.ershov@gazprom.nedra.ru

<sup>6</sup> Gazprom VNIIGAZ LLC (Tyumen), Tyumen, Russia; ya.karymova@nedra.gazprom.ru

**Abstract.** A possible mechanism for preserving relic hydrates in low-permeable deposits of the berezovskaya formation of the Medvezhye field at a reservoir temperature exceeding the equilibrium temperature of their dissociation is considered.

**Keywords:** Western Siberia, berezovskaya formation, relict hydrates, low-permeable deposits, initial pressure gradient, hydrate conservataion mechanism

**For citation:** Ershov S.E., Nersesov S.V., Sokolovsky R.A., Doroshenko A.A., Ershov A.V., Karymova Ya.O. On the possibility of preserving relic hydrates below the stability zone in the low-permeability layers of the berezovskaya formation of the north of Western Siberia. *Moscow University Geol. Bull.* 2022; 3: 37–44 (In Russ.).

**Введение.** К отложениям березовской свиты коньяк-кампанского возраста на севере Западной Сибири приурочены значительные ресурсы газа, измеряемые триллионами кубических метров. Одно из крупнейших по объему ресурсов в коллекторах березовской свиты — Медвежье месторождение. Толща газосодержащих пород этой свиты представлена силицитами различной степени глинистости и под-

разделяется на 3 пласта: НБ<sub>0</sub>, НБ<sub>1</sub>, НБ<sub>2</sub> суммарной толщиной от 80 до 120 м. Кровля верхнего продуктивного пласта (НБ<sub>0</sub>) залегает в интервале глубины от 920 до 1140 м (в зависимости от положения скважин на структурном плане) [Дорошенко, Карымова, 2017; Нерсесов и др., 2019]. Промышленные притоки газа в процессе испытаний были получены только из пласта НБ<sub>2</sub>.

В работах [Нерсесов и др., 2019; Родивилов, 2020] выдвинута гипотеза, согласно которой в пласте  $НБ_1$  и, возможно, в пласте  $НБ_0$  газ находится в гидратном состоянии. В пользу этой гипотезы приводятся следующие факты. Во-первых, эти пласты по данным акустического каротажа характеризуется пониженными значениями времени пробега продольной волны. Во-вторых, при бурении скважины № 4С, производившемся в зимнее время на теплом растворе, отмечены интенсивные газопроявления в интервале пласта  $НБ_1$ , в то время как в других скважинах, бурившихся в летнее время на холодном растворе, существенные газопроявления в этом интервале не отмечены. И, в-третьих, установлено, что после подъема керна из пласта  $НБ_1$ , при снижении давления происходило его медленное разгазирование в лабораторных условиях, в то время как для керна из пласта  $НБ_2$  в лабораторных условиях разгазирование проявлено в меньшей степени, зато отмечено активное поступление газа непосредственно в буровой раствор в процессе бурения.

Традиционно существование газовых гидратов в земной коре полагается возможным в зоне стабильности гидратов (ЗСГ), в которой гидраты могут образовываться и сохраняться в соответствии с термобарическими условиями, а также выше нее в зоне метастабильности гидратов (ЗМГ) в толще многолетнемерзлых пород, где гидраты могут сохраняться за счет эффекта самоконсервации при образовании корки льда на поверхности гидрата [Якушев, 2009]. Но отложения березовской свиты Медвежьего месторождения находятся значительно ниже зоны стабильности гидратов, а пластовая температура намного превышает равновесную температуру гидратообразования. Так, по результатам измерений температура в продуктивных отложениях березовской свиты составляет 25–29 °С при среднем значении около 27 °С. Среднее пластовое давление составляет 11,5 МПа. Результаты измерений относятся к пласту  $НБ_2$ , из которого были получены промышленные притоки газа. Газ по составу метановый. Предположительно гидратонасыщенный пласт  $НБ_1$  такими измерениями не охарактеризован.

Полагая, что с учетом геотермического градиента температура в расположенном выше по разрезу пласте  $НБ_1$  несколько ниже и, принимая ее равной 26 °С, оценим равновесное давление гидратообразования при этой температуре по известной формуле:

$$\ln P = A - \frac{B}{T},$$

где  $P$  — равновесное давление гидратообразования, МПа;  $T$  — температура, К; а численные коэффициенты  $A$  и  $B$  зависят от температуры. Используя их значения для соответствующего диапазона температуры, приведенные в монографии [Истомин, 1992], получим, что равновесное давление гидратообразования при 26 °С (299,16 К) составит 46,8 МПа, т. е. на 35,3 МПа выше пластового на возможной нижней

границе гидратонасыщенного интервала. И, напротив, при давлении 11,5 МПа равновесная температура образования гидратов составит 287,36 К (или 14,2 °С), т. е. значительно ниже пластовой. Учитывая это обстоятельство, проще всего было бы признать, что при термобарических условиях в отложениях березовской свиты существование гидратов невозможно, а аномальные акустические характеристики пласта  $НБ_1$  обусловлены особенностями вещественного состава пород либо, например, образованием гидратов в призабойной зоне при газопроявлениях в процессе бурения. Тем не менее, не отвергая безоговорочно возможность существования реликтовых гидратов в таких условиях в верхней части отложений березовской свиты, предпримем попытку обосновать возможный механизм их сохранения применительно к пласту  $НБ_1$ . Вопрос образования гидратов здесь не рассматривается; предполагается, что они сформировались в историческое время и затем оказались в области повышенной температуры в процессе погружения гидратонасыщенных пород.

**Краткая геолого-физическая характеристика объекта.** Прежде всего отметим некоторые важные для дальнейшего особенности вещественного состава и свойств пород пласта  $НБ_1$  Медвежьего месторождения, приведенные в работах [Дорошенко, Карымова, 2017; Нерсесов и др., 2019; Родивилов, 2020]. В частности, пласт  $НБ_1$  характеризуется повышенным содержанием аморфной и микрокристаллической фаз кремнезема опал+кristобалит+тридимит (ОКТ-фаза). По содержанию ОКТ-фазы в пределах пласта  $НБ_1$  выделены два литотипа пород: в верхней части ЛТ1-1 (ОКТ-фаза составляет >30%), а в нижней части ЛТ1-2 (ОКТ-фаза <30%). Кроме того, значительную долю в составе отложений пласта  $НБ_1$  составляют глины, причем нередко породы характеризуются слоистой текстурой (наличие протяженных линзочек глин).

По результатам петрофизических исследований, в том числе с использованием технологии электронно-ионной томографии РЭМ/ФИП (растровая электронная микроскопия/фокусированный ионный пучок) [Шкловер и др., 2020], выявлено, что в коллекторах пласта  $НБ_1$  преобладают изометричные поры (рис. 1, а) субкапиллярной размерности (рис. 1, б). Видно, что в образце № 67 чаще всего встречаются (4000 раз) поры диаметром 20 нм. Похожее распределение частоты встречаемости размеров связанных гидравлических каналов в образцах из пласта  $НБ_1$  получены и по данным ртутной порометрии (рис. 1, в, г). Видно, что для образца № 16.5 (рис. 1, в) модальное значение гидравлического радиуса составляет 10 нм, и отмечен небольшой всплеск частоты встречаемости в интервале 80 нм. Такое же локальное увеличение частоты встречаемости значений диаметров пор правее модального диаметра видно и на графике распределения, построенном по данным РЭМ/ФИП (рис. 1, б). Отметим, что есть образцы, для которых модальный радиус составля-

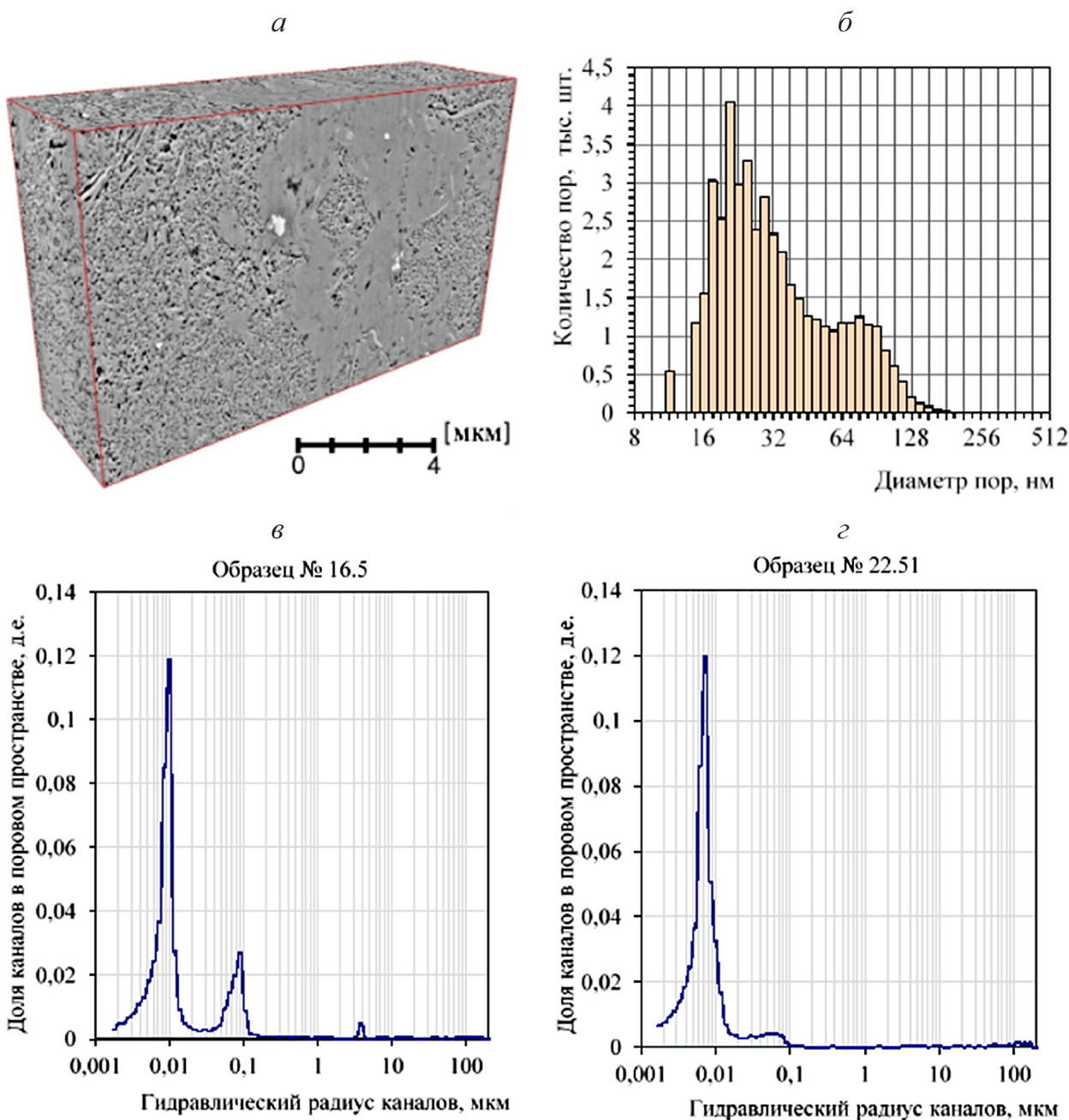


Рис. 1. Визуализация и распределение диаметров пор по частоте встречаемости: данные метода РЭМ/ФИП, образец № 67 из скважины № 5С (а, б); данные ртутной порометрии, образцы из скважины № 3С (в, г)

ет <10 нм, например, образец № 22.51 с модальным гидравлическим радиусом 7 нм (рис. 1, г).

Вследствие таких размеров пор породы пласта НБ<sub>1</sub> характеризуются весьма низкими фильтрационными характеристиками и высокой водонасыщенностью. Последнее связано с тем, что поры с размерами <50 нм, как правило, заняты неподвижной прочно связанной водой.

Средняя проницаемость пород в нижней части пласта НБ<sub>1</sub> (ЛТ1-2) по данным исследования керна составляет  $0,096 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup> при весьма высокой средней пористости >0,3 д. е. [Родивилов, 2020]. По результатам замеров влажность «свежеподнятого» керна, условно отождествляемая с остаточной водо-

насыщенностью, для пород пласта НБ<sub>1</sub> составляет в среднем 0,747.

**Результаты исследований и их обсуждение.**  
**Механизм самоконсервации гидратов.** Перейдем теперь непосредственно к обоснованию возможности сохранения реликтовых гидратов в пласте НБ<sub>1</sub>. С этой целью ниже будут представлены некоторые сугубо оценочные расчеты.

Согласно данным монографии [Якушев, 2009], плотность гидрата метана изменяется от 908 до 917 кг/м<sup>3</sup>, и, если воспользоваться рекомендуемой формулой состава гидрата метана CH<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O, соответствующей практически полному заполнению клатратных полостей молекулами метана, удельное

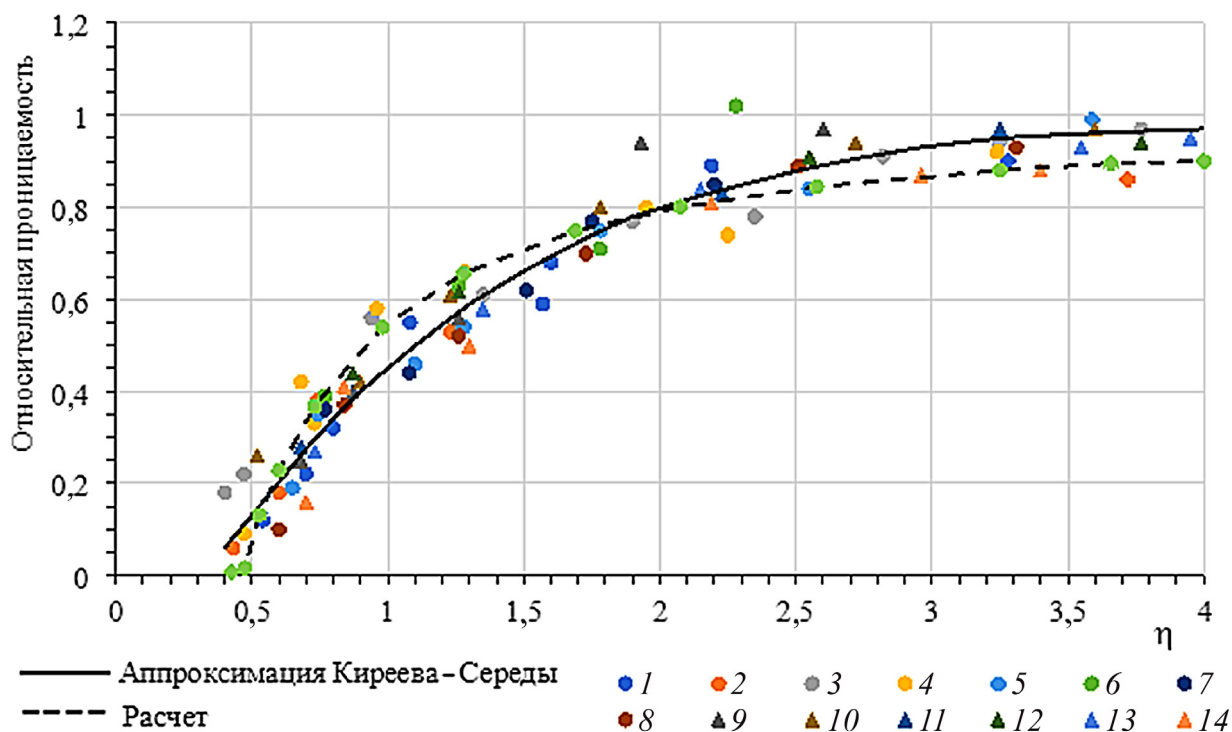


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных данных В.А. Киреева и Н.Е. Середы [1985] с теоретическим расчетом: 1-14 — серии экспериментов с различными моделями и флюидами

газосодержание гидрата составит  $164,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , а плотность —  $911 \text{ кг}/\text{см}^3$ . Несложно посчитать, что в этом случае из  $1 \text{ м}^3$  гидрата при разложении выделится  $0,8 \text{ м}^3$  воды при плотности воды  $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Таким образом, в гипотетическом случае разложения в замкнутом пространстве выделившийся метан займет  $0,2 \text{ м}^3$ , что с учетом коэффициента сверхсжимаемости будет соответствовать давлению  $>100 \text{ МПа}$ , т. е. значительно выше равновесного давления диссоциации гидратов в березовской свите. Таким образом, при температуре, соответствующей пластовой в березовской свите, диссоциация гидратов в замкнутой среде (а значит, и в самом пласте, если он не содержит свободного газа) будет невозможной. Образование мельчайшего пузырька газа при разложении гидрата приведет к резкому росту давления и прекращению процесса разложения гидрата. Отсюда, в частности, следует важный вывод о возможности сохранения реликтовых гидратов в гидродинамически изолированных (например, линзовидных) пластах ниже ЗСГ. Диссоциация гидрата возможна только на границе с газонасыщенной частью отложений березовской свиты. При этом, если свободный газ в гидратонасыщенной части отложений изначально отсутствовал, водонасыщенность на границе разложения гидратов не может быть  $<0,8$ .

Рассмотрим возможные факторы, обеспечивающие сохранность реликтовых гидратов на границе с газонасыщенным пластом.

**А. Статическая модель.** В работе [Ершов, Коротаев, 1998] нами теоретически рассмотрена

фильтрация газа в частично водонасыщенном образце керна. Предполагалось, что на выходе из гидрофильного образца имеет место капиллярно-удерживаемая жидкая фаза, в результате чего возникает концевой эффект. На основе модельных расчетов было показано, что при малых расходах газа возникает дополнительное фильтрационное сопротивление, величина которого зависит от комплексного параметра

$$\eta = \frac{0,3 \cdot \Delta P}{\sigma \cdot \cos \theta \cdot \Delta l} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (1)$$

где  $\Delta P$  — перепад давления, приходящийся на образец;  $\Delta l$  — длина образца;  $\sigma$  — поверхностное натяжение;  $\theta$  — краевой угол смачивания;  $k$  — абсолютная проницаемость;  $m$  — пористость; все размерности в системе СИ. С ростом перепада давления (и, соответственно, параметра  $\eta$ ) роль дополнительного фильтрационного сопротивления снижается. Результаты модельных расчетов хорошо согласовывались с экспериментальными данными, ранее полученными в работе [Киреев, Середина, 1985] для широкого диапазона значений проницаемости от  $0,0074$  до  $0,9 \text{ мкм}^2$  (рис. 2), причем при величине комплексного параметра  $\eta < 0,4$  фильтрация газа практически не происходит, т. е. наблюдается начальное фильтрационное сопротивление.

Согласно расчетам работы [Ершов, Коротаев, 1998], при пористости  $0,25$  д. е. (доли единицы), проницаемости  $0,001 \text{ мкм}^2$  и длине образца  $0,294 \text{ м}$ ,

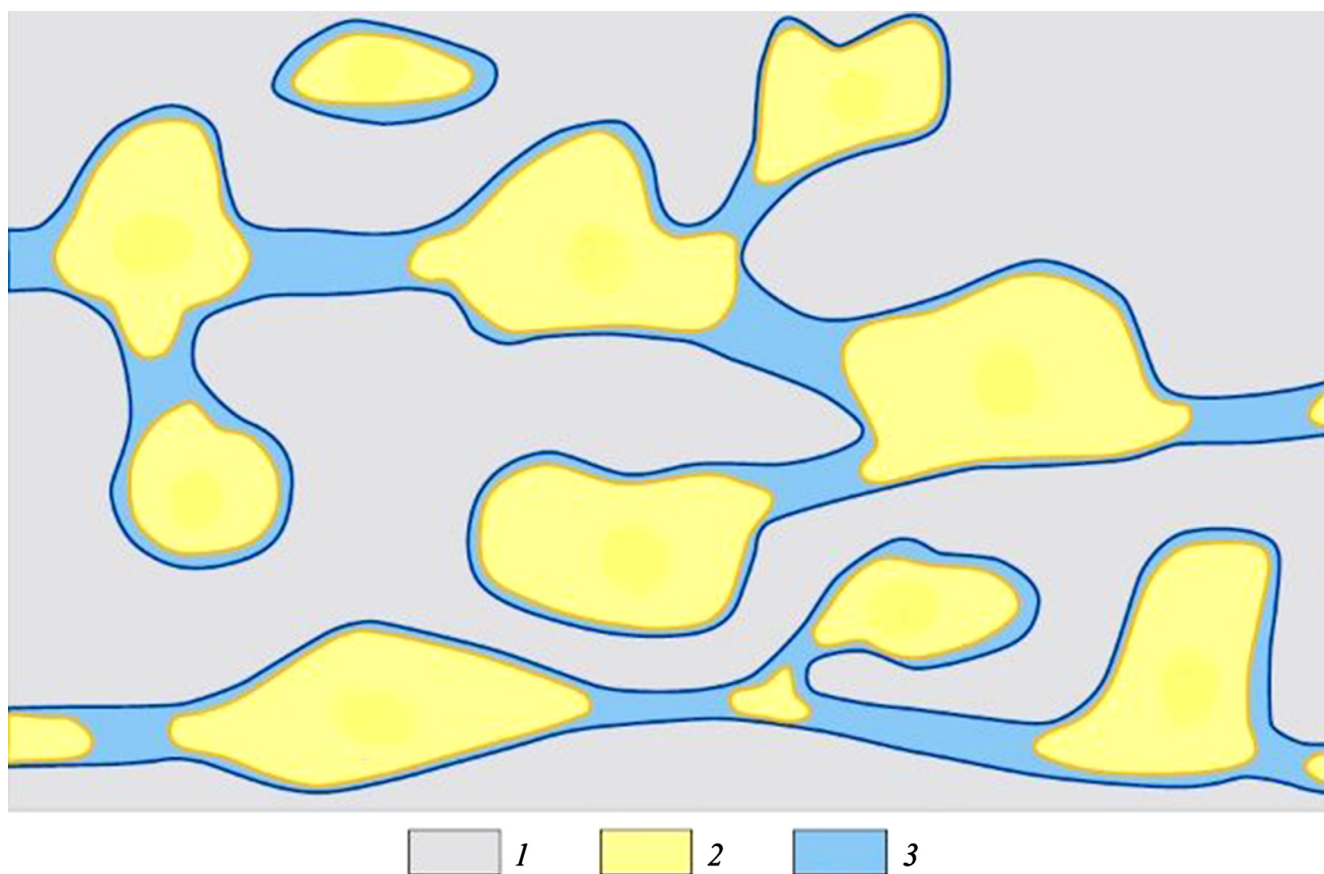


Рис. 3. Схема размещения остаточной воды в поровом пространстве при отсутствии градиента давления: 1 — порода, 2 — газ, 3 — вода

соответствующей экспериментам в работе [Киреев, Середа, 1985], величина начального перепада давления составляет 0,3 МПа. Соответственно, при формальном пересчете на длину образца получается начальный градиент давления, равный 1,02 МПа/м.

В работе [Ершов, Коротаев, 1998] возникновение начального перепада давления связывали с концевым эффектом на выходе из образца. Однако увеличение фильтрационного сопротивления при высокой водонасыщенности коллектора и даже начальный градиент давления могут реализовываться и внутри пористой среды из-за закупорки водой сужений поровых каналов (эффект Жамена). Возможный механизм такого эффекта хорошо иллюстрирует приведенный рисунок из работы [Васильев, 2014] (рис. 3).

В работе [Васильев, 2014] применительно к водонасыщенным пережимам поровых каналов, изолирующим тупиковые газонасыщенные поры, отмечено, что градиент давления, необходимый для выхода газа из тупиковых пор, в зависимости от структуры пустотного пространства и диаметра сужений, может составлять единицы и десятки МПа на метр, причем для коллекторов, размеры поровых каналов и проницаемость которых на порядки больше, чем для отложений березовской свиты Медвежьего месторождения. Очевидно, такой же порядок может составлять и начальный градиент давления, необходимый для обеспечения

фильтрации по проводящим каналам при наличии связанной воды в сужениях.

Оценим применительно к пласту НБ<sub>1</sub> перепад давления  $\Delta P$ , необходимый для выдавливания воды из пережима, по формуле, основанной на формуле Лапласа для капиллярного перепада давления и использованной в [Васильев, 2014]

$$\Delta P = 2\sigma \cos \varphi \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right),$$

где  $\sigma$  — поверхностное натяжение на границе газ—вода,  $\varphi$  — краевой угол смачивания,  $r$  — радиус пережима,  $R$  — радиус крупной поры, содержащей пузырек газа. Принимая  $\sigma = 50 \cdot 10^{-3}$  н/м (для пластовой температуры),  $\varphi = 45^\circ$ ,  $r = 10$  нм,  $R = 100$  нм, получим  $\Delta P \approx 7$  МПа. Следовательно, достаточно всего нескольких таких пережимов, чтобы компенсировать перепад давления от равновесного давления диссоциации гидратов на границе гидратонасыщенного пласта до пластового давления в зоне свободного газа для условий березовской свиты и обеспечить предотвращение разложения гидратов.

Косвенно в пользу такого внутреннего механизма проявления начального градиента давления при фильтрации газа в частично водонасыщенных коллекторах могут свидетельствовать результаты экспериментов, приведенные в монографии [Ершов и др., 2007]. В этой монографии исследованы образ-

цы зерна с проницаемостью от 0,006 до 0,08 мкм<sup>2</sup>. Начальный градиент давления при фильтрации газа от 0,4 до 1,235 МПа/м наблюдался при водонасыщенности >0,8, постепенно уменьшаясь при снижении водонасыщенности. При водонасыщенности <0,8 начальный градиент давления не наблюдался, что, по-видимому, свидетельствовало о формировании полностью газонасыщенных поровых каналов без занятых водой пережимов.

Учитывая формулу (1), данные, полученные в экспериментах [Ершов и др., 2007], а также в расчетах [Ершов, Коротаев, 1998], величины начального градиента давления были пересчитаны нами на параметры нижней части (литотип ЛТ1-2) пласта НБ<sub>1</sub> (средние пористость 0,31 д. е. и проницаемость  $0,096 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup> согласно [Родивилов, 2020]) пропорционально  $1/\sqrt{k}$  либо пропорционально  $\sqrt{m/k}$  при наличии данных о пористости образцов. Результаты представлены в таблице.

Пересчитанные на условия пласта НБ<sub>1</sub> начальные градиенты давления изменяются в диапазоне 3,2–30,5 МПа/м. Конечно, правомерность такого пересчета имеющихся экспериментальных данных на значительно более низкие значения проницаемости пласта НБ<sub>1</sub>, чем проницаемость образцов в экспериментах [Ершов и др., 2007], вызывает определенные сомнения. Однако в результате такого пересчета, видимо, можно оценить, по крайней мере, порядок величины начального градиента давления для пласта НБ<sub>1</sub>, водонасыщенность которого в зоне возможной диссоциации гидратов выше оценена нами величиной >0,8. Во всяком случае можно сделать вывод, что за счет формирования четковидной структуры пузырьков газа в фильтрующих поровых каналах на границе диссоциации гидратов может поддерживаться высокое давление, достаточное для обеспечения предотвращения их разложения, а перепад давления с газонасыщенной частью пласта (35 МПа) может быть нивелирован на расстоянии от

нескольких десятков сантиметров до нескольких метров. А учитывая слоистую текстуру коллекторов и извилистость фильтрующих каналов, вынужденных обходить протяженные непроницаемые включения, это расстояние по вертикали может быть в несколько раз или даже на несколько порядков меньше.

Таким образом, описанный механизм может обеспечить длительную сохранность реликтовых гидратов в низкопроницаемом пласте при значениях температуры, значительно превышающих равновесную для близкого к гидростатическому давления в газонасыщенной части.

**Б. Динамическая модель.** Рассмотрим теперь несколько иной возможный механизм сохранения реликтовых гидратов для условий пласта НБ<sub>1</sub> как динамического процесса. Предположим, что на нижней границе гидратов происходит их постепенное разложение. В зоне разложившихся гидратов будет сохраняться высокая насыщенность связанной водой, заполняющей наиболее мелкие поры и неспособной фильтроваться. Выделяющийся газ будет заполнять наиболее крупные поры в виде изолированных пузырьков, не образуя связных каналов. При росте давления в результате разложения гидратов он будет постепенно просачиваться в газонасыщенную часть пласта, «проскакивая» между пузырьками газа через заполненные водой пережимы поровых каналов, как это рассмотрено в работе [Васильев, 2014]. Конечно, имеющихся данных и понимания самого механизма этого процесса недостаточно для его корректного количественного описания. Тем не менее, ниже приводятся расчеты, которые позволяют оценить, по крайней мере, порядок характеризующих его параметров.

Тепловой поток из недр земли в районе месторождения Медвежье составляет не более 0,055 Вт/м<sup>2</sup> [Курчиков, 1995]. Теплота диссоциации гидрата метана определена в 54,19 кДж/моль [Якушев, 2009]. Если бы весь поступающий снизу тепловой

Результаты пересчета экспериментальных значений начального градиента давления на параметры пласта НБ<sub>1</sub>

Параметры образца зерна и начальный градиент давления по результатам эксперимента [Ершов и др. 2007] и расчета по формуле (1)					Пересчет начального градиента давления на параметры пласта НБ <sub>1</sub>	
Номер образца	проницаемость, $1 \cdot 10^{-3}$ мкм <sup>2</sup>	открытая пористость, д. е.	начальная водонасыщенность, д. е.	начальный градиент давления, МПа/м	для проницаемости $0,096 \cdot 10^{-3}$ мкм <sup>2</sup> , МПа/м	для проницаемости $0,096 \cdot 10^{-3}$ мкм <sup>2</sup> и пористости 0,31 д. е., МПа/м
12/111	8,74		1	1	9,5	
2/111	6,05		1	0,4	3,2	
533	23,76	0,1634	1	1,235	19,4	26,8
13 266	80,85	0,325	1	0,98	28,4	27,8
13 266	80,85	0,325	0,92	1,05	30,5	29,8
13 266	80,85	0,325	0,88	0,85	24,7	24,1
13 266	80,85	0,325	0,84	0,6	17,4	17
13 266	80,85	0,325	0,8	0	0	0
5	7,5		1	0,6	5,3	
Расчет по формуле (1)	1	0,25		1,02	3,3	3,7

поток расходовался бы на разложение гидратов, его было бы достаточно для диссоциации  $0,055/54190 = 1,015 \cdot 10^{-6}$  молей гидрата или (учитывая, что 1 моль гидрата метана весит 0,124 кг)  $0,126 \cdot 10^{-6}$  кг гидрата в секунду на площади  $1 \text{ м}^2$ . В таком случае, полагая, что пласт НБ<sub>1</sub> полностью заполнен гидратами при пористости 0,31 д. е., несложно подсчитать, что за год гидраты разложатся на высоту 0,0139 м. Однако очевидно, что весь поступающий снизу тепловой поток не может расходоваться только на разложение гидратов, поскольку в таком случае отмечалось бы значительное снижение температуры на границе гидратов и резкое изменение геотермического градиента, чего по имеющимся данным не наблюдается. В связи с этим можно предположить, что на разложение гидратов расходуется лишь часть поступающего снизу теплового потока, оценочно не более 1/10, остальное уходит вверх по разрезу за счет теплопроводности. Тогда за год гидраты могут разложиться на высоту 0,00139 м, а за 10 000 лет — на 13,9 м. Эта, безусловно, приближенная оценка показывает, что, если бы гидраты еще существовали в березовской свите, например, в ледниковый период, они вполне могли бы частично сохраниться до настоящего времени.

Выделяющийся при разложении гидратов газ должен через зону разложившихся гидратов уходить в газонасыщенную часть пласта. Расход газа через единицу площади будет зависеть от частоты его проскакивания между пузырьками, т. е., по сути, от количества выделяющегося газа при диссоциации гидратов. Такой процесс не является фильтрацией в классическом понимании и не будет характеризоваться какой-то определенной величиной проницаемости.

Оценим также возможное влияние дросселирования газа при оттоке от границы диссоциации гидратов на величину теплового потока. Будем рассматривать процесс фильтрации как наложение двух процессов: адиабатическое расширение, происходящее при проскакивании газа между изолированными пузырьками, и постепенный нагрев за счет поступающего снизу теплового потока внутри пузырьков. Понижение температуры за счет первого процесса при снижении давления от  $P_1=41,6$  МПа до  $P_2=11,5$  МПа за счет эффекта Джоуля–Томпсона составит 35 °С. Процесс нагрева газа в пузырьках нельзя рассматривать ни как изобарный из-за роста давления в пузырьках при нагреве, ни как изохорный из-за возможного проскакивания между пузырьками при росте давления из-за повышения температуры.

Тем не менее, выполним оценки затрат тепла на нагрев и компенсацию охлаждения из-за дросселирования исходя из теплоемкости при постоянном давлении  $c_p$ , которая превышает изохорную и для среднего давления в зоне диссоциации составляет для рассматриваемого диапазона давления в среднем 58,6 Дж/моль·град. В таком случае затраты тепла

на нагрев 1 моля газа на 35 °С составят 2,051 кДж, что более чем в 26 раз меньше затрат тепла на диссоциацию 1 моля гидрата. Таким образом, затраты тепловой энергии на нагрев охлаждающегося при дросселировании газа имеют подчиненное значение по сравнению с затратами на диссоциацию гидратов, и ими можно пренебречь.

В приведенных выше численных оценках предполагалось, что давление на нижней границе гидратов близко к равновесному давлению диссоциации при пластовой температуре. Однако нельзя исключить, что с учетом ограниченной скорости диссоциации гидратов может установиться динамическое равновесие между притоком тепла снизу, скоростью разложения гидратов, оттоком тепла вверх по разрезу и оттоком выделяющегося газа в газонасыщенную часть пласта при давлении, значительно ниже равновесного для пластовой температуры. К сожалению, на текущий момент процесс диссоциации гидратов в пористой среде при затрудненном оттоке газа изучен недостаточно. Необходимы экспериментальные исследования его динамики в низкопроницаемых образцах породы. По нашему мнению, такие исследования могут быть проведены на установке, представленной в работе [Троицкий и др., 2014], при некоторой модификации схемы проведения экспериментов.

Сделанные оценки позволяют предположить, что наблюдаемое повышенное давление по сравнению с гидростатическим значением пластового давления в отложениях березовской свиты Медвежьего месторождения, а также в туронской залежи Южно-Русского месторождения, возможно, обусловлено частичной или полной диссоциацией гидратов при затрудненном оттоке газа.

**Заключение.** Выполненные численные оценки показывают принципиальную возможность длительного сохранения реликтовых гидратов в условиях низкопроницаемых коллекторов березовской свиты Медвежьего месторождения.

Вместе с тем предположение о возможности сохранения реликтовых гидратов дискуссионно, поскольку пластовая температура березовской свиты значительно превышает равновесную температуру диссоциации гидратов. Необходимо дальнейшее изучение предположительно гидратонасыщенной части разреза как в процессе геологоразведочных работ и промышленного освоения отложений березовской свиты, так и путем специально поставленных лабораторных исследований.

В то же время весьма вероятно, что описанный механизм сохранения реликтовых гидратов ниже ЗСГ может иметь место при более благоприятных термобарических условиях.

Принципиальная возможность сохранения реликтовых гидратов в низкопроницаемых коллекторах ниже ЗСГ в перспективе может повысить оценку потенциальных ресурсов газа в гидратном состоянии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Васильев Ю.Н.* Новое уравнение фильтрации, учитывающее влияние погребенной воды и тупиковых пор на движение газа в продуктивном пласте // Вести газовой науки. 2014. № 4(20). С. 4–20.
- Дорошенко А.А., Карымова Я.О.* Характеристика пустотного пространства опок сенонских отложений севера Западной Сибири // Экспозиция «Нефть–Газ». 2017. № 6 (59). С. 23–27.
- Ершов С.Е., Иванов Д.И., Хайдина М.П.* Влияние микроструктуры и водонасыщенности пористых сред на их фильтрационные характеристики. М.: ИРЦ Газпром, 2007. 300 с.
- Ершов С.Е., Кортаев Ю.П.* Псевдоначальный градиент давления при двухфазной фильтрации // Проблемы разработки газовых и газоконденсатных месторождений. Т. 2. М.: ИРЦ Газпром, 1998. С. 20–35.
- Истомин В.А., Якушев В.С.* Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра, 1992. 236 с.
- Киреев В.А., Серeda Н.Е.* Экспериментальные исследования по вытеснению жидкости из пористой среды // Теория и практика разработки газовых месторождений Западной Сибири. М.: ВНИИГАЗ, 1985. С. 128–133.
- Курчиков А.Р.* Тепловой режим нефтегазоносных областей Западной Сибири: Автореф. докт. дисс. Новосибирск, 1995. 59 с.
- Нерсесов С.В., Нежданов А.А., Огибенин В.В.* и др. Перспективы разработки содержащих газогидраты залежей Медвежьего месторождения (Западная Сибирь) // Газовая промышленность. 2019. № 8 (788). С. 48–55.
- Родивилов Д.Б.* Обоснование литолого-петрофизической характеристики и фазового состояния залежей сенонского газоносного комплекса севера Западной Сибири (на примере Медвежьего месторождения): Автореф. канд. дисс. Тюмень, 2020. 25 с.
- Троицкий В.М., Соколов А.Ф., Истомин В.А.* и др. Образование и разложение газовых гидратов метана при фильтрации газа // Вести газовой науки. 2014. № 4(20). С. 135 — 145.
- Шкловер В.Я., Артемов Н.А., Марясов И.Г.* и др. Опыт создания базы данных по изучению микро- и нанометрового пустотного пространства коллекторов в технологии «Цифровой керн» // Информационные системы и технологии в геологии и нефтегазодобыче: Мат-лы докл. междунар. научно-практического семинара 14–15 ноября 2019. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2020. С. 31–43.
- Якушев В.С.* Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М.: ВНИИГАЗ, 2009. 192 с.

Статья поступила в редакцию 26.10.2021,  
одобрена после рецензирования 18.01.2022,  
принята к публикации 31.05.2022