



Научная статья  
УДК 622.279  
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.3.7>

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АЭРОГЕЛЯ ДЛЯ ИСКЛЮЧЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ В СИСТЕМЕ СБОРА И ПОДГОТОВКИ СКВАЖИННОЙ ПРОДУКЦИИ

**Александр Валентинович Назаренко**

Северо-Кавказский федеральный университет (д. 1, ул. Пушкина,  
Ставрополь, 355017, Российская Федерация)  
[science789654@mail.ru](mailto:science789654@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0008-9059-2770>

Аннотация.

Постепенно добыча газа в России переходит в районы со все более тяжелыми климатическими условиями, что требует от инженеров и ученых постоянного совершенствования технологий, в том числе с поиском практического применения инновационных материалов. В статье рассматриваются основные актуальные методы борьбы с гидратообразованием, а также перспективы применения инновационного материала – аэрогеля в этом направлении. Аэрогель – это уникальный, легкий и экологичный материал, обладающий сверхнизкой теплопроводностью, что делает его привлекательным для использования в инженерных сетях с целью поддержания стабильной температуры перекачиваемого агента. Ключевой задачей исследования является минимизация и исключение падения температуры в процессе транспортировки газа, как ключевого фактора образования кристаллов гидратов. В ходе работы были описаны и проанализированы основные свойства аэрогеля, а также возможность и опыт применения материала в нефтегазовой отрасли для борьбы с гидратообразованием. В статье рассматривается расчет эффективности применения аэрогеля в качестве изоляции газопровода относительно основных конкурентов на рынке, показаны значения потерь температуры в ходе транспортировки газа при использовании различных типов изоляции. Приведенные данные демонстрируют эффективность теплоизолирующих свойств аэрогеля, а также подтверждают возможность его использования в нефтегазовой сфере. Ключевым недостатком материала-

ла является относительно высокая стоимость производства, что влияет на экономическую целесообразность применения. На сегодняшний день ведется активная работа по удешевлению, масштабированию и оптимизации производства аэрогеля по всему миру. Для ликвидации возможности гидратообразования недостаточно использования только эффективного теплоизолятора. Необходимо применять комплексный подход, основанный на поддержании определенных термобарических условий в трубопроводе.

Ключевые слова: аэрогель, теплоизоляция, гидраты

Для цитирования: Назаренко А.В. Перспективы применения аэрогеля для исключения возможности гидратообразования в системе сбора и подготовки скважинной продукции // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 3. С. 165–184. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.3.7>

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 11.06.2025;  
одобрена после рецензирования 11.09.2025;  
принята к публикации 20.09.2025.

#### 2.8.4 Development and Operation of Oil and Gas Fields (Technical Sciences)

Research article

##### **Prospects of using aerogel to eliminate the possibility of hydrate formation in the system of collection and preparation of borehole products**

**Aleksandr V. Nazarenko**

North-Caucasus Federal University (1, Pushkin St., Stavropol,  
355017, Russian Federation)

science789654@mail.ru;

<https://orcid.org/0009-0008-9059-2770>

Abstract.

Gradually, gas production in Russia is moving to locations with increasingly harsh climatic conditions, which requires en-

gineers and scientists to constantly improve technologies and find practical applications for innovative materials. The article discusses the main current methods of fighting hydrate formation, as well as the prospects for using aerogel in this area. Aerogel is a unique, lightweight and environmentally friendly material with ultra-low thermal conductivity, which makes it attractive for use in utility networks in order to maintain stable temperature of the pumped agent. The key objective of the study is to minimize and eliminate temperature drops during gas transportation, as a key factor in the formation of hydrate crystals. The basic properties of aerogel are described and analyzed, as well as the possibility and experience of using the material in the oil and gas industry to tackle hydrate formation. The article considers the calculation of the effectiveness of using aerogel as insulation of a gas pipeline relative to the main competitors in the market, and shows the values of temperature losses during gas transportation when using various types of insulation. These data demonstrate the effectiveness of the thermal insulation properties of aerogel, and also confirm the possibility of its use in the oil and gas industry. The key disadvantage of the material is the relatively high cost of production, which affects the economic feasibility of the application. To date, active work is underway to reduce the cost, scale and optimize aerogel production worldwide. To eliminate the possibility of hydrate formation, it is not enough to use only an effective heat insulator. It is necessary to apply an integrated approach based on maintaining certain thermobaric conditions in the pipeline.

**Keywords:** aerogel, thermal insulation, hydrates

**For citation:** Nazarenko A.V. Prospects of using aerogel to eliminate the possibility of hydrate formation in the system of collection and preparation of borehole products *Science. Innovations. Technologies.* 2025;(3):165-184 (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.3.7>

**Conflict of interest:** the author declares no conflicts of interests.

The article was submitted 11.06.2025;  
approved after reviewing 11.09.2025;  
accepted for publication 20.09.2025.

## **Введение**

Основной причиной дефицита и эффективности использования ресурсов для выработки азрогеля является рост стоимости добычи энергоресурсов, а также мировые экологические проблемы. Российские нефтегазовые компании, определяя свою дальнейшую стратегию развития, постепенно начинают осваивать месторождения во все более тяжелых климатических условиях. Многие традиционные технологии являются недостаточно результативными.

## **Материалы и методы исследований**

В качестве информационных источников была использована литература и статьи, описывающие условия образования гидратов, существующие методы борьбы, а также свойства азрогеля.

## **Результаты исследований и их обсуждение**

Одна из главных трудностей при транспортировке природного газа связана с образованием газогидратов. Эти твердые соединения формируются при определенных значениях температуры и давления из воды и легких газов, таких как этан и пропан. Образование гидратов снижает производительность скважин, трубопроводов и прочих инженерных сооружений. Гидраты не возникают из тяжелых углеводородов  $C_5+$  (за исключением неопентана).

Гидратные кристаллы способны формироваться также из благородных газов вроде гелия, неона и водорода, однако это возможно лишь при чрезвычайно высоком давлении. Формула, характеризующую гидраты, записывают следующим образом:  $M \cdot nH_2O$ , где  $M$  обозначает молекулу газа («гостевую»), а  $n$  показывает число молекул воды, приходящихся на каждую молекулу газа. Величина  $n$  варьируется от 6 до 17 и определяется условиями формирования гидрата.

Изучение газовых гидратов проводилось еще в середине прошлого столетия. На сегодняшний день для изучения внутренней структуры гидратов применяют самые современные методы, такие как нейтронография и ядерный магнитный резонанс [1, 2].

Условия формирования гидратов зависят от термодинамических параметров и состава газа. Влажность, давление и температура в газопроводе – основные факторы, влияющие на гидратообразование, значение которых необходимо поддерживать в определенных диапазонах, для обеспечения бесперебойной работы газопровода [3, 4, 5].

Методы борьбы с образованием гидратов подразделяются на три группы:

- Технологические подходы заключаются в поддержании условий эксплуатации газовых месторождений, предотвращающих формирование гидратов;
- Химические способы предполагают применение специальных добавок и реагентов, снижающих вероятность появления гидратов;
- Физические методы охватывают механические воздействия и тепловое влияние на систему для предотвращения гидратообразования.

Один из способов предотвратить образование гидратов — нагрев газа в специальном теплообменнике с повышением температуры потока выше уровня, необходимого для возникновения гидратов. Однако такой метод недостаточно эффективен. При низкой температуре внешней среды и значительной протяженности трубопроводной сети интенсивно происходят процессы теплообмена между газом, стенками трубы и окружающим пространством, приводящие к охлаждению газа и уменьшению полезного эффекта нагрева. Более того, повышенная температура газа отрицательно влияет на работу компрессорных станций, вызывая увеличение вязкости транспортируемого флюида.

Следующим популярным способом борьбы с гидратами является метод снижения давления в трубопроводе. Снижение давления осуществляется при помощи продувочных свеч и используется только при ликвидации уже образовавшихся пробок.

Одним из самых эффективных способов борьбы с гидратообразованием является осушка газа. Существует две разновидности осушки газа:

1. Абсорбционная;
2. Адсорбционная.

Абсорбционная осушка базируется на применении жидких абсорбентов. Самыми распространенными являются диэтиленгликоль (ДЭГ) и триэтиленгликоль (ТЭГ).

ДЭГ и ТЭГ применяются в специальных установках осушки газа. Основными элементами установки являются абсорбер, выпарная колонна, сепараторы, теплообменники, выпариватель и насосы. В дополнение предусматривается вспомогательное оборудование для корректной работы установки. Абсорберы стекают по тарелкам захватывают влагу из газа и направляются на регенерацию. Весь цикл является замкнутым. Данные установки используют для подготовки газа перед подачей в магистральный газопровод. Весь процесс происходит при повышенном давлении и пониженной температуре. Выбор между абсорбентами происходит на основании требований к осушаемому газу, технического оснащения предприятия и экономической целесообразности.

Принцип адсорбционной сушки базируется на применении твердых сорбирующих материалов, среди которых наиболее популярны силикагель, цеолиты и боксит. Данные адсорбенты входят в состав специализированных установок, основными узлами которых выступают сепарационные устройства, адсорберы и теплообменники. Функционирование установки предполагает прохождение влажного газа последовательно через несколько слоёв поглотительного материала. Завершив процесс осушения, адсорбер проходит стадию восстановления активности путем регенерации. Данный цикл осуществляется при увеличенном давлении и пониженном температурном режиме.

Стоит отметить, что процесс абсорбционной и адсорбционной осушки сопряжен с большими капитальными вложениями в строительства комплекса по осушке и подготовки газа к транспортировке. При этом комплексы располагаются на значительном расстоянии от кустовых площадок и скважин.

Применение ингибиторов и ПАВ (поверхностно-активные вещества) является наиболее доступным и распространенным ме-

тодом предотвращения гидратообразования. ПАВ создают пленку на стенках кристаллов гидратов, не давая образовывать большие структуры, а ингибиторы, снижая парциальное давление паров воды, понижают температуру гидратообразования [3, 4, 5].

Существует большое разнообразие ингибиторов. Все ингибиторы подразделяются на одноцелевые и многоцелевые. Одноцелевые используются исключительно для предупреждения гидратообразования, а многоцелевые могут нести в себе дополнительные функции (антикоррозионные свойства).

Ингибиторы также делятся на смесевые и индивидуальные. Индивидуальные используются сами по себе, а смесевые представляют собой смесь из нескольких веществ.

Одним из самых популярных ингибиторов в российской промышленности на сегодняшний день являются метанол. Метанол позволяет добиваться значительного снижения температуры гидратообразования по сравнению с конкурентами, обладает хорошими реологическими свойствами, низкой стоимостью производства, выдерживает низкие температуры хранения и практически не оказывает коррозионного влияния на оборудование. Ключевыми недостатками данного вещества являются токсичность и высокая упругость паров. Нефтегазовые компании активно ищут альтернативу использованию метанола по причине токсичности реагента и начинают использовать гликоли, не смотря на меньшую эффективность, что создает определенные проблемы при эксплуатации газового промысла [7, 8, 9].

Целесообразность использования ингибитора определяется следующими факторами:

1. Географические и логистические условия местности, где ведется добыча нефти или газа;
2. Безопасность для экологии и отсутствие вреда здоровью человека при использовании конкретных химических веществ;
3. Потребляемое количество ингибитора и возможность обеспечить хранение достаточных запасов на производственном участке.

При применении ингибитора необходимо учитывать, что гидродинамические условия в трубопроводе изменчивы, что может приводить к скоплению ингибитора на отдельных участках с повышенным гидравлическим сопротивлением. В дополнение часть ингибитора при выносе жидкости со скважины разбавляется водой, что также необходимо учитывать в расчетах. Поэтому на практике количество подаваемого ингибитора превышает расчетное на 10–20 процентов. Большинство месторождений располагается в труднодоступной местности со сверхнизкими температурами, что делает затруднительным доставку и соблюдение условий хранения веществ на локациях. Необходимо также учитывать большое влияние человеческого фактора на производстве при работе с токсичными материалами.

Для того чтобы предотвратить образование кристаллов путем уменьшения колебаний температуры газа, на всем протяжении линии транспортировки также применяют множество видов и комбинаций изоляции (краски, эмали, полиэтилен, пенополиуретан). При этом не обеспечивается стабильная температура на всем участке газопровода. Примером может служить скважины сеноманской залежи Ямбургского месторождения, где температура газа на устье составляет плюс 10–20 градусов Цельсия, а температура газа, поступающего на пункт подготовки находится в пределах от 0 до плюс 20 градусов Цельсия, а в холодные периоды достигает и отрицательных значений вплоть до минус 25 градусов Цельсия. На температурный режим работы газопроводов оказывает влияние колебания температуры окружающей среды, что приводит к работе шлейфов в гидратном режиме. Подземная прокладка трубопроводов частично ликвидирует колебания температур, но не предотвращает образование гидратов в связи с наличием сложных участков прокладки, проходящих над землей. Из-за недостаточного давления на завершающих стадиях эксплуатации месторождения в этих участках появляются условия для образования газогидратов.

Несмотря на большое разнообразие способов борьбы с гидратообразованием, имеющих определенные недостатки, проблема остается актуальной. Поэтому поиск оптимальных, экологически безопасных и эффективных методов транспортировки газа является приоритетной задачей, стоящей при эксплуатации месторождений крайнего севера.

Для поиска инновационных решений и преодоления возникающих технических сложностей в промышленности всё активнее внедряются технологии наноуровня. Основная задача nanoиндустрии заключается в разработке материалов, обладающих структурой с компонентами величиной от одного до ста нанометров.

Для решения проблемы гидратообразования предлагается использовать инновационный материал аэрогель. Аэрогель – это продукт области нанотехнологий, который состоит на 99 % из воздуха, что определяет его ключевые свойства, перечисляемы ниже.

1. *Сверхнизкая теплопроводность.* Большая часть воздуха в материале находится в неподвижном состоянии за счет маленького размера пор, не позволяющему газу осуществлять миграцию. Коэффициент теплопроводности аэрогеля может достигать 0,016 Вт/м·К, что подтверждает самую высокую эффективность по данному показателю в мире. На рисунке 1 приведена сравнительная диаграмма коэффициента теплопроводности аэрогеля относительно основных конкурентов.
2. *Гидрофобность.* Изоляционные материалы из аэрогеля обладают гидрофобными свойствами, что позволяет допустить использование во влажных средах с минимизацией рисков коррозионного разрушения оборудования.
3. *Легкость.* Пористая структура позволяет минимизировать влияние материала на вес промышленной конструкции. Плотность аэрогелей в зависимости от разновидности варьируются от 0,16 кг/м<sup>3</sup> до 150 кг/м<sup>3</sup>.
4. *Экологичность и долговечность материала.* Высокие эксплуатационные характеристики позволяют использовать аэрогель в суровых климатических условиях без вреда окружающей среде, при этом уменьшая периоды ремонтных работ.
5. *Негорючесть.* Аэрогелевые материалы демонстрируют высокую огнестойкость, эффективно препятствуя распространению пламени, что особенно ак-

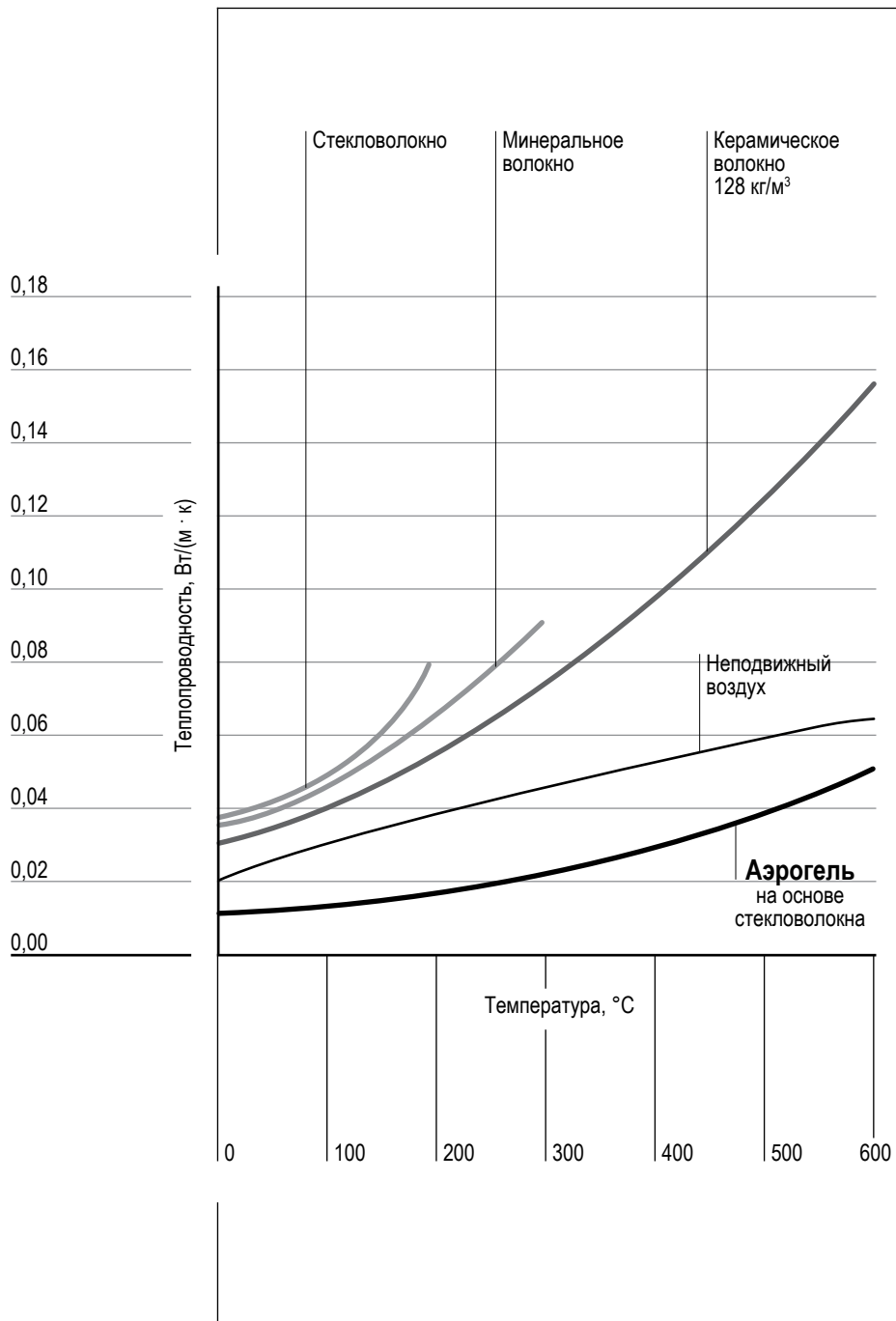


Рис. 1.

**Сравнительная диаграмма теплопроводности.**

Fig. 1. Comparative diagram of thermal conductivity.

Источник: Составлено по данным [13].

Source: compiled according to data [13].

туально для объектов повышенной опасности. Под влиянием повышенных температур аэрогели сохраняют стабильность, не выделяют вредных дымов и токсинов, гарантируя безопасность конструкции и оборудования. Для сравнения, традиционные утеплители типа минеральной ваты теряют теплоизолирующие свойства уже при температуре свыше  $+150^{\circ}\text{C}$ , одновременно высвобождая опасные химические вещества.

6. *Высокая прочность.* Аэрогель выдерживает нагрузку, превосходящую его собственную массу в 2000 раз. Ранее считалось, что аэрогель отличается хрупкостью, пока не появились новые разновидности, созданные на основе графена и углеродных нанотрубок. Современный аэрогелевый материал характеризуется высокой гибкостью и стойкостью к разнообразным механическим воздействиям.
7. *Долговечность.* Основные свойства изоляция из аэрогеля сохраняет на протяжении длительного времени (расчетно-экспериментальная гарантия около 100 лет). Эластичность, прочность, негорючесть позволяет сократить эксплуатационные и ремонтные издержки. Материал хорошо себя показывает при циклическом температурном режиме [13, 14, 15].

Основными недостатками материалов из аэрогеля является стоимость производства. На данный момент ведется активная работа отечественными и зарубежными компаниями по оптимизации процесса.

Теплоизоляция из аэрогеля производится в виде рулонов, что не создает сложностей в перевозке, монтаже и хранении. Пример приведен на рисунке 2.

В ходе исследований был проведен анализ эффективности применения аэрогеля в качестве изоляции газопровода относительно основных конкурентов на рынке. За расчетную основу была принята термогидродинамическая модель однофазного движения газа из СТО Газпром 2-3.5-051-2006 [16]:

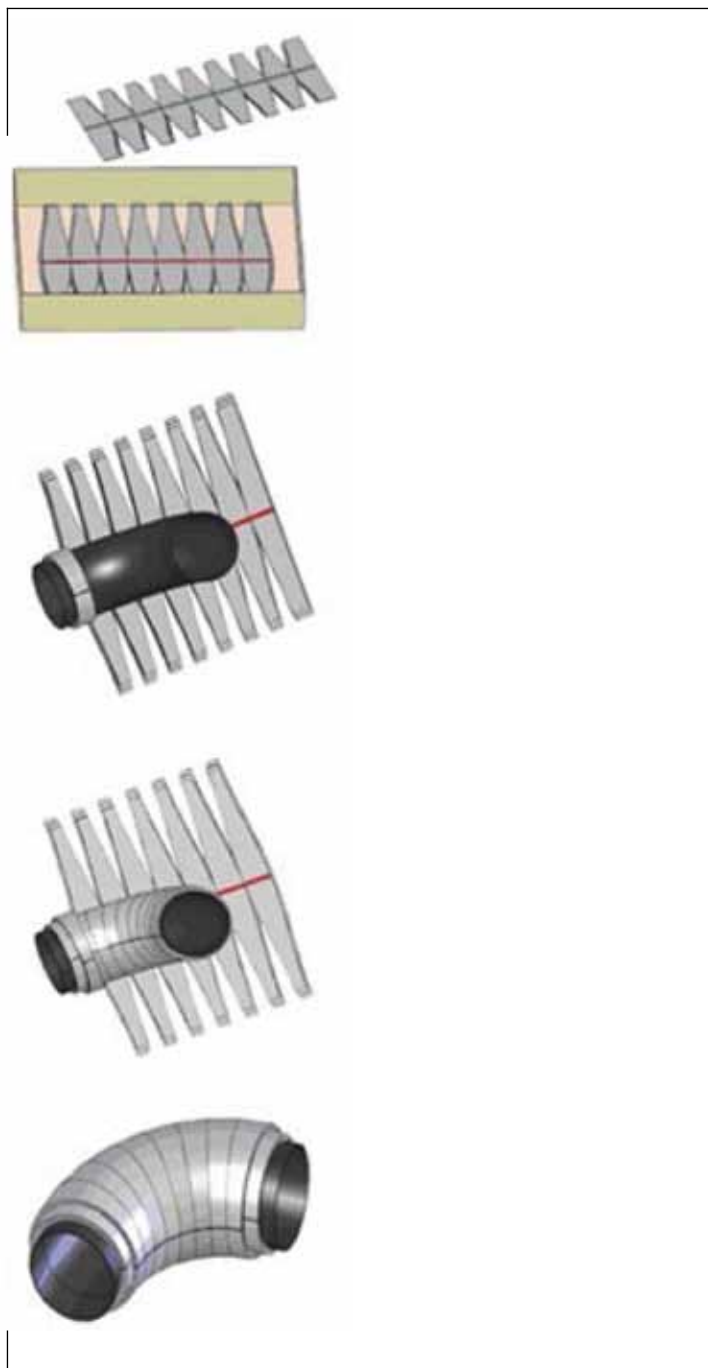
**Рис. 2.****Схема монтажа изоляции из аэрогеля**

Fig. 2 Aerogel insulation installation scheme

Источник: Составлено по данным [13].

Source: compiled according to data [13].

$$T = T_0 + (T_H + T_0) e^{-ax} - D_j \frac{P_H^2 - P_K^2}{2aLP_{cp}} (1 - e^{-ax}) \quad (1)$$

где

$$a = 225,5 \cdot \frac{K_{cp} \cdot d_H}{q \cdot \Delta \cdot C_p \cdot 10^6} \quad (2)$$

- $T_0$  – расчетная температура окружающей среды, К;  
 $T_H$  – температура газа в начале участка трубопровода, К;  
 $P_{cp}$  – среднее давление газа на участке трубопровода, МПа;  
 $P_H, P_K$  – соответственно, начальное и конечное абсолютные давления газа на участке трубопровода, МПа;  
 $d_H$  – наружный диаметр трубопровода, мм;  
 $K_{cp}$  – средний на участке трубопровода общий коэффициент теплопередачи от газа в атмосферу, Вт/м<sup>2</sup> К;  
 $C_p$  – средняя изобарная теплоемкость газа, кДж/кг К;  
 $D_j$  – среднее на участке трубопровода значение коэффициента Джоуля-Томсона, К/МПа;  
 $L$  – протяженность участка трубопровода, км;  
 $q$  – производительность трубопровода, млн м<sup>3</sup>/сут;  
 $x$  – дистанция от начала трубопровода до рассматриваемой точки, км;  
 $\Delta$  – плотность газа относительно воздуха.

В ходе исследования были просчитаны потери температуры в ходе транспортировки газа при использовании различных типов изоляции. На рисунке 3 представлен график, из которого видно, что при прочих равных условиях между коэффициентом теплопроводности материала и изменением температуры в процессе транспортировки наблюдается практически прямая зависимость.

Аналогичные расчеты были проведены при отсутствии перепада давления при перекачке. Результаты приведены на рисунке 4.

Из графиков видно, что на снижение температуры в процессе перекачки оказывает влияние не только теплопроводность материала, но и наличие перепада давления между начальной и конечной точкой. Следует обратить внимание, что при минимальном перепаде давления и при минимальной возможной теплопроводности материала изоляции (аэрогель) изменение температуры практически

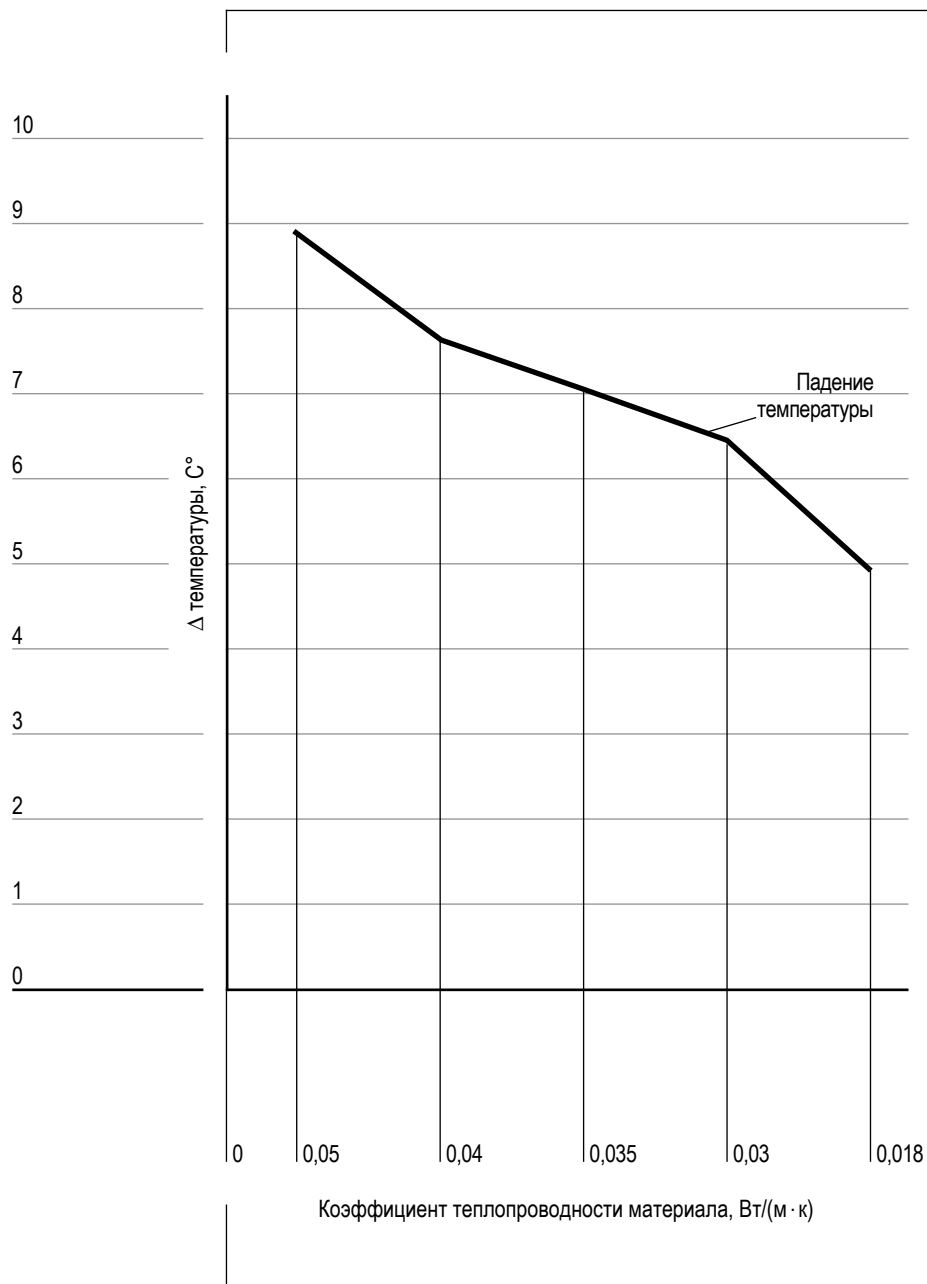


Рис. 3.

**Падение температуры газа в процессе транспортировки в зависимости от теплопроводности материала изоляции.**

Fig. 3. The drop in gas temperature during transportation depending on thermal conductivity of the insulation material.

Источник: Составлено авторами.

Source: compiled by the author.

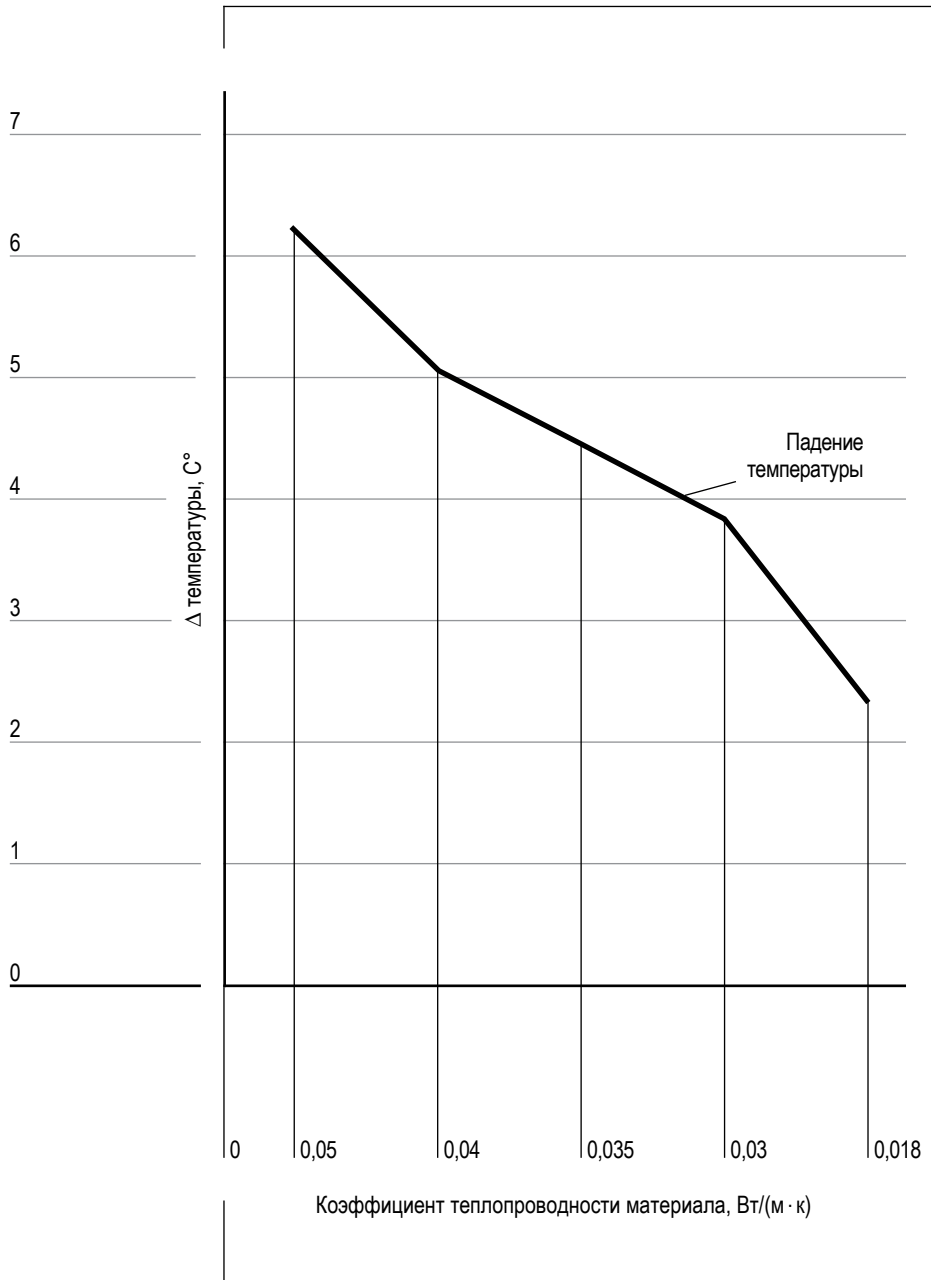


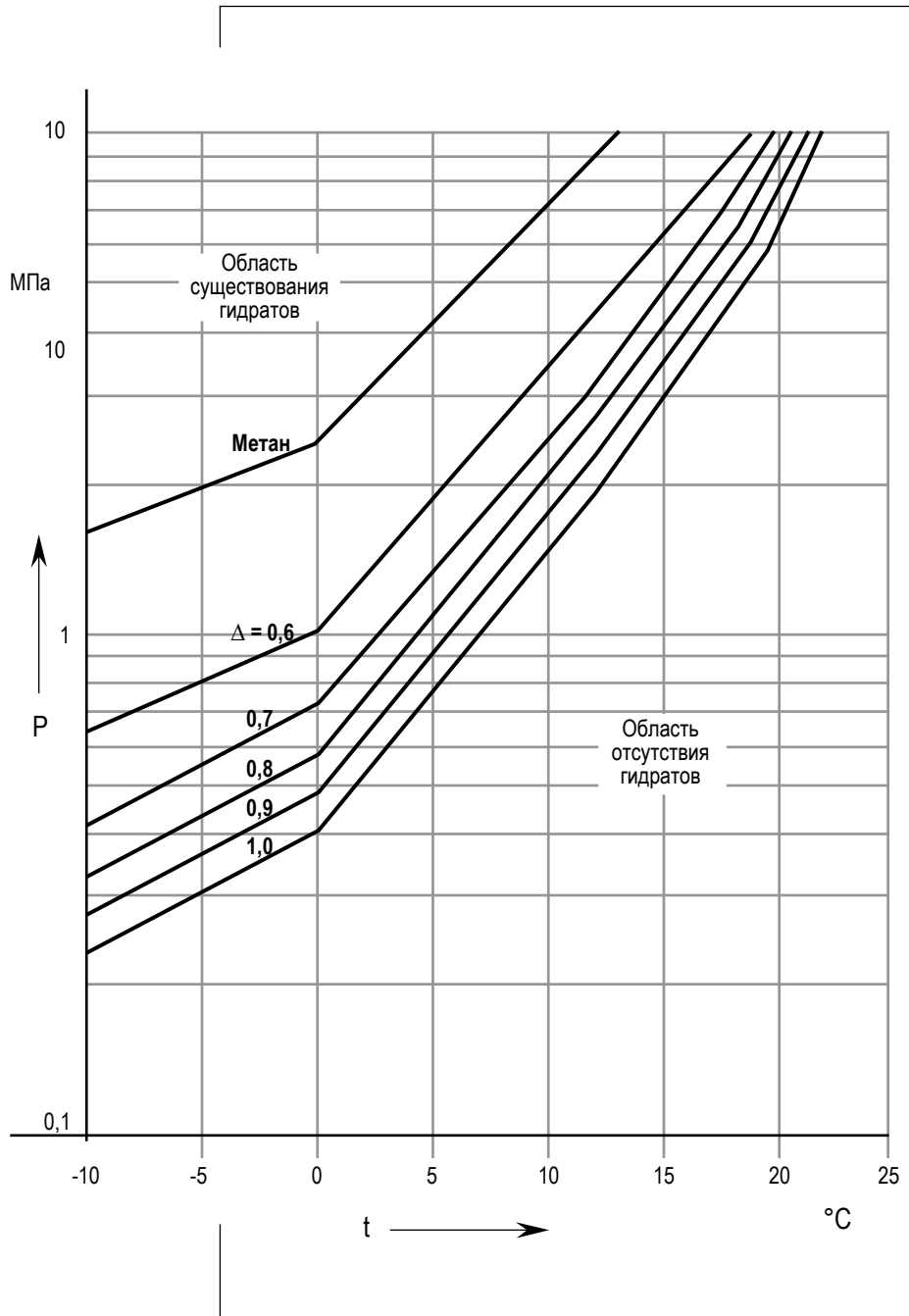
Рис. 4.

**Падение температуры в зависимости от теплопроводности материала изоляции при отсутствии перепада давления при перекачке.**

Fig. 4. Temperature drop depending on thermal conductivity of the insulation material in the absence of pressure drop during pumping.

Источник: Составлено авторами.

Source: compiled by the author.



**Рис. 5. Диаграмма условий образования гидратов.**  
Fig. 5. Diagram of hydrate formation conditions.

Источник: Составлено по данным [17].  
Source: compiled according to data [17].

отсутствует (около 2 градуса Цельсия), тем самым, предотвращая возможность гидратообразования.

Условия гидратообразования определяют по специальным диаграммам. Пример такой диаграммы приведен на рисунке 5.

Из диаграммы видно, что поддержание температуры на уровне 10 градусов Цельсия в процессе транспортировки позволяет практически полностью исключить возможность образование гидратов в трубопроводе. В качестве ориентира принимаем метан, так как он является основным компонентом природного газа (90 % в составе).

Использование аэрогеля на предприятии ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» для теплоизоляции паропровода продемонстрировало значительное преимущество перед традиционной изоляцией из минеральной ваты. Толщина слоя аэрогеля оказалась вдвое меньше, сохраняя тот же уровень эффективности утепления. Дополнительно водоотталкивающие свойства аэрогелевого материала обеспечивают дополнительную защиту от коррозии.

Еще один удачный пример использования аэрогелевых утеплителей демонстрирует опыт компрессорной станции «Северная», принадлежащей ПАО «Газпром» [4]. Здесь теплоизоляционные покрытия успешно справились с решением производственных вопросов, связанных с шумовым загрязнением и теплопотерями в ходе эксплуатации технологического оборудования.

### **Заключение**

Анализ перспектив применения аэрогеля для предотвращения гидратообразования в системах сбора и подготовки скважинной продукции показал, что данный материал обладает всеми необходимыми свойствами для применения в нефтегазовой отрасли. Уникальная низкая теплопроводность позволяет подобрать необходимые параметры давления и температуры для исключения образования гидратов в процессе транспортировки газа, а также уменьшить геометрические размеры промышленных сооружений за счет меньшего диаметра изоляции.

Несмотря на все преимущества изоляции из аэрогеля, дороговизна и сложность изготовления ставит под вопрос экономическую целесообразность применения при эксплуатации месторожде-

ний. На данный момент происходит процесс поиска оптимизации производства аэрогеля по всему миру. Вопрос становится все более актуальным в связи началом эпохи освоения ресурсов, находящихся за полярным кругом.

### **Список источников**

1. Баталин О. Ю., Захаров М. Ю. Совершенствование методов расчета условий гидратообразования. М.: ВНИИЭГАЗпрома, 1988. 142 с.
2. Бык С. Ш., Макогон Ю. Ф., Фомина В. И. Газовые гидраты. М.: Химия, 1980. 296 с.
3. Истомин В. А. Предупреждение и ликвидация газовых гидратов в системах сбора и промышленной обработки газа и нефти. Москва: ВНИИЭ-газпром, 2000. 213 с.
4. Истомин В. А., Квон В. Г. Предупреждение и ликвидация газовых гидратов в системах добычи газа. М.: ИРЦ Газпром, 2004. 506 с.
5. Макогон Ю. Ф., Саркисьянц Г. А. Предупреждение образования гидратов при добыче и транспорте газа. М.: Недра, 2005. 186 с.
6. Бухгалтер Э. Б. Метанол и его использование в газовой промышленности. М.: Недра, 1986. 238 с.
7. Дегтярёв Б. В., Лутошкин Г. С., Бухгалтер Э. Б. Борьба с гидратами при эксплуатации газовых скважин в районах Севера (практическое руководство). М.: Недра, 1969. 119 с.
8. Попов В. И., Хорошилов В. А. Осушка газа. М.: Недра, 1972. 112 с.
9. Тройникова А. А. и др. Экспериментальные исследования ингибиторов гидратообразования на основе хлоридов двухвалентных металлов // Вести газовой науки. 2017. № 2 (30). С. 104–109.
10. Carroll J. Natural gas hydrates: a guide for engineers // Gulf Professional Publishing, 2020. 338 p.
11. Bai D. et al. The effect of aqueous NaCl solution on methane hydrate nucleation and growth // Fluid Phase Equilibria. 2019. Т. 487. С. 76–82.
12. Du J. et al. Experiments and prediction of phase equilibrium conditions for methane hydrate formation in the NaCl, CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub> electrolyte solutions // Fluid Phase Equilibria. 2019. Т. 479. С. 1–8.
13. Васильева И. Л., Немова Д. В. Перспективы применения аэрогелей в строительстве // Alfabuild. 2018. № 4(6). С. 135–145
14. Якубовский Ю. Е., Лобач И. А. Использование аэрогеля в качестве теплоизоляционного материала магистральных трубопроводов // Проблемы функционирования систем транспорта. Сборник трудов конференции. 2010. С. 379–380.
15. Меньшутина Н. В., Катаевич А. М., Лебедев А. Е. Наноструктуриро-

- ванные материалы на основе диоксида кремния: аэрогель, ксерогель, криогель // *Естественные и технические науки*. 2013. № 2. С. 374–376.
16. СТО Газпром 2-3.5-051-2006 «Нормы технологического проектирования магистральных газопроводов». ИРЦ Газпром: ВНИИГАЗ, 2006. 196 с.
  17. Сарданашвили С. А. Расчетные методы и алгоритмы (трубопроводный транспорт газа). Москва: «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2005. 577 с.
  18. Бушманова А.В., Виденков Н.В., Доброгорская Л.В., Семенов К.В., Федотов В.В. Инновационные материалы на основе аэрогеля в строительстве // *Alfabuild*. 2017. №1 (1). С. 89–98.
  19. Михайлов И. М. Аэрогель в гражданском строительстве. Применение и перспективы развития // *Международные научно-практические конференции*. М. Изд-во: ИП Коротких А.А., 2018. С.397–404.
  20. Блинцова А.С. Теплоизоляция на основе наноматериала Аэрогель // *Вопросы науки*. 2015. С. 24–27.
  21. *Interplanetary Dust*. Springer / E. Grun [et al.] // *Astronomy and Astrophysics Library*. 2001. P. 804.
  22. Pierre A. C., Pajonk G. M. *Chemistry of Aerogels and Their Applications* // *Chemical Reviews*. 2002. V. 102. No. 11. P. 4243–4266.

### References

1. Batalin OY, Zakharov MY. Improvement of methods for calculating hydrate formation conditions. Moscow: Vniiegazprom; 1988. 142 p. (In Russ.).
2. Byk SSh, Makogon YuF, Fomina VI. Gas hydrates. M.: Khimiya; 1980. 296 p. (In Russ.).
3. Istomin VA. Prevention and elimination of gas hydrates in gas and oil collection and field treatment systems. Moscow: VNIIEgazprom; 2000. 213 p. (In Russ.).
4. Istomin VA, Kvon VG. Prevention and elimination of gas hydrates in gas production systems. M. : IRTS Gazprom; 2004. 506 p. (In Russ.).
5. Makogon, YuF., Sarkisyants GA. Prevention of hydrate formation during gas production and transport. M.: Nedra; 2005. 186 p. (In Russ.).
6. Bygalter AB. Methanol and its use in the gas industry. Germany; 1986. 238 p. (In Russ.).
7. Degtyarev BV, Lutoshkin GS, Buchgalter EB. Control of hydrates during the operation of gas wells in the North (practical guide). M.: Nedra; 1969. 119 p. (In Russ.).
8. Popov VI, Gorokhilov VA. Gas exploration. Moscow: Nauka; 1972. 112 p. (In Russ.).
9. Troinikova AA, et al. Experimental studies of hydrate formation inhibitors based on divalent metal chlorides. *Vesti gazovoi nauki*. 2017;2(30):104-109. (In Russ.).

10. Carroll J. Natural gas hydrates: a guide for engineers. Gulf Professional Publishing; 2020. 338 p.
11. Bai D. et al. The effect of an aqueous NaCl solution on the nucleation and growth of methane hydrate. Equilibrium of the liquid phase. 2019;(487):76-82.
12. Du J. et al. Experiments and prediction of phase equilibrium conditions for the formation of methane hydrate in solutions of electrolytes NaCl, CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>. Fluid phase equilibria. 2019;( 479):1-8.
13. Vasileva IL, Nemova DV. Prospects for the use of aerogels in construction. Alfabuild. 2018;4(6):135-145 (In Russ.).
14. Yakubovsky YuE, Lobach IA. The use of aerogel as a thermal insulation material for main pipelines. Proceedings of the conference "Problems of functioning of transport systems". 2010. P. 379-380 (In Russ.).
15. Menshutina NV, Katalevich AM, Lebedev AE. Nanostructured materials based on silicon dioxide: aerogel, xerogel, cryogel. Natural and technical sciences. 2013;(2):374-376. (In Russ.).
16. STO Gazprom 2-3.5-051-2006 "Standards of technological design of main gas pipelines". IRC Gazprom: VNIIGAZ; 2006. 196 p. (In Russ.).
17. Sardanashvili SA. Calculation methods and algorithms (pipeline gas transport). Moscow: "Oil and Gas" Gubkin Russian State University of Oil and Gas; 2005. 577 p. (In Russ.).
18. Bushmanova AV, Videnkov NV, Dobrogorskaya LV, Semenov KV, Fedotov VV. Innovative materials based on aerogel in construction. Alfabuild. 2017;1(1):89-98. (In Russ.).
19. Mikhailov IM. Agrogel in the civil state. Application and development prospects. International scientific and practical conferences. Moscow: Publishing house: IP Korotkov AA; 2018. P. 397-404. (In Russ.).
20. Blindova AS. Isolation based on aerogel nanomaterial. Questions of science. 2015. P. 24-27. (In Russ.).
21. Interplanetary dust. Springer E. Grun [et al.]. Library of Astronomy and Astrophysics; 2001. P. 804.
22. Pierre AC, Pajonk GM. Chemistry of Aerogels and Their Applications. Chemical Reviews. 2002;102(11):4243-4266.

### **Информация об авторе**

**Александр Валентинович Назаренко** – аспирант Северо-Кавказского федерального университета

### **Information about the author**

**Aleksandr V. Nazarenko** – postgraduate student, North-Caucasus Federal University