

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ВАКУУМНЫХ КОЛБ ДЬЮАРА В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ЗОНДАХ ДЛЯ КАРОТАЖА СКВАЖИН ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ И ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Ромашин Р.В.

Технологический институт – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Лесной

Ключевые слова: скважины высокого давления и высокой температуры, Дьюар, колба Дьюара, вакуумная колба, материалы с фазовым переходом, синтактическая пена, кремнеземный аэрогель, каротаж во время бурения, компоновка низа буровой колонны, скважинная геофизика.

Аннотация. Защита электронных компонентов каротажных приборов в геофизических исследованиях высокотемпературных скважин является важной составляющей. В этой работе обзорно описывается известное решение этой проблемы с помощью вакуумных колб Дьюара, имеющих дополнительный теплоотвод внутри, в виде материалов с фазовым переходом. И указывается на процесс теплопередачи от защитного кожуха к наружным стенкам колбы. При высоких температурах – от 150°C, низкая теплопроводность азота или аргона, окружающего вакуумную колбу, уже не имеет особого влияния на процесс. Газ работает как утеплитель, а не теплоизолятор. Начинает играть огромную роль излучение тепла с поверхностей. Если стенки темные или шероховатые, то у них высокая степень черноты. Тогда излучение может передавать даже больше тепла, чем сам газ. Поэтому в качестве новшества предлагается замена газа в пространстве вокруг колбы Дьюара на дополнительную теплоизоляцию с помощью кремнеземного аэрогеля или синтактических пен на различной основе. Проводится моделирование переходных тепловых процессов методом конечных элементов для трех уровней температур – в соответствии с распространенной классификацией условий работы скважин высокого давления и высокой температуры. При моделировании учитываются два случая – турбулентный режим подачи бурового раствора и режим без циркуляции. Дается сравнительный анализ применения теплоизоляционных материалов и рассматриваются перспективы эксплуатации высокотемпературных скважин в Российской Федерации.

ENHANCED APPLICATION OF VACUUM DEWAR FLASKS IN HIGH-PRESSURE HIGH-TEMPERATURE BOREHOLE LOGGING TOOLS

Romashin R.V.

Technological Institute of the National Research Nuclear University MPhI, Lesnoy

Keywords: high-pressure high-temperature wells, Dewar, Dewar flask, vacuum flask, phase-change materials, syntactic foam, silica aerogel, logging while drilling, bottomhole assembly, borehole geophysics.

Abstract. Thermal protection of electronic components in logging tools is a critical factor in high-temperature borehole geophysical surveys. This paper reviews a well-known solution to this problem utilizing vacuum Dewar flasks equipped with internal heat sinks based on phase-change materials. The study highlights the heat transfer process from the pressure barrel to the outer walls of the flask. At high temperatures exceeding 150 °C, the low thermal conductivity of nitrogen or argon surrounding the vacuum flask no longer significantly influences the process. The gas acts as a thermal conductor rather than an insulator. Consequently, surface thermal radiation begins to play a dominant role. If the walls are dark or rough, they exhibit high emissivity, allowing radiation to transfer even more heat than the gas itself. As an innovation, this work proposes replacing the gas in the annular space around the Dewar flask with additional thermal insulation, such as silica aerogel or various types of syntactic foams. Transient thermal modeling is performed using the Finite Element Method for three temperature levels, in accordance with the standard classification of High-Pressure High-Temperature well conditions. The simulation accounts for two scenarios: turbulent drilling fluid circulation and non-circulating mode. A comparative analysis of thermal insulation materials is provided, along with an overview of the prospects for high-temperature well operations in the Russian Federation.

Введение

В Российской Федерации скважины с высоким давлением и высокой температурой – High-Pressure and High-Temperature (HPHT) – только начинают появляться. Многие проблемы скважинной геофизики, связанные с работой оборудования в этих сложных условиях, уже решены мировыми производителями.

В настоящее время НРНТ – это очень известное слово в нефтяной промышленности. Самой большой проблемой при разведке нефти и газа является работа в условиях высокой температуры, которая также может быть охарактеризована как температура выше 150°C (300°F) и забойного давления в скважине, превышающего 69 МПа (10.000 psi) [1].

Нефтяная и газовая промышленность в течение многих лет сталкивается с повышенными температурами и давлением, однако в отрасли не существует общепринятых стандартов, определяющих условия НРНТ и связанную с ними взаимосвязь между температурой и давлением. В целях уточнения этих определений компания Schlumberger (SLB) использует принципы, которые определяют скважины с высоким давлением и температурой по трем категориям [2]. Сейчас большинство других компаний подразделяют свои операции, продукты или инструменты на три основных уровня, однако для каждого уровня предусмотрены различные границы давления и температуры [3]. Классификационные границы представляют собой пределы устойчивости компонентов, используемых для обслуживания оборудования – эластомерных уплотнений и электронных устройств.

В проведенном исследовании будут учитываться границы температур (рис. 1), лежащие за пределами нормальной (зеленый цвет) области эксплуатации (НРНТ Wells // Industry Article. – URL: <https://www.slb.com/resource-library/oilfield-review/defining-series/defining-hpht>).

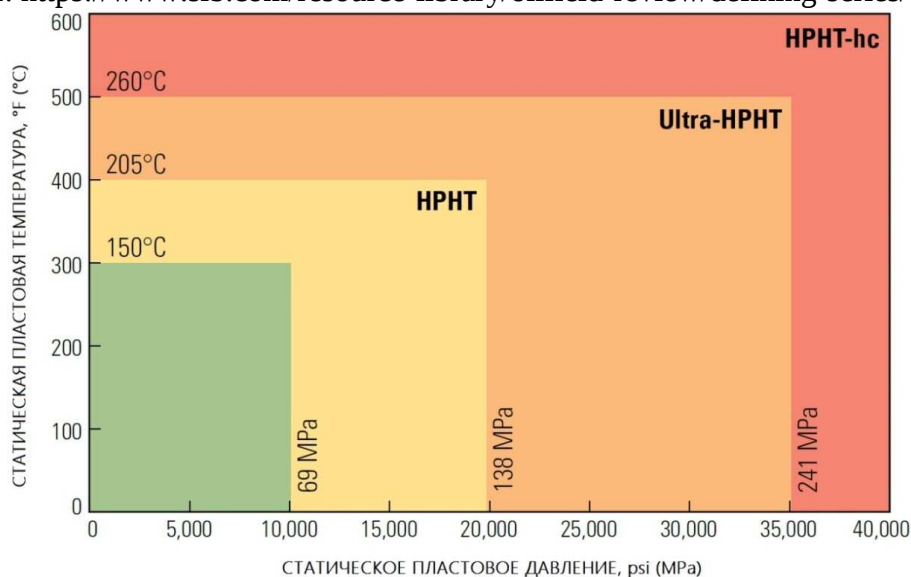


Рис. 1. Классификация условий работы скважин с высоким давлением и высокой температурой – НРНТ (источник: Schlumberger (SLB))

Традиционные методы защиты каротажных инструментов от высоких забойных температур в скважинах НРНТ включают использование теплоизолирующих кожухов или вакуумных колб [4]. Общим для существующих исследований является использование колб Дьюара для термоизоляции электронных устройств от внешней среды при одновременном использовании термоаккумулирующего модуля для поглощения тепла, выделяемого электронными компонентами [5].

Вакумные колбы или, как их ещё называют, колбы Дьюара – это термоизолированные сосуды с двойными стенками – рисунок 2 (Vacuum Flask: Overview. National K Works, Inc. – URL: <https://www.nationalkworks.com/products/vacuum-flask-overview.html#heatsink>). Узкое пространство между двумя стенками вакуумируется, что значительно снижает теплопередачу. Практически полное отсутствие молекул воздуха сводит к минимуму теплопередачу за счет конвекции. Отражающие поверхности в вакуумном пространстве минимизируют теплопередачу за счет излучения, а зазор между внутренней и внешней стенками – теплопередачу за счет проводимости. Теплоизоляция является пассивной, и большая часть тепла проникает в колбу Дьюара (рис. 3) за счет теплопроводности через горловину внутренней стенки, а также через электропроводку или механические элементы, входящие в колбу (тепловые утечки) – рисунок 4.

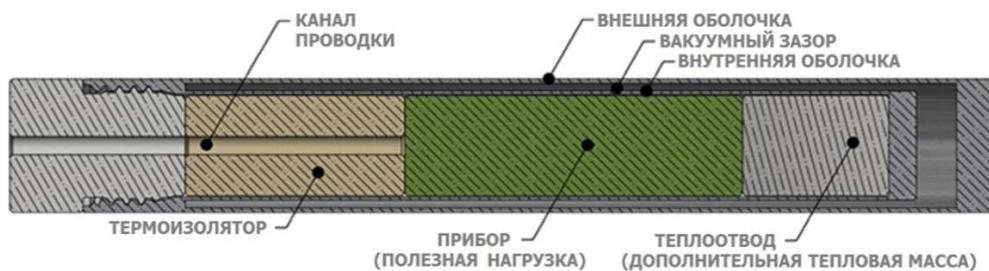


Рис. 2. Схема вакуумной колбы Дьюара (источник: National K Works, 6Inc)



Рис. 3. Колба из титанового сплава для детекторов низкоэнергетического гамма-излучения (слева) и колбы с малым наружным диаметром, но большой длиной, рассчитанные на внешнее давление 138 МПа – с большим соотношением диаметра к длине – наружный диаметр 1 дюйм (25,4 мм), длина 118,5 дюйма (3010 мм) (источник: National K Works, Inc.)



Рис. 4. Специальные теплоизоляторы, предотвращающие попадание тепла в колбу, и в то же время обеспечивающие связь и электропитание (источник: National K Works, Inc.)

Изготавливаемая самая большая колба Дьюара для скважинных инструментов – ее длина составляет более 6 метров – способна выдерживать высокие температуры в течение более 100 часов. Большая длина обусловлена тем, что электронные компоненты на плате вынужденно располагаются в ряд, из-за ограниченности пространства.

Время работы можно продлить, увеличив удельную теплоемкость (тепловую массу) вакуумной колбы в виде отдельного теплоотводящего материала, или за счет увеличения общей удельной теплоемкости полезной нагрузки в сборе (изменив материалы и их количество).

Для защиты электроники внутри колб Дьюара в качестве таких "тепловых аккумуляторов" (Heat Sinks) используют сплавы, обладающие высокой скрытой теплотой плавления. Это чаще всего эвтектические сплавы. Например, сплав Вуда (висмут – 50%, свинец – 25%, олово – 12,5%, кадмий – 12,5%); сплав Розе (висмут – 50%, свинец – 25-28%, олово – 22-25%); сплавы на основе индия. Они переходят из твердого состояния в жидкое при строго фиксированной температуре, поглощая в этот момент огромное количество теплоты. Эти сплавы часто называют РСМ (Phase Change Materials – материалы с фазовым переходом) [6].

Применение колб Дьюара для охлаждения скважинных инструментов является запатентованной технологией компании Schlumberger Technology Corp. – патент US006336408B1 [7]. А так же компании Baker Hughes Holdings LLC – патент EP1945904B1 [8].

Колбы Дьюара позволяют использовать электронику со стандартной температурной характеристикой, что предоставляет более широкий выбор компонентов, быстроту реализации проекта и его последующей модернизации – за счет значительно меньшей стоимости по сравнению с малодоступной и дорогой специальной высокотемпературной электроникой.

Колба Дьюара находится внутри защитного кожуха – напорного корпуса (Pressure Barrel), представляющего собой толстостенную трубу, чаще всего титановую. Пространство в зазоре между трубой и колбой заполнено азотом/воздухом или аргоном с коэффициентами

теплопроводности $\lambda = 0,026 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$, $\lambda = 0,018 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ соответственно. При толщине слоя газа вокруг колбы 5-7 мм, конвекция (движение газа) почти не возникает, поэтому тепло передается в основном через теплопроводность. Для азота и аргона она низкая. Но при высоких температурах – от 150°С огромную роль начинает играть излучение. Если поверхности стенок блестящие (низкая степень черноты), газ удержит тепло хорошо. Если стенки темные или шероховатые, то излучение может передавать даже больше тепла, чем сам газ. В нашем случае как раз это и происходит, поскольку внутренняя стенка защитной трубы, и наружная поверхность колбы, имеют значительно более высокую шероховатость по сравнению с зеркальными поверхностями оболочек внутри вакуумного зазора самой колбы Дьюара (рис. 2). Слой 5-7 мм слишком тонок для развития мощных конвекционных потоков, поэтому газ работает как утеплитель, а не теплоизолятор.

Но, можно избежать этого явления, заменив газ между колбой и внутренней стенкой напорного корпуса (Pressure Barrel) современными теплоизоляционными материалами, такими как синтактические пены и кремнеземный аэрогель.

Синтактические пены – это класс композиционных материалов, состоящих из матрицы, в которую встроены полые микросферы, обладающие уникальным сочетанием низкой плотности и специальных механических свойств [9]. Их состав сильно варьируется в первую очередь в зависимости от выбора материала матрицы и микросфер. Эти матрицы, включающие полимеры, металлы и керамику, обычно комбинируются с микросферами, состоящими из боросиликатного стекла, углерода, керамики или металла. В полимерных матрицах стеклянные микросферы являются предпочтительным армирующим материалом из-за их высокой удельной прочности, хороших характеристик смачивания, энергопоглощающих свойств и низкой стоимости [10]. Эти сферы имеют средний диаметр от 10 до 100 микрон, что придает синтактику белый цвет, видимый невооруженным глазом. Этот изотропный материал обычно выпускается в виде блоков (рис. 5).

Первый патент на синтактические пены появился еще в 1969 году [11]. Термин “пена” относится к ячеистой природе материала (Engineered Syntactic Systems. – URL: <https://ess.globecomposite.com>).

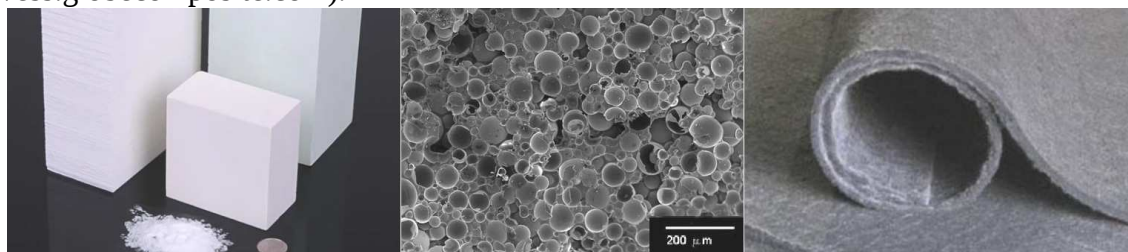


Рис. 5. Блоки синтактической пены и их микроструктура (источник: Engineered Syntactic Systems); аэрогелевый мат (источник: Aerogels P.H.U. Krakuss)

Аэрогели – это очень разнообразные пористые материалы с большим потенциалом для широкого применения. Существующие аэрогели обеспечивают очень эффективную теплоизоляцию [12-14].

Аэрогелевый мат – представляет собой гибкий нанопористый аэрогелевый изоляционный материал (Aerogel mats / Aerogels P.H.U. Krakuss. – URL: <https://insulationaerogel.com/products/aerogel-mats/>). Эта теплоизоляция сочетает в себе кремнеземный аэрогель с армирующими волокнами, для обеспечения максимальных тепловых характеристик – (рис. 5, справа).

Материалы и методы

В качестве конкретного примера для сравнения работоспособности теплоизоляционных материалов, защищающих колбу Дьюара, возьмем размеры (табл. 1) геофизического зонда для скважины 13,5", работающего в условиях Ultra – НРНТ для каротажа во время бурения (LWD) со специальной компоновкой низа бурильной колонны – КНБК [15-17].

Табл. 1. Радиальная геометрия слоев (9,5" Drill Collar; долото 12 1/4")

Слой	Внешний диаметр (D_{out})	Толщина (t) / Зазор	Внутренний диаметр (D_{in})	Описание и функции
1. Скважина (Hole)	342,9 мм (13,5")	–	–	Стенка породы.
2. Зазор в затрубе (Annulus)	–	50,8 мм	–	Кольцевой канал между воротником и стенкой скважины – для выноса крупного шлама
3. Немагнитный воротник (Drill Collar)	241,3 мм (9,5")	85,0 мм	71,3 мм	Утяжеленная буровая труба (УБТ) – сверхтолстая стенка для веса на долото
4. Гидравлический канал (Mud Channel)	71,3 мм	8,4 мм	54,5 мм	Кольцевой канал для охлаждающего раствора и канал связи по буровому раствору
5. Напорный или герметичный корпус (Pressure Barrel)	54,5 мм	9,5 мм	35,5 мм	Герметичный титановый кожух – труба под высокое давление
6. Синтактическая пена / Кремнеземный аэрогель (Syntactic Foam / Silica Aerogel)	35,5 мм	5,0 мм	25,5 мм	Вторичная теплоизоляция – вместо азота/воздуха или аргона
7. Колба Дьюара (Dewar Flask)	25,5 мм	5,0 мм	15,5 мм	Первичный термобарьер – Вакуумная колба
8. Ядро электроники (Electronics Core)	15,5 мм	7,75 мм (R)	–	Электронная узкая плата, РСМ (сплав Розе)

Фактическая забойная температура может превышать 227°C при испытаниях скважины и температуре в устье колонны 60°C [18].

В таблице 2 приведены показатели температуры потока бурового раствора для 9,5" УБТ.

Табл. 2. Распределение температуры

Температура пласта, °C	Температура в Затрубе (Annulus) при циркуляции раствора, °C	Температура в Гидравлическом канале (Mud Channel) при циркуляции раствора, °C	Температура в Гидравлическом канале (Mud Channel) при остановке насоса, °C
150	135-140	115-125	150
205	175-185	150-165	205
260	230-245	195-215	260

Коэффициент конвективной теплоотдачи (α) для бурового раствора в Mud Channel (табл. 1) – это динамическая величина, которая сильно зависит от режима течения (ламинарный или турбулентный) и реологии самого раствора.

В проведенных расчетах рабочего режима с циркуляцией принят вариант на нижней границе турбулентного режима: $\alpha=500$ Вт/(м²К). При остановке насоса (паузе): $\alpha=50$ Вт/(м²К).

Температура с учетом циркуляции в Mud Channel назначалась по верхней границе (табл. 2).

Для исследования были подобраны пять теплоизоляционных материалов [19-23] с разными теплофизическими характеристиками (табл. 3).

Для теплового моделирования защиты колбы Дьюара от термического воздействия от стенок породы в самой скважине, выбран только слой 5 и 6 (табл. 1) – титановая труба и зазор между ней и внешней стенкой колбы Дьюара (слой 7). Этот зазор обычно заполнен воздухом. В проведенном исследовании это зазор заполняется одним из пяти изоляторов (табл. 3). Размеры теплофизической модели соответствуют размерам слоев 5 и 6.

Моделирование проводится с использованием программы, реализующей метод конечных элементов и имеющей возможность считать переходные тепловые процессы.

Теплофизические свойства титановой трубы показаны на рисунке 6. В качестве марки взят Титан Grade 5 – он или его аналоги используются для условий Ultra – НРНТ.

Табл. 3. Характеристики теплоизоляционных материалов

Характеристика	Кремнеземный аэрогель (<i>Silica aerogel</i>) – в виде композитного аэрогелевого мата	Синтактическая силиконовая пена (<i>Syntactic Silicone Foam</i>)	Синтактическая полиимидная пена (<i>Syntactic Polyimide Foam</i>)	Синтактическая бензоксазиновая пена (<i>Syntactic Benzoxazine Foam</i>)	Синтактическая пена на основе сложного эфира цианата (<i>Syntactic Cyanate Ester Foam</i>)
Модуль упругости (E), МПа	10	120	600	3000	3500
Коэффициент Пуассона (ν)	0,25	0,4	0,28	0,33	0,34
Модуль сдвига (G), МПа	4,2	42,8	234	1128	1306
Плотность (ρ), кг/м ³	180	850	480	900	700
Предел прочности (σ_b), МПа	7	20	20	120	100
Коэффициент теплового расширения (α), 10 ⁻⁶ /°C	5	200	38	35	45
Теплопроводность (λ), Вт/(м·°C)	0,016	0,13	0,052	0,12	0,11
Удельная теплоемкость (c), Дж/(кг·°C)	800	1300	1100	1100	1200
Предельная рабочая температура, +°C	650	250	315...370	200...250	300...370

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости в X	115000	Н/мм ²
Коэффициент Пуассона в XY	0.33	Не применимо
Модуль сдвига в XY	42000	Н/мм ²
Массовая плотность	4430	кг/м ³
Предел прочности при растяжении в X	900	Н/мм ²
Предел прочности при сжатии в X		Н/мм ²
Предел текучести		Н/мм ²
Коэффициент теплового расширения в X	9e-006	/K
Теплопроводность в X	6.7	W/(m·K)
Удельная теплоемкость	540	J/(kg·K)

Рис. 6. Свойства материала Титан Grade 5

Результаты

При моделировании переходного теплового процесса для случая **турбулентного режима подачи бурового раствора** и его температуре в Гидравлическом канале (Mud Channel) 215°C (табл. 2) – температура на внутренней поверхности для материала **Silica aerogel**, контактирующей с колбой Дьюара, составит 124,675°C через 360 секунд (6 минут) – рисунок 7. И установится на уровне 150,859°C через 2520 секунд (42 минуты) – рисунок 7, справа.

Результаты аналогичных расчетов для всех пяти материалов (табл. 3) и уровне температур по верхней границе при циркуляции раствора (табл. 2) сведены в таблицу 4.

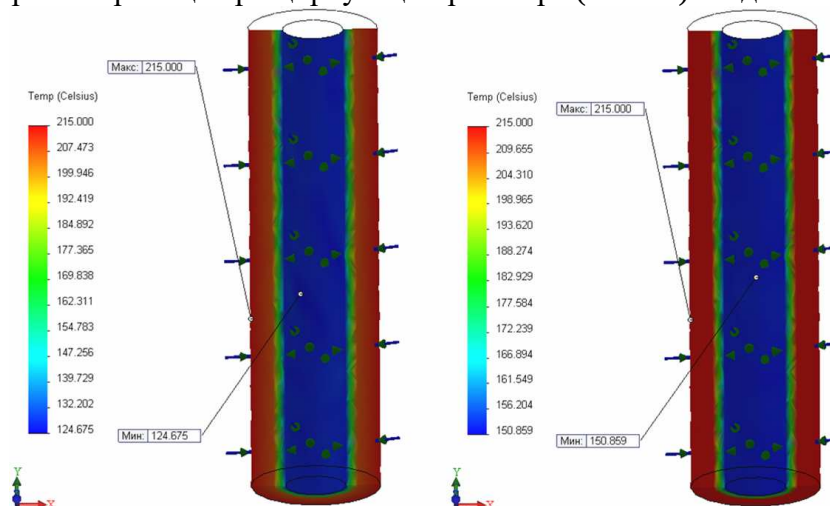


Рис. 7. Результаты расчета, методом конечных элементов, для турбулентного режима

Табл. 4. Температура на поверхности теплоизоляции, предохраняющей колбу Дьюара, при турбулентной циркуляции раствора

Температура в Гидравлическом канале (Mud Channel) при циркуляции раствора (коэффициент теплоотдачи 500 Вт/(м ² К)), °C	Температура поверхности – Кремнеземный аэрогель, в виде композитного аэрогелевого мата (<i>Silica aerogel</i>), °C	Температура поверхности – Синтактическая силиконовая пена (<i>Syntactic Silicone Foam</i>), °C	Температура поверхности – Синтактическая полиимидная пена (<i>Syntactic Polyimide Foam</i>), °C	Температура поверхности – Синтактическая бензоксазиновая пена (<i>Syntactic Benzoxazine Foam</i>), °C	Температура поверхности – Синтактическая пена на основе сложного эфира цианата (<i>Syntactic Cyanate Ester Foam</i>), °C
125	90,440	118,259	109,781	117,748	117,150
165	117,293	155,695	143,992	154,989	154,164
215	150,859	202,490	186,755	201,540	200,431

При моделировании переходного теплового процесса в случае **остановки насоса для подачи бурового раствора – режим без циркуляции**, и температуре в Гидравлическом канале (MudChannel) 260°C – температура на внутренней поверхности для материала **Silica aerogel**, контактирующей с колбой Дьюара, составит 148,841°C через 360 секунд (6 минут) – рисунок 8. И установится на уровне 181,069°C, через 3600 секунд (60 минут) – рисунок 8, справа.

Результаты аналогичных расчетов для всех пяти материалов (табл. 3) и уровне температур при отсутствии циркуляции раствора (табл. 2), сведены в таблицу 5.

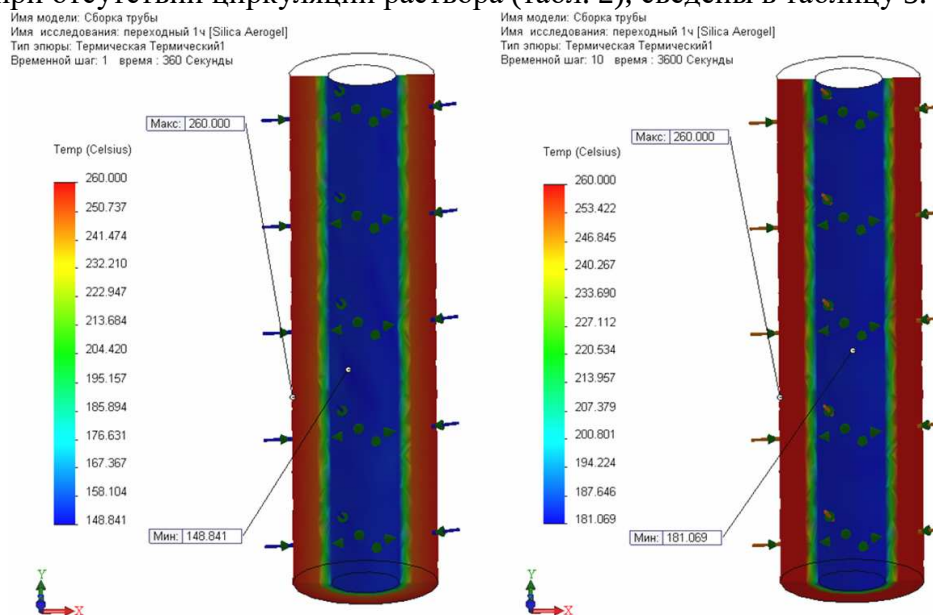


Рис. 8. Результаты расчета, методом конечных элементов, для режима без циркуляции

Табл. 5. Температура на поверхности теплоизоляции, предохраняющей колбу Дьюара, при остановке насоса – циркуляция раствора отсутствует

Температура в Гидравлическом канале (Mud Channel) при остановке насоса (коэффициент теплоотдачи 50 Вт/(м ² К)), °C	Температура поверхности – Кремнеземный аэрогель, в виде композитного аэрогелевого мата (<i>Silica aerogel</i>), °C	Температура поверхности – Синтактическая силиконовая пена (<i>Syntactic Silicone Foam</i>), °C	Температура поверхности – Синтактическая полиимидная пена (<i>Syntactic Polyimide Foam</i>), °C	Температура поверхности – Синтактическая бензоксазиновая пена (<i>Syntactic Benzoxazine Foam</i>), °C	Температура поверхности – Синтактическая пена на основе сложного эфира цианата (<i>Syntactic Cyanate Ester Foam</i>), °C
150	107,223	141,657	131,163	141,023	140,284
205	144,146	193,131	178,203	192,230	191,177
260	181,069	244,605	225,242	243,437	242,071

Сравнительные гистограммы полученных расчетных уровней температур на поверхности теплоизоляционных материалов, контактирующих с колбой Дьюара, представлены на рисунке 9 и рисунке 10 – для турбулентного режима циркуляции бурового раствора и остановке насоса, соответственно.

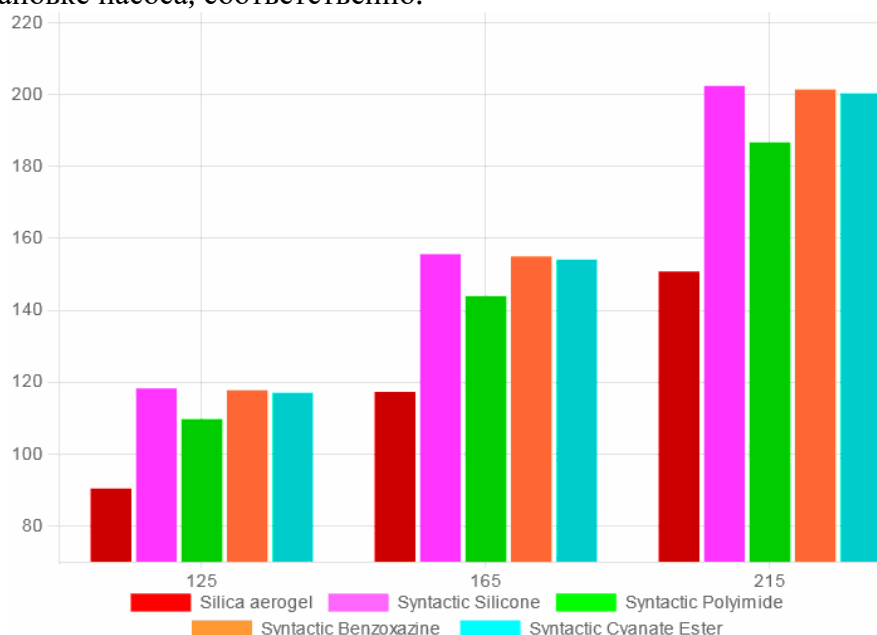


Рис. 9. Гистограмма температур поверхности пяти теплоизоляционных материалов для трех уровней температур в Гидравлическом канале (Mud Channel) при циркуляции раствора, °C

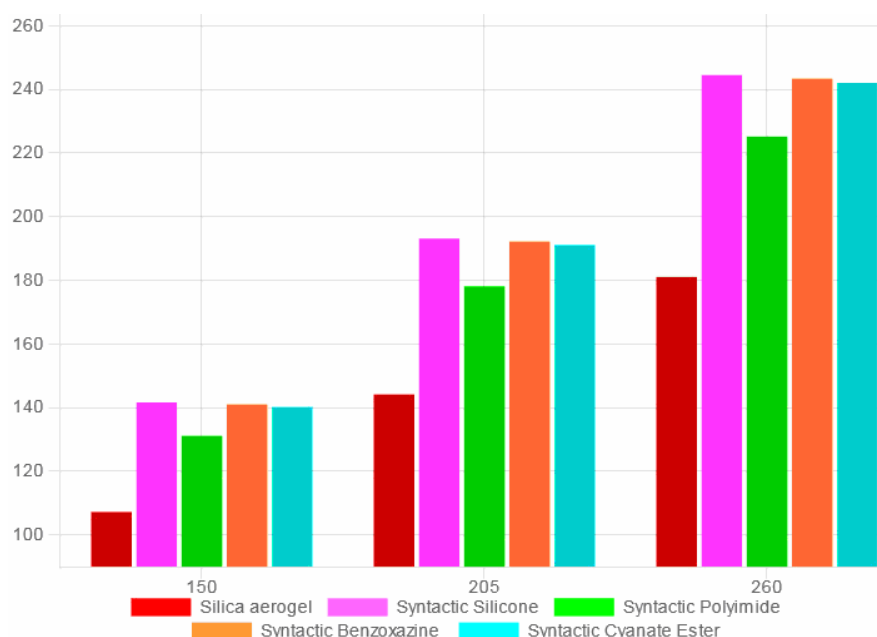


Рис. 10. Гистограмма температур поверхности пяти теплоизоляционных материалов для трех уровней температур в Гидравлическом канале (Mud Channel) при остановке насоса, °C

Обсуждение

Если сравнить пять рассмотренных материалов, то очевидно, что Silica Aerogel (кремнеземный аэрогель) является наилучшим вариантом для диапазона НРНТ-нс и Ultra-НРНТ. Но использовать аэрогелевый мат как единственную изоляцию рискованно. Вибрации при бурении в скважине слишком большие для его структуры – он выкрашивается.

Оптимальное решение – использовать гибридную схему:

- синтактическая пена – Polyimide, Cyanate Ester (полиимид или цианат-эфир) – как основной жесткий каркас, поглощающий удары и фиксирующий колбу;
- аэрогелевый мат – только как тонкая внутренняя прослойка.

Для условий Ultra-HPHT подойдут синтактические пены – Polyimide, Cyanate Ester и Benzoxazine (бензоксазиновая пена).

Для условий HPHT будут оптимальны Syntactic Silicone (синтактическая силиконовая пена) и Benzoxazine, как наиболее дешевые и удобные для установки. Если учитывать хрупкость синтактической бензоксазиновой пены, то лучше использовать комбинацию этих материалов – синтактический силикон хорошо гасит вибрации, но за счет полых стеклянных микросфер, удерживает воздух.

Влияние вибраций на Polyimide, Cyanate Ester проявляется в меньшей степени, но его тоже нужно принимать во внимание. Например, вибрации на частоте 80 Гц крайне опасны для бурильных колонн. Основная проблема заключается в том, что эта частота часто совпадает с собственной резонансной частотой элементов конструкции (особенно при глубоком бурении). Резонансные явления, при которых частоты колебаний перекрываются с собственными частотами, могут привести к неожиданному и неконтролируемому повреждению оборудования бурильной колонны, если не будет проведен тщательный и надежный анализ [24].

Скважины HPHT в Российской Федерации становятся востребованы в Прикаспийской нефтегазоносной провинции, Урало-Поволжском регионе, на Камчатке. Уже ведутся разработки систем раствора на водной основе для применения в условиях сверхвысоких температур и давлений. Например, горно-геологические условия на поисково-оценочной скважине №1 Крупской площади более сложные, чем на большинстве НТНР-скважин [25]. Температура на этой скважине достигала 214°C, поэтому ее относят к категории Ultra HPHT.

Кроме этого, с увеличением глубины бурения на уже разведанных месторождениях, будет наблюдаться рост температур – он неизбежен из-за геотермического градиента, составляющего в среднем около 25-30°C на каждый километр. Таким образом, в Российской Федерации направление развития скважин HPHT станет с каждым годом все более востребованным.

Поэтому опыт зарубежных компаний в геофизических исследованиях высокотемпературных скважин нужно перенимать российским производителям. В частности, в плане защиты электронных компонентов каротажных приборов. Ведь при температуре выше 150-175°C кремний начинает терять свои полупроводниковые свойства, превращаясь в проводник.

В проведенной работе показано запатентованное решение проблемы защиты стандартных электронных компонентов, которое используется ведущими зарубежными компаниями. И предложен способ интенсифицировать этот метод с помощью дополнительной теплоизоляции синтактическими пенами и кремнеземным аэрогелем, вакуумных колб Дьюара, увеличивая предельные температуры их эксплуатации.

Дальнейшие исследования можно провести с учетом передачи тепла излучением (степень черноты) от стенок внутри вакуумного зазора колбы Дьюара; оценить влияние материалов с фазовым переходом (PCM) на рассеивание тепла от электронной платы; смоделировать тепловой баланс с учетом всех факторов.

Список литературы / References

1. Marhoon T.M.M. High pressure High temperature (HPHT) wells technologies while drilling: Master thesis / Supervisor: Prof. Raffaele Romagnoli. – Politecnico di Torino, 2020. – 95 p. – URL: <https://webthesis.biblio.polito.it/15688>.
2. DeBruijn G., Skeates C., Greenaway R., Harrison D., Parris M., James S., Mueller F., Ray S., Riding M., Temple L., Wuthrich K. High-pressure, high-temperature technologies // Oilfield Review. 2008, vol. 20, iss. 3, pp. 46-60.
3. Shadravan A., Amani M. HPHT 101-What Petroleum Engineers and Geoscientists Should Know About High Pressure High Temperature Wells Environment // Energy Science and Technology. 2012, vol. 4, iss. 2, pp. 36-60. doi.org/10.3968/j.est.1923847920120402.635.
4. Odiete W.E. New wellbore temperature control design for preventing failure and poor performance of logging tools in high pressure – high temperature wells // Heliyon. 2022, vol. 8, iss. 5, p. 09404. doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09404.
5. Yao Z., Li H., Xu H., Yang H., Bi Q., Xu T. Hybrid active-passive thermal management system for deep wells: Long-term stability and multi-objective optimization // Results in Engineering. 2025, vol. 27, p. 105854. doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105854.

6. Martínez F. R., Borri E., Kala S. M., Ushak S., Cabeza L. F. Phase change materials for thermal energy storage in industrial applications // *Heliyon*. 2025, vol. 11, iss. 1, p. 41025. doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41025.
7. Patent 6,336,408 US. Cooling system for downhole tools / Robert A. Parrott, Haoshi Song, Kuo-Chiang Chen. – Appl. No. 09/240,955 from Jan. 29, 1999; publ. Jan. 8, 2002.
8. Patent 1 945 904 EP. Improved vacuum insulated dewar flask / Borislav J. Tchakarov, Paul G. Junghans. – Appl. No. 06836677.2 from 31.10.2006; publ. 10.05.2017, Bul. 2017/19f.
9. Landrock A.H. 5 – Miscellaneous and specialty foams: (Epoxy Foams, Polyester Foams, Silicone Foams, Urea-Formaldehyde Foams, Polybenzimidazole, Foams, Polyimide Foams, Polyphosphazene Foams, and Syntactic Foams) // *Handbook of Plastic Foams*. 1995, pp. 253-266. doi.org/10.1016/B978-081551357-5.50007-3.
10. Ferguson E., Oggioni F., Peppe D., Whiteside S., Fieldsend H., Tasdemir B. The influence of volume fraction on the compressive behaviour of a polymeric syntactic foam: From manufacturing to machine learning-based modeling // *Materials Today Communications*. 2026, vol. 50, p. 114339. doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.114339.
11. Patent 3,477,967 US. Syntactic foam / I. Resnick. – Appl. No. 538,920 from March 28, 1966; publ. Nov. 11, 1969.
12. Vedenin A.D., Vityaz' P.A., Galinovskii A.L., Ivanova I.S., Mazalov Yu.A., Pustovgar A.P., Sudnik L.V. Heat-insulating aerogel composites for a hydrothermal reactor // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2016, pp. 1283-1286. doi.org/10.1134/S0036029516130255.
13. Azar A. S., Fostervoll H., Perillo G., Tveito K. O. Aerogel: an alternative weld backing material // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015, vol. 81, pp. 585-595. doi.org/10.1007/s00170-015-7241-9.
14. Smirnova I., Gurikov P. Aerogel production: Current status, research directions, and future opportunities // *The Journal of Supercritical Fluids*. 2018, vol. 134, pp. 228-233. doi.org/10.1016/j.supflu.2017.12.037.
15. Collett T.S., Boswell R., Frye M., Shedd W., Godfriaux P., Dufrene R., McConnell D., Mrozewski S., Guerin G., Cook A., Jones E., Roy R. Gulf of Mexico Gas Hydrate Joint Industry Project Leg II: Logging-While-Drilling Operations and Challenges // *Offshore Technology Conference – OTC 20452*. 2010. doi.org/10.4043/20452-MS.
16. Dolson J. Drilling, Mud-Logging, Wireline Logs and Cores // *Understanding Oil and Gas Shows and Seals in the Search for Hydrocarbons*. Springer, Cham. 2016, pp. 91-143. doi.org/10.1007/978-3-319-29710-1_3.
17. Collett T. S., Boswell R., Cochran J. R., Kumar P., Lall M., Mazumdar A., Ramana M. V., Ramprasad T., Riedel M., Sain K., Sathe A. V., Vishwanath K. Geologic implications of gas hydrates in the offshore of India: Results of the National Gas Hydrate Program Expedition 01 // *Marine and Petroleum Geology*. 2014, vol. 58, no. 5, pp. 29-98. doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.07.031.
18. Rosland H. A., Effendy E. Park S.J. HPHT Well Basis of Design Case Study: Offshore Thailand Advanced Tubular Analyses Experience / European Association of Geoscientists & Engineers // *IPTC 2013: International Petroleum Technology Conference*. 2013. doi.org/10.2523/IPTC-17104-MS.
19. Nguyen S., De Pascalis R., Yousaf Z., Parnell W. J. All-polymer syntactic foams: Linking large strain cyclic experiments to Quasilinear Viscoelastic modelling for materials characterization // *Composites Part B: Engineering*. 2025, vol. 288, p. 111866. doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111866.
20. Tasdemir B., Tagarielli V. L., Pellegrino A. A data-driven rate and temperature dependent constitutive model of the compression response of a syntactic foam // *Materials Today Communications*. 2024, vol. 39, p. 108790. doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108790.
21. Chen Y., Quino G., Pellegrino A. A comprehensive investigation on the temperature and strain rate dependent mechanical response of three polymeric syntactic foams for thermoforming and energy absorption applications // *Polymer Testing*. 2024, vol. 130, p. 108287. doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108287.
22. Lamy-Mendes A., Santos P., Durães L. Aerogel Composites Produced from Silica and Recycled Rubber Sols for Thermal Insulation // *Materials*. 2022, vol. 15 (22), p. 7897. doi.org/10.3390/ma15227897.
23. Merillas B., Almeida C.M.R., Álvarez-Arenas T.E.G., Rodríguez-Pérez M.Á., Durães L. Enhanced thermal insulation performance of silica aerogel composites through infrared opacifier integration for high-temperature applications // *Composites Part C: Open Access*. 2025, vol. 16, p. 100573. doi.org/10.1016/j.jcomc.2025.100573.
24. Doghmane M.Z. Natural Frequency Analysis of a Stepped Drill String in Vertical Oil Wells Subjected to Coupled Axial–Torsional–Lateral Vibrations // *Energies*. 2025, vol. 18(13), p. 3492. doi.org/10.3390/en18133492.
25. Смирнов И.А., Попов С.В., Сапожников Д.А., Панков Д.В., Кулигин А.В., Чернов А.В. Опыт разработки системы раствора на водной основе для применения в условиях сверхвысоких температур и давлений // *Бурение и нефть*. – 2022. – №12. – С. 34-36.
25. Smirnov I.A., Popov S.V., Sapozhnikov D.A., Pankov D.V., Kuligin A.V., Chernov R.V. Experience in developing a water-based slurry system for applications under conditions of ultra-high temperatures and pressures // *Drilling & Oil*. 2022, no. 12, pp. 34-36.

Сведения об авторах:

Ромашин Роман Валерьевич – доцент кафедры технологии машиностроения
rvromashin@yandex.ru

Information about authors:

Romashin Roman Valerevich – associate professor of Department of engineering technology

Получена 24.03.2026