

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 622.276.5

**Акопов Сергей Аршавинович, Овчаров Сергей Николаевич,
Шелудько Геннадий Петрович, Акопов Арсен Сергеевич**

МОРОЗОСТОЙКОСТЬ РЕЗИНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПРОМЫСЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В статье рассмотрены вопросы эксплуатации промышленного оборудования при пониженных температурах (ниже -40°C). Показано, что такие условия эксплуатации могут вызывать значительное изменение физико-механических свойств резин и потерю их работоспособности. Сформулированы основные пути повышения морозостойкости резино-технических деталей, позволяющие повысить эксплуатационную надежность промышленного оборудования.

Ключевые слова: надежность и долговечность промышленного оборудования, условия пониженных температур, морозостойкость резинотехнических деталей.

**Akopov Sergey A., Ovcharov Sergey N., Sheludko Gennady P., Akopov Arsen S.
FROST RESISTANCE OF RUBBER-TECHNICAL DETAILS
OF THE TRADE EQUIPMENT**

In the article there are considered problems of field equipment exploitation of field equipment at low temperatures (below -40°C). It was shown that such conditions of exploitation could cause significant change of physico-mechanical properties of rubber details and loss of their efficiency. There are given the main ways for increase resistance of rubber details to low temperatures that permits raising damage-free operation of field equipment.

Key words: reliability and durability of production equipment, the conditions of the low temperatures, frost resistance of rubber parts.

Разработка и освоение газовых месторождений в условиях Крайнего Севера поставили проблему обеспечения повышенной надежности и долговечности промышленного оборудования в условиях пониженных температур ($-40^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$). Эффективность применения бурового оборудования, во многом, зависит от морозостойкости резинотехнических деталей (РТД), которые входят в его состав в качестве различных устройств: герметизирующих, уплотняющих, пакерующих, демпфирующих, дросселирующих и др.

При понижении температуры в условиях эксплуатации и хранения РТД происходит изменение эластических, релаксационных, деформационных свойств, что может привести к потере их работоспособности и аварийному выходу из строя. Способность РТД сохранять необходимый уровень технических свойств при низких температурах определяется морозостойкостью, которая оценивается предельными температурами, при которых теряются эластические свойства (температура стеклования – T_{cm}), или изменяется характер разрушения (температура хрупкости – T_{xp}), а также величиной потери свойства восстанавливать свои размеры после выдержки при низких температурах в деформированном состоянии, т. е. остаточной деформацией сжатия (ОДС) и коэффициентом морозостойкости резин при данной температуре [1, 2].

Температура стеклования (T_{cm}) – это температура, при которой резина приобретает свойства твердого тела в результате процесса стеклования. Морозостойкость резин при растяжении определяется по ГОСТ 7108-78.

Температура хрупкости (T_{xp}) – это минимальная температура, при которой консольно закрепленный образец не разрушается под действием ударной нагрузки (ГОСТ 7912-74). Резиновый образец, имеющий толщину, ширину, длину, соответственно, 2, 6, 25 мм, считается разрушенным при наличии одной или нескольких трещин, расщеплений, выкрашиваний.

T_{xp} снижается при уменьшении толщины образца. Предварительная деформация растяжения резин снижает, а сжатия повышает T_{xp} . Нанесение дефекта (надрыв, надрез) на образец повышает T_{xp} от 2–5 до 10–20 $^{\circ}\text{C}$ в зависимости от типа эластомера [2, 4, 5].

Учитывая, что на детали промышленного оборудования оказывают существенное влияние такие эксплуатационные факторы как: ударно-динамическое нагружение, повышенные давления, воздействие абразивной среды и др., следует ожидать повышения T_{cm} и T_{xp} на десятки градусов.

При понижении температуры происходит значительное изменение физико-механических, динамических, теплофизических свойств резины [1–3]. Так, замедление релаксационных процессов влечет за собой снижение эластичности, восстанавливаемости, контактного напряжения при сжатии, повышения жесткости и модуля механических потерь. При переходе резин из высокоэластического состояния в стеклообразное модули сжатия, растяжения, сдвига, кручения могут изменяться от 1–10 до 10^3 МПа, что соответствует модулю упругой деформации твердых тел. Так же изменяется коэффициент объемного расширения (β), который связан с изменением геометрически свободного объема (f_c^2) при T_{cm} эмпирическим соотношением:

$$T_{cm} \times \Delta\beta = f_c^2. \quad (1)$$

где T_{cm} – температура стеклования; $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$ – разность коэффициентов объемного расширения выше и ниже T_{cm} ; f_c^2 – геометрически свободный объем при T_{cm} .

Для большинства наполненных и не наполненных эластомеров f_c^2 равняется 0,13. Однако наблюдается тенденция к увеличению f_c^2 с повышением T_{cm} .

При эксплуатации РТД в условиях пониженных температур необходимо учитывать температуру структурного стеклования $T_{cmp.cm}$ (зависит от скорости изменения температуры) и механического стеклования $T_{mex.cm}$ (зависит от скорости внешнего воздействия). Температура структурного стеклования ($T_{cmp.cm}$) определяется по изменению термического расширения, теплоемкости и других физических характеристик резин в зависимости от температуры (при отсутствии динамических механических воздействий). Температура механического стеклования ($T_{mex.cm}$) определяется по изменению динамических, механических, электрических характеристик резин от температуры (температуры, соответствующей максимуму механических или электрических потерь). Значение $T_{mex.cm}$ возрастает при повышении скорости воздействия и всегда выше значения $T_{cmp.cm}$. Так, увеличение частоты нагружения с 0,01 до 8×10^6 Гц влечет за собой снижение $T_{mex.cm}$ для резин на основе натурального эластомера с -61°C до -2°C , при $T_{cmp.cm}$, равном -73°C [2, 4, 5].

В условиях эксплуатации промышленного оборудования необходимо учитывать влияние типа деформации и давления на морозостойкость РТД. Так, при растяжении наблюдается наименьшее снижение морозостойкости, при сжатии это снижение увеличивается, а при сдвиге становится наибольшим. Наиболее существенно морозостойкость зависит от величины деформации и в случае проявления малых деформаций коэффициент морозостойкости (K_M) в несколько раз ниже, чем при деформации 100 % [2, 4, 5].

Влияние давления на температуру стеклования РТД промышленного оборудования представляет собой линейную зависимость [1]:

$$dT_{cm} / dP = \text{const}. \quad (2)$$

При повышении P до значительных величин (48–60 МПа) резины на основе синтетических эластомеров уже при комнатной температуре могут перейти в стеклообразное состояние. В условиях эксплуатации под воздействием внешних факторов T_{cm} может повыситься на несколько градусов по сравнению с T_{cm} при статическом нагружении.

Повышение морозостойкости РТД промышленного оборудования при эксплуатации в условиях воздействия пониженных температурах является необходимым условием обеспечения работоспособности и зависит от типа эластомера и состава резин [1, 3].

В табл. 1 приведена морозостойкость резин на основе различных типов эластомеров.

Одним из способов повышения морозостойкости резин является применение пластификаторов при изготовлении резиновых смесей. Влияние пластификаторов на снижение T_{cm} , описывается выражением:

$$\Delta T_{cm} = K_1 \cdot V, \quad (3)$$

где $\Delta T_{cm} = T_{cm} - T_{n.cm}$ – изменения температуры стеклования ($T_{n.cm}$ – температура стеклования резины, содержащей пластификатор); K_1 – константа; V – объемная доля введенного пластификатора.

Эффективность действия пластификатора зависит от совместимости его с эластомером и обусловлена увеличением гибкости (подвижности) молекулярных цепей эластомера. Введение в резиновые смеси эфиров фталевой, себаценовой и адениновой кислот, хлорпарафинов повышает морозостойкость конечных вулканизатов. Значение T_{cm} резин снижается при добавлении пластификато-

ра с более низкой T_{cm} и возрастает при добавлении пластификатора с более высокой T_{cm} . Выбор типа и содержание пластификатора зависят от типа эластомера и условий эксплуатации [2, 4, 5].

Таблица 1

Тип эластомера	$T_{cm}, ^\circ\text{C}$	$T_{xp}, ^\circ\text{C}$
Синтетический каучук дивиниловый (СКД)	– 70	– 70
Натуральный каучук (НК)	– 62	– 59
Бутадиенстирольный каучук (БСК)	– 51	– 58
Бутилкаучук (БК)	– 61	– 46
Бутадиеннитрильный каучук (СКН)		
СКН – 18	– 51	– 58
СКН – 28	– 41	– 48
СКН – 40	– 25	– 28
Хлорбутил каучук (ХБК)	– 56	– 45
Фторкаучук (ФК)	– 24	– 36

Наполнители незначительно влияют на T_{cm} , однако их введение расширяет область T_{cm} , при этом они могут оказывать значительное влияние на T_{xp} . Активные наполнители ускоряют, а неактивные – снижают скорость кристаллизации резин с понижением температуры, что необходимо учитывать при высокой степени деформации. Следует отметить, что параметры технологического процесса изготовления резиновых смесей влияют на свойства, процесс кристаллизации и T_{cm} резин.

Состав вулканизирующей группы мало влияет на морозостойкость резин. Резины, содержащие полисульфидные поперечные связи, имеют повышенную морозостойкость по сравнению с вулканизатами, содержащими углерод-углеродные ($-\text{C}-\text{C}-$) пространственные связи.

Многие РТД промышленного оборудования изготавливаются на основе бутадиен-нитрильных эластомеров (СКН), которые обеспечивают стойкость к воздействию органических сред в зависимости от содержания акрилонитрила. Также морозостойкость вышеуказанных резин зависит от содержания полярных групп (табл. 2).

Таблица 2

Тип эластомера	$T_{cm}, ^\circ\text{C}$	$T_{xp}, ^\circ\text{C}$	K_m	
			$-15 ^\circ\text{C}$	$-25 ^\circ\text{C}$
СКН-18	–51–56	– 58–60	0,55–0,65	0,35–0,45
СКН-28	–40–42	–48–50	0,35–0,45	0,15–0,25
СКН-40	–25–27	–28–30	0,08–0,1	0,02–0,05
СКН-50	– 7–10	-	-	-

Примечание: K_m – коэффициент морозостойкости

Эффективным направлением повышения морозостойкости резин является изготовление их на основе полимерных смесей из синтетических эластомеров, имеющих различную T_{cm} . При этом, если два эластомера термодинамически совместимы, то их смесь имеет T_{cm} , находящуюся в диапазоне T_{cm} компонентов. Для эластомеров такими полимерными системами являются бутадиен-стирольные каучуки с различным содержанием стирольных групп (БСК-10, БСК-30, БСК-50), бутадиен-нитрильные каучуки с различным содержанием акрилонитрила (СКН-18, СКН-26, СКН-40). Для таких резин T_{cm} определяется соотношением [1]:

$$T_{cm} = C_1 \cdot T_{1cm} + C_2 \cdot T_{2cm}, \quad (4)$$

где C_1, C_2 – концентрации эластомеров в резиновых смесях; T_{1cm}, T_{2cm} – температуры стеклования эластомеров.

Изменение T_{cm} соответствует линейному изменению от T_{1cm} до T_{2cm} . Морозостойкость резин из несовместимых эластомеров также характеризуется некоторой промежуточной температурой. T_{cm} линейно изменяется в зависимости от содержания одного из эластомеров, подобно T_{cm} совместимых каучуков.

Для эластомеров регулярной структуры (НК, СКН-3, СКД, ХК, БК) изменение свойств при пониженных температурах связано еще с одним физическим процессом – кристаллизацией, т. е. образованием кристаллической фазы в резинах при охлаждении. В отличие от стеклования, процесс кристаллизации происходит во времени. При кристаллизации ухудшаются эластические свойства,

снижается восстанавливаемость при деформации, повышается модуль твердости, изменяются такие физические свойства как теплопроводность, теплоемкость, оптические и диэлектрические свойства.

Кристаллизация эластомеров характеризуется температурой верхней (T_g) и нижней (T_n) границ интервала максимальной скоростью кристаллизации (T_{max}), равновесной температурой плавления кристаллов ($T_{пл}$) и полупериодом кристаллизации ($\tau_{1/2}$) – временем, за которое изменение свойств, вызванное кристаллизацией, составляет 50 % от исходного значения.

Эластомеры, имеющие нерегулярную структуру (БСК, СКН), вообще не кристаллизуются и образующиеся в них предфазовые флуктуации не достигают кристаллических размеров. Введение наполнителей в эластомеры до 60 массовых частей незначительно влияет на кристаллизацию резин. Влияние пластификаторов на кристаллизацию определяется их природой. Пластификаторы сложнотерпенового типа не препятствуют кристаллизации эластомеров, эфиры фталевой кислоты (дибутилфталат, диоктилфталат) замедляют кристаллизацию (табл. 3).

Таблица 3

Тип эластомера	T_{max} , °C	T_g , °C	T_n , °C	$T_{пл}$, °C	$\tau_{1/2}$, мин
НК	– 25	– 5	– 40	40	$1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^5$
СКН-3	– 25	– 5	– 40	40	$1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^5$
СКД	– 55	– 20	– 80	4	$1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^3$
ХК, БК	– 10	– 10	– 30	80	$1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^4$
Полиуретаны	До 5	– 50	– 40	70	$1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^4$

T_{cm} линейно изменяется в зависимости от содержания пластификатора, однако, чем сильнее пластификатор снижает T_{cm} , тем меньше он замедляет кристаллизацию.

Изготовление резиновых смесей на основе комбинации эластомеров (аморфных и кристаллических) позволяет направленно и эффективно регулировать процесс кристаллизации и стеклования. Высококачественное изготовление резиновых смесей и образование пространственной сетки в процессе вулканизации, препятствует расслоению их при охлаждении, изменяется характер плавления, кристаллизации и стеклования, в результате чего могут уменьшаться размеры кристаллов, образующихся в таких системах, по сравнению с единичными кристаллизующимися эластомерами [1]. Если морозостойкость резин при отсутствии кристаллизации можно характеризовать одной температурой T_{cm} , до которой сохраняется необходимый уровень свойств, то основной характеристикой в условиях кристаллизации РТД является время сохранения этого заданного уровня свойств при определенной температуре. Морозостойкость резин на основе кристаллизующихся каучуков полностью определяется процессом кристаллизации.

Таким образом, учитывая, что эксплуатационные факторы (высокое давление, трибодеструкция при динамическом нагружении, воздействие среды и др.) могут повысить температурный интервал работы РТД промышленного оборудования, следует обеспечить резерв на их надежную работоспособность при пониженных температурах (до –50 °C).

Решение проблемы повышения морозостойкости РТД промышленного оборудования предлагается провести по следующим направлениям:

совмещение синтетических эластомеров при высокотемпературном смешении в резиносмесителях высокого давления. При этом изготовление полимерных смесей следует проводить на базе аморфных эластомеров, морозостойкость резин которых определяется только процессом стеклования, а кристаллизация при хранении и эксплуатации не реализуется;

– изготовление полимерных смесей на основе аморфных каучуков с добавками кристаллизующихся эластомеров (СКД, СКН – 3, ХБК, БЭФ – 10), имеющих более низкую температуру стеклования (– 70 ~ – 108 °C). При высокой степени диспергирования эластомеров в полимерных смесях синтез резин с взаимопроникающими сетками существенно снижает процесс их кристаллизации и вулканизаты можно считать не кристаллизующимися;

– модификация резин на основе бутадиен – нитрильных эластомеров кремнийорганическими соединениями и их производными. Эффективность применения кремнийорганических олигомеров в качестве пластификаторов обеспечивается благодаря специфике их структуры и уникальным физическим свойствам. Для кремнийорганических олигомеров характерны: высокая термостойкость, морозостойкость, гидрофобность, физическая и химическая инертность, низкий коэффициент вязкости. В полиметилсилоксанах даже при температуре –136 °C отмечается сегментальная подвижность [5]. Введение кремнийорганических олигомеров в резиновые смеси на основе бутадиен –

нитрильных эластомеров [5, 6] в количестве 0,1+1,0 массовых частей повышает весь комплекс технических свойств резин.

Литература

1. Бухина М. Ф. Техническая физика эластомеров. М.: Химия, 1984.
2. Зуев Ю. С., Дегтева Т. Г. Свойства эластомеров в эксплуатационных условиях. М.: Химия, 1986.
3. Федюкин Д. Л., Махлис Ф. А. Технические и технологические свойства резин. М.: Химия, 1985.
4. Зуев Ю. С. Разрушение эластомеров в условиях, характерных для эксплуатации. М.: Химия, 1980.
5. О морозостойкости резино-технических деталей промышленного оборудования: сб. научных трудов СевКавНИПИгаза / С. А. Акопов, Г. П. Шелудько, Р. В. Карапетов, А. С. Акопов. Ставрополь, 2002. Вып. 37.
6. Шелудько Г. П. Исследование влияния активных добавок на тепло-износостойкость эластомеров различной структуры: дис. ... канд. техн. наук. Днепропетровский химико-технологический институт им. Дзержинского, 1977.

УДК 622.244:532.54

**Афонин Леонид Алексеевич, Коршунова Любовь Григорьевна,
Круталевиц Александр Александрович, Турская Ольга Юрьевна,
Хандзель Александр Владиславович**

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В статье рассматривается основанное на применении компьютерной модели решение задачи выбора конструкции горизонтальной скважины (ГС) без фонтанных труб, обеспечивающей оптимальный режим эксплуатации с учетом изменения давления в стволе ГС, наличия искривленного и наклонного участков. В результате рассчитывается диаграмма режимов $P_y(Q)$ при допустимых забойных давлениях, длинах, диаметрах горизонтального ствола, обеспечивающих вынос твердых частиц из скважины.

Ключевые слова: горизонтальная скважина, производительность, забойное давление, режим эксплуатации, конструкция

**Afonin Leonid A., Korshunova Lyubov G., Krutalevich Aleksandr A.,
Turskaya Olga Y., Handzel Aleksandr V.**

SELECTING OPTIMAL DESIGN OF A HORIZONTAL WELL BY NUMERICAL MODELING

Computer aided design of a horizontal well without flush tubes providing optimal operating conditions with regard to varying pressure along horizontal well length, to the presence of deviated and slant segments is considered. As a result a well-head pressure – flow rate plot is computed. Allowable values of bottom-hole pressure, of horizontal segment lengths and diameters that ensure transport of solid particles are taken into account when building well-head pressure – flow rate plot.

Key words: horizontal well, flow rate, bottom-hole pressure, operating conditions, design

Математическая модель. Общая схема конструкции скважины представлена на рис. 1.

Математическая модель притока газа и движения в стволе ГС описывается системой дифференциальных уравнений согласно работе [1]:

$$\frac{dQ}{dl} = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4b(P_k^2 - P)}}{2b}; \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dl} = \left(\lambda \frac{Q}{D} + 2 \frac{dQ}{dl} \right) \cdot \frac{\alpha Q P}{2\alpha Q^2 - P^2}, \quad (2)$$

где

$$\alpha = \frac{8\rho_{cm} P_{am} ZT}{\pi^2 D^4 T_{cm}};$$