

*Дахно А.В., директор,
Смирнов Ю.П., кандидат технических наук,
заместитель директора по науке и новой технике,
Волжский научно-технический комплекс (филиал)
Волгоградского государственного технического университета,
Машков А.В., кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, профессор,
Московский энергетический институт (филиал)
Национального исследовательского института «МЭИ»,
Потапенко О.В., директор,
ООО «Завод Холодильного Машиностроения»*

К ОЦЕНКЕ ВЕЛИЧИНЫ ДИФФУЗИОННЫХ ПОТЕРЬ ХЛАДАГЕНТА ЧЕРЕЗ РЕЗИНОВУЮ КАМЕРУ – ОБОЛОЧКУ

Аннотация: в статье выполнен расчет времени технологически допустимого объема потерь хладагента за счет диффузионной проницаемости через стенки камер патрубков холодильных машин с заданными техническими характеристиками. Гарантированный ресурс работы патрубков составил 14,1 и 7,4 года соответственно для одной и второй машин. Проведены экспериментальные исследования влияния типа и состава наполнителей на диффузионную проницаемость резин: 61-202 на основе хлоропрена S-40 и РК-1802 на основе гидрированного каучука ZETPOL-2000, при приемлемых технологических показателях переработки и изготовления резиновых камер. Экспериментально выбрана оптимальная доля наполнения резиновой смеси – 20 % от массовых частей молотой слюдой. Для обеспечения длительной стойкости резины к воздействию хладагента в качестве базового рекомендовано использовать каучук марки ZETPOL-2000 гидрированный.

Ключевые слова: резиновая камера, хладагент, диффузионная проницаемость, коэффициент диффузии, наполнитель

В специальных типах холодильных машин используют резиноармированные патрубки с концевыми стальными ниппелями. Помимо силовых армирующих элементов в конструкцию патрубка входит внутренняя цилиндрическая резиновая камера (трубка) для герметизации хладагента (далее – диффузанта) – фреона R134a [1].

Целями настоящей работы являются:

1) расчетная оценка гарантийного срока работы резиновых камер холодильных машин рассматриваемого типа, по истечении которого, достигается технологически допустимый объем потерь хладагента за счет диффузии через стенку герметизирующей резиновой камеры (далее – камера);

2) расчетная оценка влияния толщины стенок резиновых камер на величину потерь диффузанта на основе известных решений нестационарного уравнения диффузии [2] в рамках феноменологической теории Фика [3, 4] при граничных условиях первого рода, с использованием экспериментально найденных значений коэффициента диффузии для используемых резин (прибор для измерения газопроницаемости VAC-VI). Авторы отмечают, что необходимость экспериментального определения коэффициента диффузии фреона R134a не является самостоятельной отдельной целью данной работы и продиктована отсутствием достоверных справочных данных (в то же время, например, имеются данные по коэффициентам

тепло- и температуропроводности материалов в теории теплопроводности [5] – математическом аналоге теории диффузии) и подтвержденных практикой методик по расчету значений коэффициентов диффузии для наполненных резин (на основе различных типов каучуков), с использованием диффузионных свойств каучуков и наполнителей и количественного состава;

3) экспериментальная оценка влияния состава резин на диффузионную проницаемость путем экспериментального подбора рецепта смеси с использованием различных типов каучуков для изготовления камер и с использованием специальных наполнителей, снижающих диффузионную проницаемость [3, 4];

4) разработка технических решений по снижению величины потерь диффузанта.

Одним из слабых мест работы конструкции патрубка является граница резиновой камеры и стального концевого ниппеля. Отсутствие необходимой степени герметичности (плотности) по границе резина – металл приводит к интенсивной протечке хладагента и вызывает потерю работоспособности всей конструкции узла. Обеспечение герметичности (плотности) по границе резина металл достигается обеспечением должной степени адгезии резины к металлу, а также использованием специального устройства, обжимающего резину вокруг стального ниппеля. То есть, адгезия

должна рассматриваться как один из факторов, обеспечивающих работоспособность конструкции узла.

Целевой функцией рассматриваемой задачи является минимизация диффузионного потока через стенку камеры и границу контакта резиновой оболочки со стальным ниппелем за счет снижения коэффициента диффузии, оптимального выбора толщины оболочки и обеспечения должной адгезии резины и металла ниппеля, исключающей протекание хладагента, при следующих ограничительных условиях:

1) обеспечение химической стойкости резины камеры к воздействию хладагента за счет выбора используемых каучуков и наполнителей;

2) обеспечение технологичности переработки резиновой смеси по пластичности и клейкости при изготовлении камер;

3) выбор рецептуры резиновой смеси и разработка технологии крепления резины к стальному ниппелю, обеспечивающих долговременную герметизацию камеры по месту присоединения к ниппелю.

Следует отметить, что перечисленные условия в отдельных комбинациях имеют разнонаправленный характер влияния. Поэтому комплексное выполнение условий представляет собой задачу оптимизации, которая решается методом экспериментальной проверки.

На основе опыта эксплуатации действующих холодильных установок рассматриваемого специального типа и резиновых камер к основным характеристикам работы рассматриваемых конструкций относятся: изотермический характер диффузионного процесса, отсутствие фазовых переходов, низкая скорость процесса диффузии, отсутствие химического взаимодействия диффузанта и резины. Рассматриваемый процесс можно характеризовать как диффузию низкомолекулярного вещества – фреона в высокомолекулярном соединении – резине.

Основные современные подходы к описанию широкого класса процессов диффузии газов в полимерных системах рассмотрены (систематизированы) в работах [3, 4]. В работе [6] рассмотрена подробная классификация методов исследования процессов проницаемости, приведены основные математические подходы и методы решения как линейных, так и нелинейных (в случаях зависимости коэффициентов диффузии от давления, температуры, наличия химического взаимодействия) задач диффузии, рассматриваемых как один из специфических разделов математической физики [2]. При классификации [6] основных способов описания процессов диффузии условно могут быть выделены следующие три.

1. Термодинамическое описание, с использованием уравнения неразрывности потока массы, первого и второго законов Фика. При таком подходе решение задачи диффузии сводится к решению нестационарного уравнения диффузии в частных производных параболического типа или гиперболического типа (для быстротекущих процессов горения или взрыва), для функции концентрации диффузанта, при соответствующих начальных и граничных условиях.

2. Статистическое описание с использованием вероятностных характеристик положения частиц диффузанта в данной точке пространства в данный момент времени с использованием уравнения Фоккера-Планка [6].

3. Микроскопический подход, основанный на описании вероятностных свойств движения отдельной частицы диффузанта.

Многие из рассмотренных в работах [3, 4, 6] математических моделей достаточно сложны, требуют экспериментального определения целого ряда коэффициентов и параметров для каждого рассматриваемого полимера и типа диффузанта. По этой причине их использование в инженерной расчетной практике проблематично. В работе [7] проведен подробный анализ известных экспериментальных методов и данных по определению коэффициентов диффузии и проницаемости газов в полимерах и приведен ряд эмпирических формул для расчета значений коэффициентов диффузии и проницаемости. Наряду с прочими методами в [7] приведен и метод определения коэффициентов диффузии, положенный в основу работы прибора для измерения газопроницаемости VAC-V1 с использованием образцов резины в форме пластинок толщиной 1 мм, согласно паспорту прибора.

Исходя из основных перечисленных характеристик условий работы, рассматриваемых специальных конструкций холодильного оборудования и резиновых камер, в настоящей работе в качестве приближенной модели процесса диффузии фреона в резиновой камере, принимается феноменологическая теория, основанная на первом и втором законах Фика [3, 4], в форме нестационарного дифференциального уравнения второго порядка в частных производных относительно функции кон-

центрации диффузанта $C \left(\frac{кг}{м^3} \right)$. При этом пред-

полагается, что для материала резиновой камеры, коэффициент диффузии D есть постоянная величина и, что термо- и бародиффузионными потоками можно пренебречь в сравнении с потоком массы диффузанта за счет наличия градиента концентрации. Следует отметить, что исходя из математической аналогии нестационарных уравнений

теплопроводности и диффузии (в рамках феноменологического подхода и использовании первого и второго законов Фика) многие решения уравнений диффузии тождественны по виду с решениями уравнения теплопроводности [8] при соответствующих начальных и граничных условиях первого, второго или третьего рода.

В настоящей работе расчет потерь диффузанта через стенку резиновой камеры цилиндрической формы проводится на основе решения нестационарного уравнения диффузии Фика в цилиндрической системе координат [5] в рядах Фурье по ортогональной системе функций Бесселя первого рода нулевого индекса. Также на основе полученного решения проведен анализ влияния толщины стенки камеры на объем потерь фреона и оценка значений времени достижения предельно допустимых потерь. В расчетах используется экспериментально найденное значение коэффициента диффузии D .

Резиновая камера рассматривается как полая осесимметричная цилиндрическая оболочка, с внутренним радиусом R_0 , внешним радиусом R и длиной $L \gg R$. Толщина стенки камеры принимается постоянной, что обеспечивается технологией изготовления. При расчете используется цилиндрическая система координат (r, θ, z) , ось Oz которой совпадает с осью симметрии оболочки, а начало координат – с центром тяжести, то есть $R_0 \leq r \leq R$; $0 \leq \theta \leq 2\pi$; $-L \leq z \leq L$.

Так как материал оболочки предполагается изотропным по свойству проницаемости, а длина оболочек значительно превышает внешний диаметр, то функцию концентрации можно принять не зависящей от полярного угла θ и осевой координаты z . При принятых предположениях, функцию концентрации C можно считать функцией радиальной координаты r и времени t : $C = C(r, t)$. Уравнение Фика для функции концентрации $C = C(r, t)$ в цилиндрической системе координат имеет вид [2]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right). \quad (1)$$

Исходя из характера работы установки, принимаются следующие начальные и граничные условия для функции концентрации $C = C(r, t)$:

- в начальный момент времени $t = 0$ концентрация газа в стенке камеры отсутствует:

$$C(r, 0) = 0; \quad (2)$$

- на внутренней границе камеры $r = R_0$ в течение всего времени поддерживается постоянная концентрация газа равная C_0 :

$$C(R_0, t) = C_0; \quad (3)$$

- на внешней границе камеры $r = R$ в течение всего времени концентрация принимается равной нулю:

$$C(R, t) = 0. \quad (4)$$

Физически условие (4) означает, что диффузانت рассеивается в достаточно большом пространстве вне резиновой камеры.

Используя известное решение нестационарного уравнения диффузии в рядах Фурье по функциям Бесселя первого рода нулевого индекса [6, 8], можно найти величину потерь диффузанта Q через стенку камеры длиной L в виде:

$$Q = 2\pi \cdot L \cdot \left[\frac{DC_0}{\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)} \cdot t + 2C_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{k_n^2} Z_n (1 - \exp(-Dk_n^2 \cdot t)) \right], \quad (5)$$

где:

$$Z_n = \frac{J_0(k_n R_0) \cdot J_0(k_n R)}{J_0^2(k_n R_0) - J_0^2(k_n R)}; \quad (6)$$

$J_0(x)$ – функция Бесселя первого рода нулевого индекса [9], k_n – собственные числа рассматриваемой краевой задачи [6, 8], представляющие собой корни характеристического уравнения краевой задачи. Вводя обозначения: $\mu_n = k_n \cdot R_0$;

$m = \frac{R}{R_0}$, можно записать характеристическое

уравнение рассматриваемой краевой задачи в удобном для использования безразмерном виде:

$$J_0(m\mu) \cdot N_0(\mu) - J_0(\mu) \cdot N_0(m\mu) = 0, \quad (7)$$

где $N_0(x)$ – функция Неймана первого рода нулевого индекса [9]. Из уравнения (7) следует, что значения собственных чисел определяются только относительной толщиной стенки камеры

$\varepsilon = \frac{R - R_0}{R_0} = m - 1$. То есть при одной и той же

относительной толщине стенки камеры значения первых собственных чисел равны для всех типоразмеров.

При исследовании влияния толщины стенки камер на объем потерь диффузанта Q значения внутреннего радиуса поверхности камер R_0 для каждого типоразмера принимались постоянными и равными исходным заданным значениям. Величина внешнего радиуса поверхности камер R варьировалось с шагом 0,001 м для каждого типоразме-

ра таким образом, чтобы толщина стенок камер изменялась от 0,005 м до 0,01 м и конструктивно заданная толщина камер всех типоразмеров $h = R - R_0 = 0,007$ м попадала в интервал варьирования.

Из теории функций Бесселя [9] известно, что:

- корни характеристического уравнения (7) образуют возрастающую последовательность $k_1 < k_2 < k_3 < \dots$;

- все корни функций $J_0(x)$ и $N_0(x)$ изолированные и не совпадающие между собой. Из анализа уравнения (7) с использованием названных свойств функций Бесселя, можно показать, что при $R \rightarrow R_0$ (то есть с уменьшением толщины стенки камер $h = R - R_0$) значения первых корней

k_1 возрастают с порядком роста $O\left(\frac{1}{h}\right)$ ($R > R_0$).

В настоящей работе рассмотрен расчет потерь диффузанта для четырех типоразмеров резиновых камер с внутренним радиусом $R_0 = 0,025$ м, $R_0 =$

0,0325 м, $R_0 = 0,04$ м и $R_0 = 0,0625$ м и одной величиной толщины стенки 0,007 м.

Для рассматриваемых типоразмеров камер отношения $m = \frac{R}{R_0}$ соответственно равны 1,28;

1,25; 1,175; 1,112. При конструктивно заданной по условиям задачи толщине стенки камер $h = 0,007$ м, значение первого корня характеристического уравнения для всех типоразмеров равно

$k_1 = 448,4 \left(\frac{1}{m}\right)$. Так как значения величин

$\mu_1 = k_1 \cdot R_0 > 10$ для всех рассматриваемых типоразмеров, то при численном решении характеристического уравнения (7) использовались асимптотические представления функций $J_0(x)$ и $N_0(x)$ [9, 10]. Типичный характер зависимости значения первого корня k_1 от толщины стенки камеры, для типоразмера: $R_0 = 0,0625$ м и $R = 0,0695$ м, приведен на рис. 1.

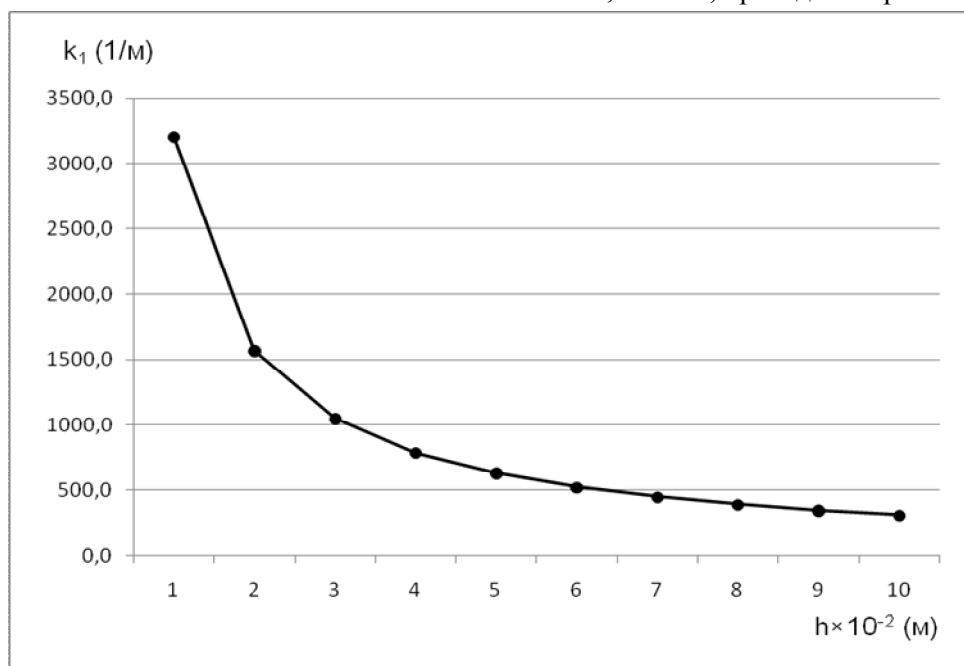


Рис. 1. Зависимость значений первого корня характеристического уравнения k_1 от толщины стенки, в пределах от $h = 0,001$ м до $h = 0,01$ м с шагом 0,001 м.

В формуле для величины потерь диффузанта Q через стенку камеры (5) первое слагаемое представляет собой объем потерь в установившемся режиме для больших значений времени, второе слагаемое описывает объем потерь на начальном этапе процесса при малых значениях времени.

Так как для малых толщин стенки камер первый корень характеристического уравнения имеет

большое значение $k_1 = 448,4 \left(\frac{1}{m}\right)$, то, например,

при $D = 1 \cdot 10^{-12} \frac{M^2}{c}$ величина первого члена ряда

$\left(\frac{1}{k_1^2} \cdot Z_n \cdot e^{-D \cdot k_1^2 t}\right) < 0,001$ уже при $t > 172800$ секунд

(двое суток). Отсюда можно сделать вывод, что

для малых толщин стенок камеры в формуле (5) для определения потока диффузанта суммой ряда в правой части можно пренебречь, начиная с первого слагаемого, в сравнении с величиной стационарного потока – первое слагаемое в правой части формулы (5). Используя одно из приведенных в работе [6] соотношений, полученное при решении уравнения Фика для цилиндрического капилляра, можно найти время запаздывания τ . Для рассматриваемого в качестве примера типоразмера полого цилиндра: $R_0 = 0,0625$ м, $R = 0,0695$ м и значении коэффициента диффузии $D = 1 \cdot 10^{-12} \frac{м^2}{с}$, расчетное время запаздывания равно $\tau = 8,2 \cdot 10^6$ с, что соответствует 3 месяцам.

При значительной величине толщины стенки $h = (R - R_0) > 0,025$ м и $m = \frac{R}{R_0} \geq 2$ (что соответствует значению первого характеристического числа $43 \leq k_1 \leq 48$ [8]) при значениях времени $t \leq 1,55 \cdot 10^7$ динамическая составляющая потока диффузанта, представленная в формуле (5) первым членом ряда, соизмерима с величиной стационарного потока и должна учитываться в расчетах. Так как настоящий расчет проводится при малых значениях толщины стенки, значения коэффициента диффузии $D = 1 \cdot 10^{-12} - 6 \cdot 10^{-12} \frac{м^2}{с}$ и больших значениях времени работы камер порядка 10-12 лет, то объем потерь диффузанта определялся по стационарной составляющей в формуле (4):

$$Q = 2\pi \cdot C_0 L \cdot \frac{D}{\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)} \cdot t. \quad (8)$$

Одной из основных проблем расчета диффузионных потерь фреона через поверхность оболочек является определение значений коэффициента диффузии для используемых резин. На основе анализа многочисленных источников установлено [2] влияние различных наполнителей, вводимых в рецептуру резин, на величину коэффициента диффузии. Эффективность действия наполнителей определяется их природой и соотношением массовых частей (количеством). При этом более эффективными наполнителями, по сравнению с техническими углеродами, каолином, оксидом кремния и тальком являются чешуйчатый графит, томфлон, алюминиевая пудра и молотая слюда.

В процессе экспериментов по исследованию резин, наполненных чешуйчатым графитом, томфлоном, алюминиевой пудрой и молотой слюдой, снижающими коэффициенты проницаемости и диффузии фреона, выявилось ухудшение технологичности переработки резиновых смесей при введении в резины более 20 % массовых частей наполнителей. Отмечены повышенная жесткость смесей, сильный разогрев при каландровании и снижение клейкости, что вызывало затруднения изготовления камеры патрубка при опрессовке её на хвостовиках стальных nipples. Именно надежность адгезионной прочности крепления резиновой камеры к стальному nipple и монолитность стенки камеры способствует сохранению герметичности узла и длительности эксплуатации патрубка.

Поэтому для определения влияния наполнителей на прочность крепления резин к стали были проведены исследования по ГОСТ 209-75 на стандартных образцах из стали 20 и резин с различной долей наполнителей в их составе. Результаты представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Резина шифр лабораторный 61-202 на основе хлоропрена S-40

Наименование показателей	Резина без наполнителей, указанных в таблице	Наполнитель в % на 100 % массовых частей резины базовой											
		Томфлон			Графит чешуйчатый			Алюминиевая пудра			Слюда молотая		
		10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
Условная прочность при растяжении, МПа	12,4	10,9	10,3	9,3	10,2	9,7	9,6	10,6	11,0	10,5	11,3	11,6	11,1
Прочность связи с металлом при отрыве, МПа	6,8	6,0	6,5	5,5	7,5	7,8	8,0	6,5	6,2	6,9	6,0	5,8	6,0

Таблица 2

Резина шифр лабораторный РК-1802 на основе гидрированного каучука ZETPOL-2000

Наименование показателей	Резина без наполнителей, указанных в таблице	Наполнитель в % на 100 % массовых частей резины базовой											
		Томфлон			Графит чешуйчатый			Алюминиевая пудра			Слюда молотая		
	базовая	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
Условная прочность при растяжении, МПа	15,7	14,2	13,9	11,8	14,8	15,2	13,6	17,3	15,5	15,1	15,4	17,0	14,5
Прочность связи с металлом при отрыве, МПа	7,5	6,7	6,8	6,8	8,1	8,5	8,4	6,9	7,8	7,5	7,0	8,2	8,0

Из приведенных в таблицах 1 и 2 данных следует, что введение в резины графита чешуйчатого, алюминиевой пудры и молотой слюды практически не снижает адгезионной прочности крепления к стали, условная прочность при растяжении резины 61-202 с указанными наполнителями и, в том числе томфлоном, незначительно снижается. Обращает на себя внимание сохранение высоких показателей прочности крепления резины РК-1802 с 20 % наполнением молотой слюдой, где её значения достигают 8,2 МПа. Установлено, что введение графита чешуйчатого массой 20 и 30 % в резины 61-202 и РК-1802 повышает твердость резин на 7-9 усл. ед. Шор А. При наполнении базовой резины 61-202 на основе хлоропрена S-40 томфлоном 20 % массовых частей время подвулканизации при 120 °С составило 10÷12 мин., что гарантирует успешную дальнейшую её переработку. Резина РК-1802 на основе гидрированного каучука ZETPOL-2000 с указанными в таблице 2 наполнителями имеет время подвулканизации при 120 °С не менее 20 минут при высокой когезионной прочности резиновых смесей, что позволяет ее каландровать с высоким качеством с требуемыми малыми по толщине калибрами полотна для изготовления камеры.

Дальнейшие исследования резин на газопроницаемость и определение коэффициента диффузии проводили для резины на основе каучука марки ZETPOL-2000 гидрированный при наполнении слюдой 20 % массовых частей, а также для резины на основе хлоропрена S-40 при наполнении томфлоном 20 % массовых частей. При этом следует отметить, что агрессивостойкость данных резин в среде фреона в контейнере замкнутого объема при заданной рабочей температуре 60 °С в течение 12 и 24 суток практически не снижается, то есть коэффициенты изменения показателей прочности при разрыве, относительного удлинения и твердо-

сти на стандартных образцах находились после испытаний в пределах $\pm 2 \div 3$ %. Причем при загрузке контейнера при 20 °С начальная концентрация сухого насыщенного пара хладагента составляет 7,96 кг/м³ [11].

Минимизация объема утечек хладагента через стенки резиновых камер патрубков в течение длительного времени при заданной геометрии резиновых камер может быть достигнута путем снижения величины коэффициента диффузии D .

По известным литературным данным [1, 2, 5] значения коэффициента диффузии для наполненных полимеров колеблется в пределах

$$1 \cdot 10^{-11} \div 3 \cdot 10^{-12} \frac{M^2}{c}$$

и зависят как от состава резины, так и от вида диффундирующего газа. Экспериментальные измерения коэффициента диффузии проводились на резиновых образцах с использованием прибора для измерения газопроницаемости VAC-V1, позволяющего получать коэффициенты диффузии, растворимости и проницаемости на базе программного обеспечения для проведения расчетов. Прибор соответствует требованиям стандартов ISO 2556, ASTM В 1434, ГОСТ 23553 с диапазоном измерений

$1 \cdot 10^{-9} \div 1 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3 / \text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot 0,1 \text{ МПа}$ и разрешающей способностью при измерении вакуума 0,1 Па. Порядок величин коэффициента газопроницаемости – Е-11. Размер испытуемого образца: диаметр 97 мм, рабочая площадь 38,48 см², толщина $1,0^{+0,1}$ мм.

Экспериментальные показатели коэффициентов диффузии базовых резин 61-202 и РК-1802 и данных резин с наполнителями соответственно томфлоном и молотой слюдой представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Экспериментальные показатели коэффициентов диффузии базовых резин 61-202 и РК-1802
и данных резин с наполнителями**

Резина без наполнителей (базовая), шифр лабораторный	Коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с} \times 10^{-11}$	Резина шифр лабораторный (базовая) + наполнитель	Наполнитель в % на 100 % масс частей резины (базовой)	Коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с} \times 10^{-11}$
61-202	80	61-202 + томфлон	20	18
	69			26
	73			40
РК-1802	60	РК-1802 + слюда молотая	20	39
	67			35
	54			15

Для базовых резин, марки 61-202 и РК-1802, используемых в эксперименте на основе каучуков хлоропрена S-40 и ZETPOL-2000 гидрированный (без наполнения томфлоном или молотой слюдой соответственно), коэффициент диффузии составил

$$60 \cdot 10^{-11} \div 80 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^2}{\text{с}},$$

а для данных резин с наполнением томфлоном или молотой слюдой 20 % массовых частей от базовых резин экспериментально установлен диапазон изменений коэффициента диффузии фреона R134a в пределах

$$15 \cdot 10^{-11} \div 40 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^2}{\text{с}},$$

что согласуется с данными работы [2], в которой показано, что при использовании в резинах пластинчатых минеральных наполнителей достигается эффект снижения коэффициента диффузии газа и проницаемости в 4-6 раз.

При экспериментальной отработке рецептуры резины стремились минимизировать значения коэффициента диффузии, обеспечивая приемлемую технологичность переработки смеси в части пластичности и клейкости и заданную прочность крепления резины к ниппелю. Для изготовления резиновых камер патрубков была определена и использована резина марки РК-1802.

В качестве первого примера с использованием формулы (7) рассмотрен оценочный расчет времени технологически допустимых потерь хладагента в схеме рабочего компрессора с суммарной площадью резиновых камер $S = 0,3 \text{ м}^2$ (камеры из резины РК-1802), толщиной $h = 0,007 \text{ м}$. Начальная концентрация фреона принимается равной $C_0 = 7,96 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ [1].

Значение коэффициента диффузии принято максимальным из найденного диапазона

$$D = 40 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^2}{\text{с}},$$

что обеспечивает с запасом расчетное значение гарантированного срока службы патрубков. Допустимые массовые потери хладагента фреона R134a для рабочего компрессора первого типа приняты равными $\Delta Q = 60 \text{ кг}$. При данных параметрах потери 60 кг хладагента за счет диффузии через стенки камер патрубков по времени составит оценочно 14,1 года.

Во втором примере рассмотрена схема рабочего компрессора с суммарной площадью резиновых камер $S = 0,38 \text{ м}^2$, толщиной $h = 0,007 \text{ м}$. Концентрация фреона и значение коэффициента диффузии приняты такими же, как и в первом приме-

$$\text{ре: } C_0 = 7,96 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad D = 40 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}.$$

Допустимые массовые потери хладагента фреона R134a для второго типа рабочего компрессора приняты равными $\Delta Q = 40 \text{ кг}$. При данных параметрах потери 40 кг хладагента за счет диффузии через стенки камер патрубков по времени составит оценочно 7,4 года.

Проведенные экспериментальные исследования влияния типа и состава наполнителей на диффузионную проницаемость резин при приемлемых технологических показателях переработки и изготовления резиновых камер, а также полученные в результате анализа аналитических решений уравнения диффузии [2, 6] в части оценки времени достижения технологически допустимой потери хладагента через стенки резиновых камер, позволяют сделать следующие выводы и принять практические и технические решения:

1. Для обеспечения длительной стойкости резины к воздействию хладагента в качестве базового следует использовать каучук марки ZETPOL-2000 гидрированный.

2. На основе проведенных исследований резин, экспериментально выбрана оптимальная доля наполнения в 20 % от массовых частей резиновой смеси молотой слюдой и получены экспериментальные значения коэффициента диффузии в пре-

$$\text{делах } D = 15 \cdot 10^{-11} \div 40 \cdot 10^{-11} \frac{M^2}{c}.$$

3. В целях компенсации снижения уровня адгезионной прочности крепления резины к металлу ниппеля за счет введения в состав резины специального наполнителя – молотой слюды, предложено техническое решение об использовании армирующего усиливающего каркаса в форме обжимного бандажа в виде навивки металлической про-

волоки снаружи камеры в области контакта камеры с ниппелем.

4. Проведенный расчет времени потерь хладагента за счет диффузионной проницаемости через стенки камер патрубков холодильных машин с заданными техническими характеристиками показал, что гарантированный ресурс работы патрубков составил 14,1 и 7,4 года соответственно для одной и второй машин. Причем в расчетах приняты максимальные значения коэффициентов диффузии, что обеспечивает с запасом гарантированные сроки межремонтного цикла работы холодильных машин.

Литература

1. Томановская В.Ф., Колотова Б.Е. Фреоны. Свойства и применение. Л.: Химия, 1970. 182 с.
2. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1966. 724 с.
3. Чалых А.Е. Диффузия в полимерных системах. М.: Химия, 1987. 312 с.
4. Рейтлингер С.А. Проницаемость полимерных материалов. М.: Химия, 1974. 270 с.
5. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. Справочник / под общ. ред. Григорьева В.А. и Зорина В.М. Т. 2. М.: Энергоатомиздат, 1988. 560 с.
6. Бекман И.Н. Математика диффузии: Учебное пособие. М.: Изд. «ОнтоПринт», 2016. 400 с.
7. Малкин А.Я., Чалых А.Е. Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерения. М.: Химия, 1979. 304 с.
8. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Изд. «Высшая школа», 1967. 600 с.
9. Ватсон Г.Н. Теория Бесселевых функций. М.: Изд. «Иностранная литература», 1949. 800 с.
10. Справочник по математике. Г. Корн, Т. Корн. М.: Наука. 1974. 832 с.
11. Богданов С.Н., Бурцев С.И. и др. Холодильная техника кондиционирования воздуха. Свойства веществ. Справочник / под ред. С.Н. Богданова. 4-е издание. перераб. и доп. СПб.: СПбГАХПТ, 1999. 320 с.

References

1. Tomanovskaya V.F., Kolotova B.E. Freony. Svoystva i primeneniye. L.: Himiya, 1970. 182 s.
2. Tihonov A.N., Samarskiy A.A. Uravneniya matematicheskoy fiziki. M.: Nauka, 1966. 724 s.
3. Chalyh A.E. Diffuziya v polimernyh sistemah. M.: Himiya, 1987. 312 s.
4. Rejtlinger S.A. Pronicaemost' polimernyh materialov. M.: Himiya, 1974. 270 s.
5. Teoreticheskie osnovy teplotekhniki. Teplotekhnicheskij ehksperiment. Spravochnik / pod obshch. red. Grigor'eva V.A. i Zorina V.M. T. 2. M.: EНnergoatomizdat, 1988. 560 s.
6. Bekman I.N. Matematika diffuzii: Uchebnoye posobie. M.: Izd. «OntoPrint», 2016. 400 s.
7. Malkin A.YA., Chalyh A.E. Diffuziya i vyazkost' polimerov. Metody izmereniya. M.: Himiya, 1979. 304 s.
8. Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti. M.: Izd. «Vysshaya shkola», 1967. 600 s.
9. Watson G.N. Teoriya Besselevykh funkciy. M.: Izd. «Inostrannaya literatura», 1949. 800 s.
10. Spravochnik po matematike. G. Korn, T. Korn. M.: Nauka. 1974. 832 s.
11. Bogdanov S.N., Burcev S.I. i dr. Holodil'naya tekhnika kondicionirovaniya vozduha. Svoystva veshchestv. Spravochnik / pod red. S.N. Bogdanova. 4-e izdanie. pererab. i dop. SPB.: SPBGAHPT, 1999. 320 s.

*Dakhno A.V., Director
Smirnov Yu.P., Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.),
Deputy Director for Science and New Technology,
Volzhsky Scientific and Technical Complex (branch)
Volgograd State Technical University,
Mashkov A.V., Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.),
Senior Research Officer, Professor,
Moscow Energy Institute (branch)
National Research University "Moscow Power Engineering Institute",
Potapenko O.V., Director,
LLC "Plant of Refrigerating Mechanical Engineering"*

**TO AN ASSESSMENT OF SIZE OF DIFFUSIVE LOSSES OF COOLANT THROUGH A RUBBER
CAMERA – COVER**

Abstract: in the article the calculation of time of technologically admissible volume of losses of coolant due to diffusive permeability through walls of cameras of branch pipes of refrigerators with the given technical characteristics is executed. The guaranteed resource of work of branch pipes was 14,1 and 7,4 years respectively for one and second machines. Experimental researches of influence of type and structure of fillers on diffusive permeability are carried out on rubbers: 61-202 on the basis of a chloroprene of S-40 and RK-1802 on the basis of the hydrogenated ZETPOL-2000 rubber, at the acceptable technological indicators of processing and production of rubber cameras. The optimum share of filling of rubber mix is experimentally chosen – 20% of mass parts as ground mica. For ensuring long resistance of rubber to influence of coolant as basic it is recommended to use ZETPOL-2000 brand rubber hydrogenated.

Keywords: rubber camera, coolant, diffusive permeability, diffusion coefficient, excipient