

Д. В. ЗЕЛЕНЦОВ
А. А. ГЛИНСКАЯ

ПРИМЕНЕНИЕ ФРЕОНОВ В КАЧЕСТВЕ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ В ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ

THE USE OF FREONS AS A WORKING FLUID IN HEAT PIPES
OF HEAT EXCHANGERS OF VENTILATION SYSTEMS

Большинство современных тепловых труб работает с аммиаком или водой в качестве рабочей жидкости. В последние годы выбор холодильного агента предпочтительно падает на галогенсодержащие углеводороды, такие как хладоны или фреоны, поскольку аммиак является опасным веществом. В статье представлены результаты расчетов величин массового расхода жидкости и максимальной теплопередающей способности тепловых труб с использованием различных фреонов.

Most modern heat pipes operate with ammonia or water as the working fluid. In the last 10-15 years, the choice of refrigerant has been preferentially falling on halogenated hydrocarbons, such as chladones or freons, since ammonia is a hazardous substance. The article presents the results of calculations of the values of liquid mass flow rate and maximum heat transfer capacity of heat pipes using various freons.

Ключевые слова: тепловая труба, фреон, утилизация тепла, низкопотенциальное тепло, рекуператор

Keywords: heat pipe, freon, heat recovery, low-grade heat, recuperator

Исследование утилизации низкопотенциального тепла вытяжного вентиляционного воздуха в жилых помещениях зданий представляет большой интерес с точки зрения энергосбережения и энергоэффективности [1]. Для реализации данного процесса используются различные виды теплоутилизаторов, которые можно разделить на три основные группы: рекуперативные, регенеративные и с промежуточным теплоносителем.

Теплообмен в регенеративных системах осуществляется с помощью теплоаккумулирующей массы. В данном процессе вытяжной воздух передает свою теплоту теплоаккумулирующей массе, которая нагревается. Затем аккумулированная теплота передается приточному воздуху. Теплоутилизаторы с промежуточным теплоносителем используют теплоноситель (раствор соли, гликоль и т. п.), циркулирующий между двумя теплообменниками. Данный вид утилизатора позволяет разделить приточный и вытяжной потоки, но за счет сложности конструкции они менее эффективны, чем другие типы. Также может использоваться тепловая насос для переноса тепла вытяжного воздуха к приточному воздуху, что позволяет повысить эффективность. В теплоутилизаторах-рекуператорах теплота одной среды (вытяжного воздуха) передается через разделятельную стенку другой среде (приточному воздуху). Одним из самых перспективных рекуператоров являются тепловые трубы [2, 3].

При их использовании выбор применяемых материалов и хладагентов является критически важным для обеспечения их эффективной работы в различных условиях эксплуатации. Материалы корпуса тепловой трубки должны обладать высоким коэффициентом теплопроводности, достаточной прочностью и устойчивостью к коррозии и хладагенту. Чаще всего используется медь, алюминий и сплавы на их основе. Для высокотемпературных применений используется также титан, нержавеющей сталь и сплавы с молибденом. Хладагент является рабочей жидкостью в тепловой трубке и отвечает за перенос тепла. Выбор хладагента зависит от нескольких факторов, включая желаемый диапазон температур, давление, теплопроводность и химические свойства [4]:

1. Аммиак (NH_3): наиболее распространенный хладагент, обладающий высокой теплопроводностью и низкой вязкостью. Умеренно токсичен, требует осторожного обращения.

2. Вода (H_2O): экологически безопасный и нетоксичный хладагент. Однако имеет сравнительно низкую теплопроводность и высокую удельную теплоемкость, что ограничивает его использование в высокопроизводительных приложениях.

3. Метанол (CH_3OH): обладает хорошей теплопроводностью и низкой вязкостью. Токсичен, требует использования специальных материалов и уплотнений.

4. Этанол (C_2H_5OH): похож на метанол, но менее токсичен. Может использоваться в пищевой и фармацевтической промышленности.

5. Ртуть (Hg): жидкий металл с высокой теплопроводностью, подходящий для высокотемпературных применений. Токсичен, требует специальных мер предосторожности.

6. Индий (In): жидкий металл, обладает низкой теплопроводностью, но высокой плотностью.

Выбор оптимального сочетания материалов и хладагента для конкретного применения тепловых труб требует тщательного рассмотрения факторов, включающих диапазон температур, требуемую тепловую мощность, совместимость материалов и безопасность.

Аммиак широко используется в качестве хладагента в холодильных системах и в различных промышленных процессах, таких как производство удобрений и взрывчатых веществ. Однако вместе с рядом преимуществ у аммиака имеются и серьезные недостатки, ограничивающие его применение. Достоинствами аммиака являются: высокая холодопроизводительность (высокое значение скрытой теплоты парообразования); низкая стоимость и доступность; хорошие термодинамические свойства. Недостатки аммиака: токсичность – он обладает резким, раздражающим запахом и токсичен для человека. Предельно допустимая концентрация (ПДК) аммиака в воздухе рабочих помещений составляет всего 20 мг/м^3 , а при концентрации $200\text{--}300 \text{ г/м}^3$ существует риск самопроизвольного взрыва; при сжатии в компрессорах аммиак развивает высокое давление, что создает дополнительные требования к конструкции и безопасности оборудования; коррозионная активность – аммиак коррозионно активен по отношению к определенным металлам и сплавам [5].

Галогенсодержащие углеводороды (**фреоны**) могут использоваться как альтернатива аммиаку, поэтому из-за своих недостатков аммиак часто заменяется фреонами. Преимущества фреонов: безопасность – фреоны нетоксичны и взрывобезопасны, что делает их предпочтительными для использования в жилых и коммерческих помещениях; низкое давление нагнетания – низкое давление нагнетания при сжатии позволяет использовать компрессоры меньших размеров; хорошие теплофизические свойства – фреоны обладают хорошими теплофизическими и термодинамическими характеристиками, что обеспечивает высокую эффективность холодильных систем; химическая нейтральность – фреоны химически нейтральны к большинству конструкционных материалов, что продлевает срок службы оборудования; низкий коэффициент озоноразрушения – хотя галогенсодержащие фреоны и способствуют разрушению озо-

нового слоя, их озоноразрушающий потенциал (ОРП) намного ниже, чем у других типов хладагентов, таких как хлорфторуглероды (ХФУ). Однако фреоны также имеют свои недостатки: высокая стоимость – фреоны, как правило, дороже аммиака, что может увеличить капитальные затраты на холодильную систему; потенциал глобального потепления (ПГП) – фреоны являются парниковыми газами и обладают высоким ПГП, что вносит свой вклад в изменение климата.

Таким образом, фреоны не могут полностью заменить аммиак благодаря его высокой холодопроизводительности и низкой стоимости. В определенных промышленных приложениях аммиак остается единственным экономически эффективным вариантом.

В последние годы ведется поиск альтернативных хладагентов, которые обладают высокой эффективностью, безопасностью и низким воздействием на окружающую среду. Среди перспективных вариантов можно назвать следующие [4]:

1. Гидрофторуглероды (ГФУ) – имеют низкий ПГП и ОРП, но их использование ограничено высоким давлением нагнетания.

2. Гидрофторалканы (ГФА) – обладают низким ПГП и ОРП, а также более низким давлением нагнетания, чем ГФУ.

3. Углекислый газ (CO_2) – является естественным хладагентом с нулевым ПГП и ОРП, но его использование связано с более высоким давлением и необходимостью специального оборудования.

4. Аммиак с низким зарядом – позволяет снизить риски, связанные с токсичностью и взрывоопасностью, сохраняя при этом высокую эффективность.

Выбор подходящего хладагента зависит от конкретного применения, требований к безопасности и воздействия на окружающую среду, в связи с чем появилась необходимость изучить возможность использования фреонов [6] в аммиачной тепловой трубе в качестве его замены (табл. 1).

В качестве базовых элементов для расчета принимался теплоноситель аммиак и тепловая труба (из профиля АС-КРА8.6-Р2) длиной $l = 1,0 \text{ м}$ с Ω -образным фитилем, которая имеет следующие характеристики [7, 8]:

- корпус трубы алюминиевый с наружным диаметром $d_o = 0,017 \text{ м}$;
- общая глубина комбинированной канавки $\delta = 0,0015 \text{ м}$;
- диаметр круглой части паза $d_n = 0,001 \text{ м}$;
- ширина трапециевидальной части паза $\omega' = 0,0004 \text{ м}$ и $\omega'' = 0,0003 \text{ м}$;
- число канавок $n = 25$;
- диаметр оси круглой части каналов $d = 0,0135 \text{ м}$;
- диаметр парового канала $d_v = 0,0115 \text{ м}$;

Таблица 1. Сравнительные характеристики хладагентов
Table 1. Comparative characteristics of refrigerants

Показатель	Фреон					Аммиак
	R-134A	R-22	R-125	R-410A	R-407C	
Плотность жидкости ρ_v , кг/м ³	1202,16	1184	1177,9	1051,91	1131,08	601
Вязкость жидкости μ_v , кг/(м·с)	0,0001261	0,000232	0,000125	0,000118	0,000149	0,000213
Поверх-ностное натяжение σ , Н/м	0,00802	0,00767	0,00355	0,0048	0,0067	0,0197
Скрытая теплота парообразования $\tilde{\tau}$, Дж/кг	176 080	180 387	105 390	191 318	188 880	1 160 000
Плотность пара ρ_v , кг/м ³	28,462	46,91	89,98	65,27	43,99	8,2
Вязкость пара μ_v , кг/(м·с)	0,00001254	0,00001279	0,00001425	0,00001406	0,00001279	0,00001104

- диаметр внутренний корпуса $d_i = 0,0145$ м;
- угол наклона трубы $\psi = 0$ рад;
- длина конденсаторной части $l_c = 0,127$ м;
- длина адиабатической части $l_a = 0,005$ м;
- длина испарителя $l_e = 0,85$ м.

Максимальная теплопередающая способность аммиачной тепловой трубы при заданной температуре пара $T_v = 300$ К может быть найдена из уравнения

$$Q_{\max} = m_{\max} \cdot \tilde{\tau}, \quad (1)$$

где $m_{\max}$ – максимальный массовый расход жидкости в фитиле; $\tilde{\tau}$ – скрытая теплота парообразования.

Исходя из капиллярных ограничений и используя стандартное выражение для баланса давлений, имеем

$$\Delta p_c = \Delta p_v + \Delta p_l + \Delta p_g, \quad (2)$$

и пренебрегая в первом приближении перепадом давлений в паровой фазе Δp_v ($\Delta p_l \gg \Delta p_v$), после подстановки соответствующих соотношений для Δp_c , Δp_l , Δp_g , получим:

$$\frac{2\sigma_l \cos \theta}{r_c} = \frac{\mu_l}{\rho_l \tilde{r}} \cdot \frac{Q l_{\text{eff}}}{A_w K} + \rho_l g l_{\text{eff}} \sin \psi, \quad (3)$$

где A_w – площадь поперечного сечения фитиля; K – коэффициент проницаемости фитиля; g – ускорение свободного падения, $g = 9,8$ м/с².

Раскрыв это равенство относительно массового расхода, получим [7]:

$$m = \frac{\rho_l K A_w}{\mu_l l_{\text{eff}}} \left\{ \frac{2\sigma_l}{r_c} \cos \theta - \rho_l g l_{\text{eff}} \sin \psi \right\}. \quad (4)$$

Значения, входящие в формулу (4), определяются по нижеприведенным формулам (5)–(10).

Площадь поперечного сечения фитиля:

$$A_{w,\Sigma} = n \cdot \frac{\pi d_n^2}{4} + n \cdot \frac{(w' + w'')}{2} \cdot \frac{(d_n - d_v)}{2}. \quad (5)$$

Пористость фитиля:

$$\varepsilon = \frac{A_{w,\Sigma}}{\frac{\pi}{4} (d_i^2 - d_v^2)}. \quad (6)$$

Коэффициент проницаемости фитиля:

$$K = 2\varepsilon \cdot r_{h,l}^2 / f_l \text{Re}_l. \quad (7)$$

Задавая режим движения жидкости ламинарным, значение показателя $f_l \text{Re}_l$ принимаем равным 16.

Гидравлический радиус открытой комбинированной канавки:

$$r_{h,l} = \frac{2A_{w,\Sigma} / n}{\alpha}, \quad (8)$$

где α – смоченный периметр канавки.

$$\alpha = \pi \cdot d_n - w'' + 2c. \quad (9)$$

Эффективная длина составит

$$l_{\text{eff}} = l_a + \frac{l_c + l_e}{2}. \quad (10)$$

При проведении сравнительного анализа был выполнен расчет массового расхода жидкости для аммиака, в результате максимальная теплопередающая способность тепловой трубы, заполненной аммиаком, составляет $Q = m \times \tilde{\tau} = 0,304 \times 10^{-3} \times 1,16 \times 10^6 = 352,64$ Вт [7, 8].

Далее аналогичным способом были произведены расчеты для получения сравнительных величин массового расхода жидкости и мак-

симальной теплопередающей способности тепловой трубы с использованием различных фреонов (табл. 2).

Таблица 2. Сравнительные данные теплопередающей способности
Table 2. Comparative heat transfer data

Показатель	Фреон					Аммиак
	R-134A	R-22	R-125	R-410A	R-410A	
<i>m</i> , кг/с	0,0004184	0,0002142	0,0001831	0,000234	0,0001279	0,0003049
<i>Q</i> , Вт	73,67	38,64	19,29	44,76	52,59	352,64

Вывод. Сравнительный анализ использования фреонов в качестве альтернативного теплоносителя вместо аммиака показал возможность их применения в данном качестве. Однако теплопередающая способность тепловой трубы из профиля АС-КРА8.6-Р2 длиной $l = 1,0$ м с Ω -образным фитилем, которая использовалась как базовый элемент для сравнительного расчета, снижается при этом в диапазоне от 4,8 до 18,3 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пуринг С.М., Ватузов Д.Н. Оптимизация выбора способа теплоснабжения жилых многоквартирных домов // Инновационные стратегии развития экономики и управления: сб. статей / СГАСУ. Самара, 2015. С. 313–316.

2. Чи С. Тепловые трубы: теория и практика / пер. В.Я. Сидорова. М.: Машиностроение, 1981. 207 с.

3. Matveev A., Zelentsov D., Louks A. Heat pipes as perspective base elements of heat recovery in heat supply and ventilating systems // MATEC Web of Conferences. 2017. P. 06016.

4. Бабакин Б.С., Стефанчук В.И., Ковтунов Е.Е. Альтернативные хладагенты и сервис холодильных систем на их основе. М.: Колос, 2000. 160 с.

5. Кисс В.В., Евдокимов А.А. Обеспечение безопасности при проектировании аммиачных холодильных установок. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 81 с.

6. Тимофеев А. В. Исследование влияния капиллярной структуры термосифона на его тепловую мощность с теплоносителями R134a, R410a, R407c // Вестник Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова. 2023. № 3(8). С. 56–66. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-3-56-66.

7. Лукс А.Л., Матвеев А.Г. Анализ основных расчетных и экспериментальных теплофизических характеристик аммиачных тепловых труб повышенной тепловой проводимости из алюминиевых сплавов // Вестник Самарского государственного университета. Естественная серия. 2008. № 3 (62). С. 331–357.

8. Лукс А.Л., Матвеев А.Г., Зеленцов Д.В. Методика расчета тепловых труб, отводящих тепло от тепловыделяющей поверхности // Градостро-

ительство и архитектура. 2018. Т.8, № 1. С. 35–39. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.01.6.

REFERENCES

1. Puring S.M., Vatzov D.N. Optimization of the choice of heat supply method for residential apartment buildings. *Innovacionnye strategii razvitiya jekonomiki i upravlenija: sb. statej* [Innovative strategies for the development of the economy and management: Sat. articles]. Samara, SGASU, 2015, pp. 313–316. (In Russian).

2. Chi S. *Teplovye truby: teorija i praktika* [Heat Pipes: Theory and Practice]. Moscow, Mechanical Engineering, 1981. 207 p.

3. Matveev A., Zelentsov D., Louks A. Heat pipes as perspective base elements of heat recovery in heat supply and ventilating systems. MATEC Web of Conferences. 2017. P. 06016.

4. Babakin B.S., Stefanchuk V.I., Kovtunov E.E. *Al'ternativnye hladağenty i servis holodil'nyh sistem na ih osnove* [Alternative refrigerants and service of refrigeration systems based on them]. Moscow, Kolos, 2000. 160 p.

5. Kiss V.V., Evdokimov A.A. *Obespechenie bezopasnosti pri proektirovanii ammiachnyh holodil'nyh ustanovok* [Safety Assurance in the Design of Ammonia Refrigeration Units]. St. Petersburg, ITMO University, 2016. 81 p.

6. Timofeev A. V. Study of the influence of the capillary structure of a thermosyphon on its thermal power with coolants R134a, R410a, R407c. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta imeni V.G. Shuhova* [Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov], 2023, no. 3(8), pp. 56–66. (in Russian) DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-3-56-66

7. Luks A.L., Matveev A.G. Analysis of basic design and experimental thermophysical characteristics of ammonia heat pipes of increased thermal conductivity from aluminum alloys. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennonauchnaja serija* [Bulletin of Samara State University. Natural Science Series], 2008, no. 3 (62), pp. 331–357. (in Russian)

8. Luks A.L., Matveev A.G., Zelentsov D.V. Methods of calculation of heat pipes removing heat from the heat-generating surface. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Planning and Architecture], 2018, vol. 8, no. 1, pp. 35–39. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2018.01.6

Об авторах:

ЗЕЛЕНЦОВ Данила Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой теплогазоснабжения
и вентиляции

Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: tgv@samgtu.ru

ZELENTSOV Danila V.

PhD of Engineering Sciences, Associate Professor,
Head of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair
Samara State Technical University

443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244
E-mail: tgv@samgtu.ru

ГЛИНСКАЯ Арина Алексеевна

аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции
Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: a-glinskaia@mail.ru

GLINSKAYA Arina Al.

Post-graduate Student of the Heat and Gas Supply
and Ventilation Chair

Samara State Technical University

443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244
E-mail: a-glinskaia@mail.ru

Для цитирования: Зеленцов Д.В., Глинская А.А. Применение фреонов в качестве рабочей жидкости в тепловых трубах теплообменников систем вентиляции // Градостроительство и архитектура. 2025. Т. 15, № 1. С. 27–31. DOI: 10.17673/Vestnik.2025.01.04.

For citation: Zelentsov D.V., Glinskaya A.A. The use of freons as a working fluid in heat pipes of heat exchangers of ventilation systems. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2025, vol. 15, no. 1, pp. 27–31. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2025.01.04.



ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР «САМАРАСТРОЙИСПЫТАНИЯ»



Проведение сертификационных испытаний строительной продукции; экспериментальных и опытных образцов зданий и сооружений в процессе приемки и эксплуатации; испытание серийно выпускаемой продукции; периодические испытания образцов, взятых в торговле; проверка состояния производства; обследование зданий и сооружений; выполнение судебных экспертиз в области строительства



Надежда Владимировна КОНДРАТЬЕВА
кандидат технических наук, доцент



443001, Самара, ул. Молодогвардейская, 194
(846) 242-50-87
samstroyisp@gmail.ru