

Современные тенденции развития мембранных технологий и их применения в системах термостатирования стартовых ракетных комплексов

© И.В. Бармин^{1,2}, В.В. Козлов¹, П.В. Крылов^{1,2}, И.П. Михайлова¹

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

²АО «ЦЭНКИ», Москва, 129110, Россия

Цель исследования — провести сравнительный анализ представленных на отечественном рынке полимерных мембран с селективными свойствами для решения задач газоразделения и оценить перспективность применения соответствующих мембранных технологий для осушения воздуха в системах термостатирования стартовых ракетных комплексов. Проанализирована целесообразность использования рассмотренных моделей мембранных осушителей в системах термостатирования на примере системы обеспечения температурного режима с требуемой точкой росы на выходе $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ при нормальных условиях. Описаны методы мембранного осушения с соответствующими конструкциями мембранных модулей наиболее перспективных к применению на стартовых комплексах моделей. Научная новизна работы заключается в разработке принципиальных схем систем термостатирования с использованием картриджей с полуволоконными мембранами, конструкционно адаптированных к решению поставленных задач на стартовом ракетном комплексе.

Ключевые слова: космодром, наземная космическая инфраструктура, стартовый комплекс, воздушная система обеспечения температурного режима, воздушная холодильная машина, осушение, мембрана

Введение. Одно из наиболее молодых и динамично развивающихся направлений подготовки газов определенного качества — использование мембранных технологий. Мембранные модули активно применяют для получения гелия, азота и кислорода в газообразном состоянии, а также для осушения сжатого воздуха до заданных значений температуры точки росы.

Цель представленной работы — дать сопоставительный анализ имеющихся на отечественном рынке технических решений и показать параметры мембранных осушителей на базе полуволоконных мембран применительно к решению задач стартового ракетного комплекса.

Методы и принятые допущения. В качестве примера рассмотрен рабочий режим системы термостатирования, реализующей цикл воздушной холодильной машины для охлаждения и осушения потока воздуха [1]. При давлении 1,0 МПа и температуре $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ на входе в объект термостатирования влагосодержание воздуха не должно превышать 0,3 г/кг сухого воздуха, что соответствует относительной

влажности около 100 % при давлении 1,0 МПа. Процессы компримирования, охлаждения, осушения и детандирования отображены на i — d -диаграмме влажного воздуха для переменных давлений, приведенной на рис. 1 [1]. Влажный воздух рассматривается как двухкомпонентная смесь влаги и сухого воздуха, процесс осушения в мембранном осушителе происходит изотермически.

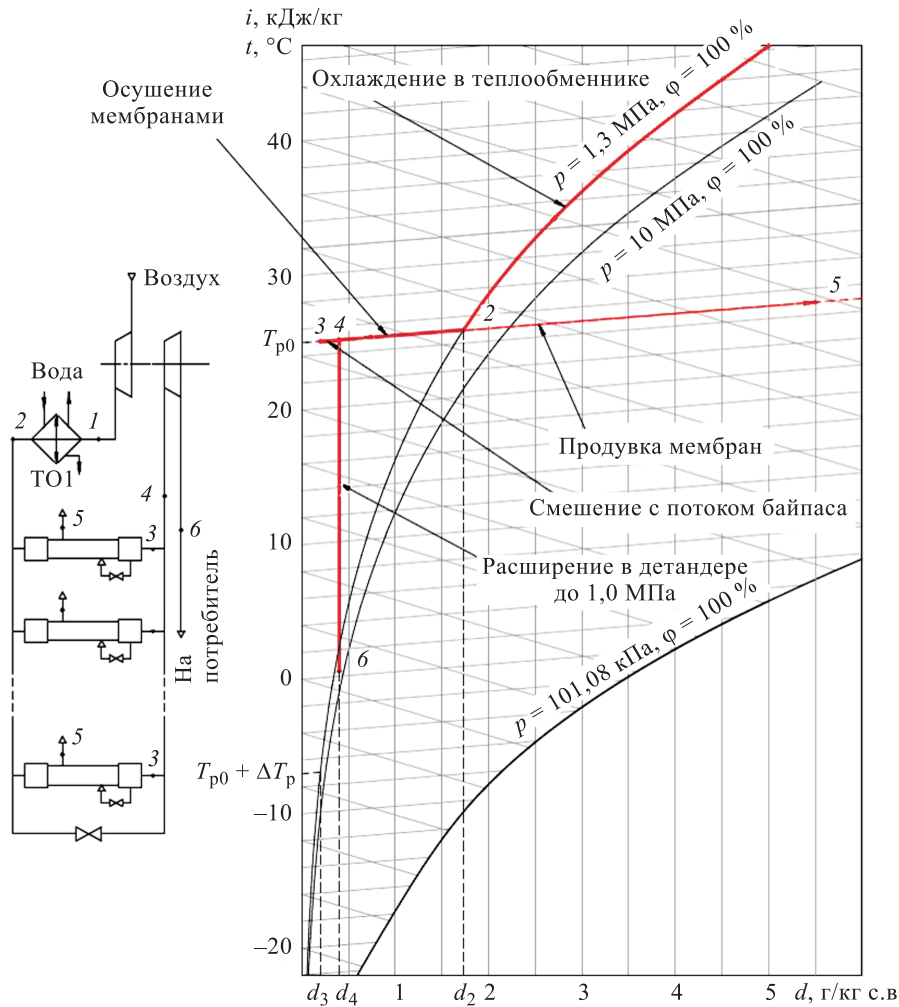


Рис. 1. Технологическая схема (а) и процессы осушения в системе с мембранными осушителями на i — d -диаграмме влажного воздуха (б):

T_{p0} — значение точки росы после конечного охладителя компрессора; ΔT_p — температура снижения точки росы

Конечные параметры пермеата (продувки) по влагосодержанию зависят от доли продувочного сухого воздуха.

Обзор производителей. Одним из наиболее крупных поставщиков мембранных осушителей сжатого воздуха на российском рынке

является шведская компания Atlas Copco, специализирующаяся на производстве компрессионного и вакуумного оборудования. Мембранный осушитель воздуха Atlas Copco представляет собой модуль, который состоит из множества тонких находящихся внутри цилиндрического корпуса трубок-мембран со специальными композитными стенками, способными пропускать влагу. При прохождении потока воздуха по трубкам влага проникает через стенки, а затем выдувается из корпуса осушителя вместе с частью осушенного воздуха, направленного обратным потоком [1, 2]. Схема работы мембранного осушителя Atlas Copco представлена на рис. 2 [2].

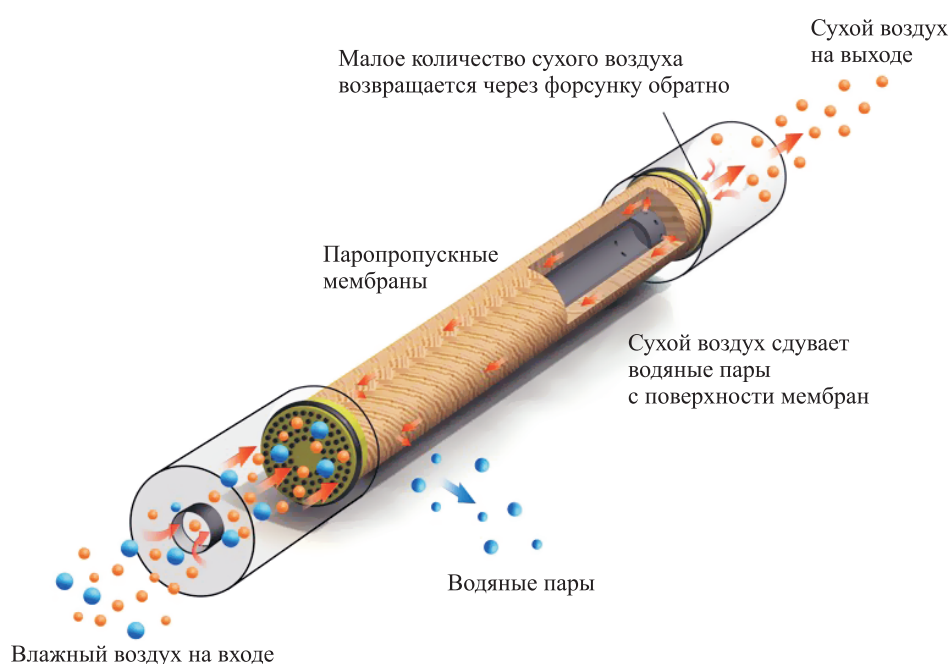


Рис. 2. Схема мембранного осушителя Atlas Copco

Главным преимуществом осушителей Atlas Copco является простота конструкции. Они компактны и практически бесшумны, не нуждаются в обслуживании, им не требуется электроэнергия для функционирования [2]. Основной недостаток — потери сжатого воздуха для продувки внешней стороны полволоконных мембран. Доля потерь компрессорного воздуха может достигать 20 % в зависимости от требуемой степени осушения на мембране (точки росы), а также от давления на входе в мембранный осушитель и давления обратного дренажного потока [3]. Кроме того, при использовании мембранных осушителей предъявляются высокие требования к чистоте воздуха на входе, в связи с чем необходимо устанавливать и поддерживать в должном состоянии фильтры тонкой очистки на входе в осушитель.

Выпускаются две линейки мембранных осушителей Atlas Copco серии SD, понижающие точку росы на 32 °С или на 55 °С. Они имеют сравнительно небольшую пропускную способность (от 6 до 198 м³/ч) и могут осушать поток с входным давлением не выше 1,4 МПа [2].

Анализ модельного ряда мембранных осушителей такого типа показал, что при оснащении ими в системах термостатирования с давлением сжатого воздуха до 1,4 МПа каждый осушитель способен понижать температуру точки росы на 55 °С. Для увеличения расхода воздуха можно параллельно установить несколько модулей. Модель мембранного осушителя Atlas Copco SD-7N-13 показана на рис. 3.



Рис. 3. Мембранный осушитель Atlas Copco SD-7N-13

На магистрали с высокими расходами (тяжелая и сверхтяжелая ракета-носитель) устанавливают несколько мембранных модулей, соединенных в единый блок круговой или любой другой параллельной конфигурации (рис. 4).

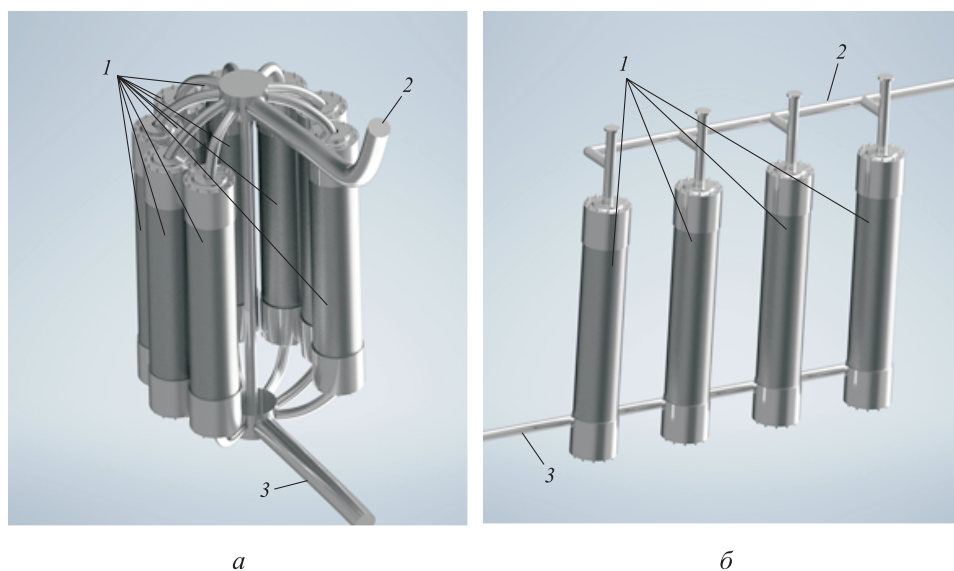


Рис. 4. Вид сборного блока мембранных осушителей потока с высоким расходом: *а* — круговое соединение модулей; *б* — линейное соединение модулей; 1 — мембранный модуль; 2 — подводящая магистраль; 3 — магистральный детандер

Мембранные осушители также поставляет на отечественный рынок международная компания AirProducts, выпустившая мембранные модули Prism по собственной запатентованной технологии (рис. 5). Основные цели применения данных мембран — генерация азота, осушка воздуха, регенерация водорода, улучшение биогаза и получение воздуха, обогащенного кислородом [4].

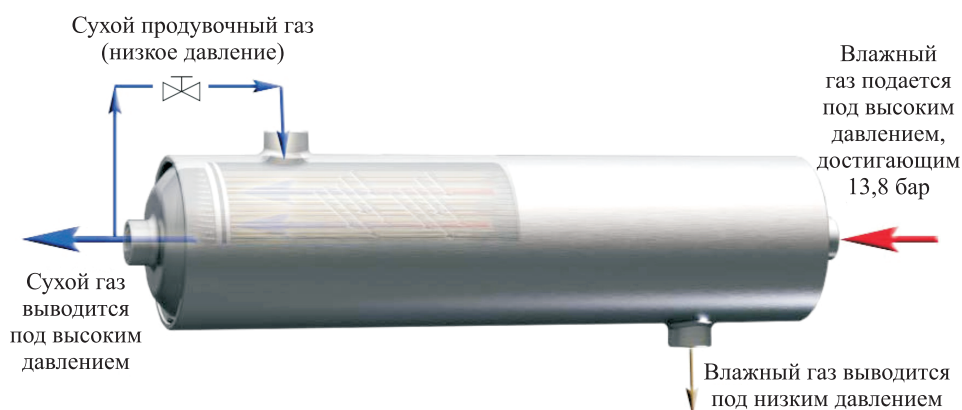


Рис. 5. Схема работы мембранного осушителя Prism

Из трех линеек мембранных осушителей для применения в системах термостатирования стартовых комплексов предпочтение было отдано серии PE, оборудование которой способно осушать поток с высоким давлением. В качестве оптимальной модели был выбран мембранный модуль PE6040-E1, осушающий поток высокого давления (до 1,38 МПа) с расходом до 332,5 м³/ч до требуемого потребителем значения с потерей влажным потоком в качестве пермеата около 14 % от входящего потока [4].

Отечественная научно-промышленная компания «Грасис», следуя стратегии импортозамещения, в 2020 г. начала серийный выпуск мембранных модулей по собственной запатентованной технологии для выделения гелиевого концентрата из природного газа и подготовки природного и попутного нефтяного газа. Эта компания продолжает совершенствовать мембранную технологию подготовки углеводородных газов и разработала новые мембраны с улучшенными газоразделительными свойствами и конструкцией корпусов картриджей CarboPeeK [5, 6]. Отличительная особенность этой мембраны — минимальное падение на ней давления газа. В дальнейшем данные мембраны выглядят перспективно в качестве российского аналога зарубежным конкурентам и в решении задачи осушения воздуха.

Кроме перечисленных выше производителей мембранных осушителей следует обратить внимание на такие компании, как Omega Air (Словения), IGS (США) и UBE membrane (Япония) [7, 8].

Теоретическая часть. По результатам обзора производителей был выполнен сравнительный анализ, в ходе которого у каждого из них была подобрана модель мембранного осушителя, наиболее подходящая для применения в воздушной системе термостатирования. За основу принята принципиальная схема системы обеспечения температурного режима (СОТР) с байпасом потока, представленная на рис. 1. Согласно данным коммерческих запросов, были отобраны модели мембранных осушителей по трем параметрам, взятым из открытых источников:

- по максимальному рабочему давлению, способному обеспечить работу со сжатым компрессором потоком до 1,3 МПа;
- изменению точки росы потока (степенью осушения) ΔT_p , минимальное значение которого в соответствии с диаграммой, приведенной на рис. 1, должно составлять около $-25\text{ }^\circ\text{C}$ (при 0,1 МПа);
- потерям потока на продувку мембраны S_M , из-за которых возникают потери энергии, что снижает преимущество всей схемы с точки зрения энергопотребления. Чем меньше потери, тем менее энергоемкой будет схема.

Таким образом, схема с байпасом потока позволяет использовать ресурс мембранных модулей для более глубокого осушения потока, чем на требуемые системой $-25\text{ }^\circ\text{C}$. Расчетная схема СОТР с байпасом представлена на рис. 6.

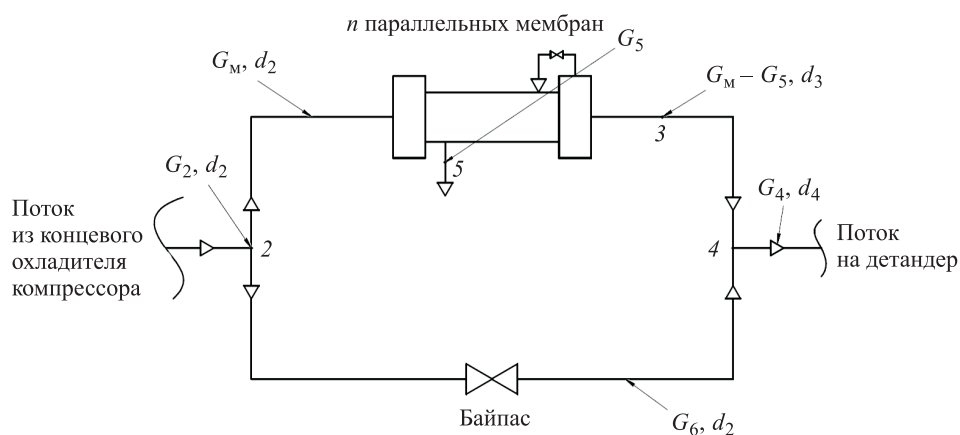


Рис. 6. Расчетная схема СОТР с байпасом

Для оценки таких фактических потерь, как доли потерянного сжатого воздуха компрессора на продувку мембран S , рассмотрим массовый баланс потоков влажного и сухого воздуха:

$$G_2 = G_6 + G_M = G_4 + G_5, \quad (1)$$

где G_2 — массовый расход воздушного потока на выходе из конечного охладителя компрессора (точка 2), кг/с; G_6 — массовый расход потока воздуха на байпасе, кг/с; G_M — массовый расход воздуха на входе в мембрану, кг/с; G_4 — массовый расход потока воздуха на входе в детандер (точка 4), кг/с; G_5 — массовый расход воздуха на продувку мембраны (точка 5), кг/с.

Массовый баланс влаги при смешении потоков в точке 4 (перед детандером) выражается формулой

$$(G_M - G_5)(d_4 - d_3) = G_6(d_2 - d_4), \quad (2)$$

где d_4 — влагосодержание потока на выходе из системы, определяемое техническим заданием, $d_4 = 0,3$ г/кг; d_3 — влагосодержание потока на выходе из мембранного блока (параметр мембранного осушителя), г/кг; d_2 — влагосодержание потока до мембранного блока (соответствует исходным данным влагосодержания воздуха после конечного охладителя компрессора), $d_2 = 1,75$ г/кг.

Тогда доля потока, направляемая на байпас x_6 , будет вычисляться по формуле

$$x_6 = \frac{G_6}{G_2} = \frac{(d_4 - d_3)(1 - S_M)}{d_2 - d_3 - S_M(d_4 - d_3)}, \quad (3)$$

где $S_M = \frac{G_5}{G_M}$ — потери потока на продувку мембраны (параметр мембранного осушителя).

Значения d_2 , d_3 и d_4 определяются по диаграмме, изображенной на рис. 1, с учетом известных значений ΔT_p и T_{p0} (значение точки росы после конечного охладителя компрессора).

Таким образом, доля фактических потерь S на продувку мембран, возникающих в схеме с байпасом, будет определяться по формуле

$$S = \frac{G_5}{G_2} = S_M \frac{G_M}{G_2} = S_M(1 - x_6) = S_M \frac{d_2 - d_4}{d_2 - d_3 + S_M(d_3 - d_4)}. \quad (4)$$

Число параллельно соединенных мембранных модулей n рассчитывается по формуле

$$n = \frac{Q_M}{Q_{Mi}} = \frac{Q_T(1 - x_6)}{Q_{Mi}(1 - S)}, \quad (5)$$

где Q_T — объемный расход потока воздуха на потребитель, определяемый техническим заданием, $\text{Н}\cdot\text{м}^3/\text{ч}$; Q_{Mi} — объемный расход одного мембранного модуля, $\text{Н}\cdot\text{м}^3/\text{ч}$; Q_M — объемный расход мембранного блока, $\text{Н}\cdot\text{м}^3/\text{ч}$.

Характеристики мембранных осушителей и полученные значения потерь потока при рабочем режиме приведены в таблице. С использованием рассчитанных данных (см. таблицу) было определено требуемое количество параллельно соединенных мембранных осушителей для работы с воздушным потоком в одном блоке подготовки воздуха системы термостатирования стартового комплекса КРК тяжелого класса, что соответствует значению $Q_T = 14\,583 \text{ (Н}\cdot\text{м}^3)/\text{ч}$.

Характеристики мембранных осушителей разных производителей

Производитель	Atlas Copco, Швеция		AirProducts, США	Omega Air, Словения	IGS, США	UBE Membrane, Япония
Полимер	Акрилонитрил бутадиен стирол		Полисульфон		Тетрабром-поликарбонат	Полифениленоксид
Модель	SD-7N-13	SD-7P-13	PE6040-E1	M-DRY 180	GMD 4108	NM-810FC
Максимальное рабочее давление, МПа	1,4	1,4	1,38	1,3	1,38	1,4
Температура снижения точки росы, ΔT_p , °C	-55	-32	-40	-40	-40	-40
Расход одного мембранного модуля Q_{Mi} , $\text{Н}\cdot\text{м}^3/\text{ч}$	2052	2508	333	180	856,3	848,7
Потери, приведенные в открытых источниках, S_m , %	10	9	14	11	15	13
Доля потока на байпасе x_b , %	13,4	5,9	10,1	10,4	10	10,2
Потери в расчетной схеме S , %	8,7	8,5	12,6	9,9	13,5	11,7
Число параллельных мембранных модулей n	7	6	46	81	18	18

Наименьшие потери потока на продувку влаги из мембраны имеют осушители производства Atlas Copco. В отличие от остальных производителей лишь они заявляют о возможности получения сухого воздуха с понижением точки росы на 55 °С, что обеспечивает возможность подготовки системой осушенного потока воздуха более высокого класса чистоты по влагосодержанию.

Разработанный в рамках данной работы проект блока осушения воздуха системы термостатирования обеспечивает получение осушенного воздуха в широком диапазоне характеристик расхода и влагосодержания методом двойного регулирования режима путем изменения доли потока в байпасе и доли дренажного потока мембранного блока. Данный метод регулирования также позволяет выполнить точную настройку требуемого режима, что приводит к улучшению технологичности и снижению излишних затрат энергии.

Экспериментальная часть. Результаты исследования параметров мембранных осушителей разных производителей показали, что в открытых источниках содержится недостаточный для проектирования ВСОТР объем данных о влиянии режимных и конструктивных параметров на конечные результаты проектирования. Для получения экспериментальных данных об осушающей способности и проведения сравнительного анализа мембранных модулей различных производителей был разработан лабораторный стенд, представленный на рис. 7 [9].

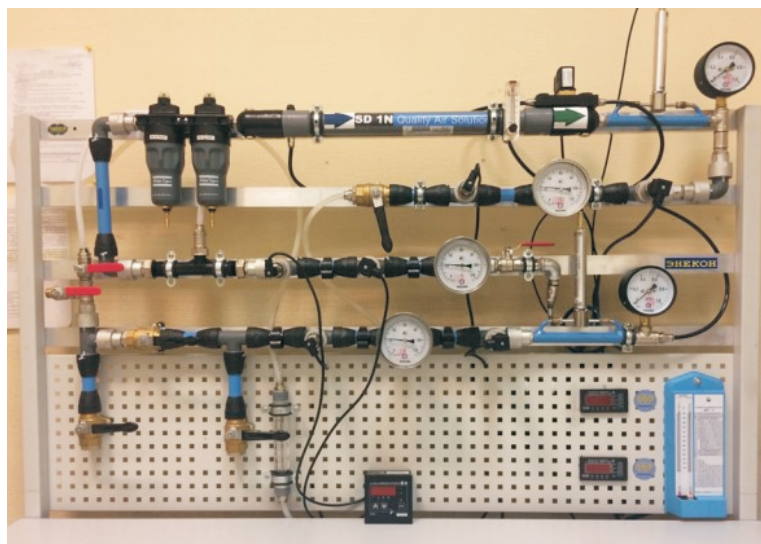


Рис. 7. Лабораторный стенд

Первые результаты проведенного на стенде экспериментального исследования влияния доли дренажного потока на температуру точки росы (ТТР) осушенного воздуха для давлений в диапазоне 0,4...0,7 МПа

приведены на рис. 8. Эксперименты, выполненные на одном из серийно выпускаемых осушителей, показали, что снижение доли дренажного потока до значения менее 18 % ведет к значительному повышению ТТР осушаемого воздуха. Для исходного давления 0,7 МПа разница ТТР снижается с 35 до 20 °С. При этом повышение давления сжатого воздуха в диапазоне давлений исследования позволило увеличить разницу ТТР примерно на 10 °С [9].

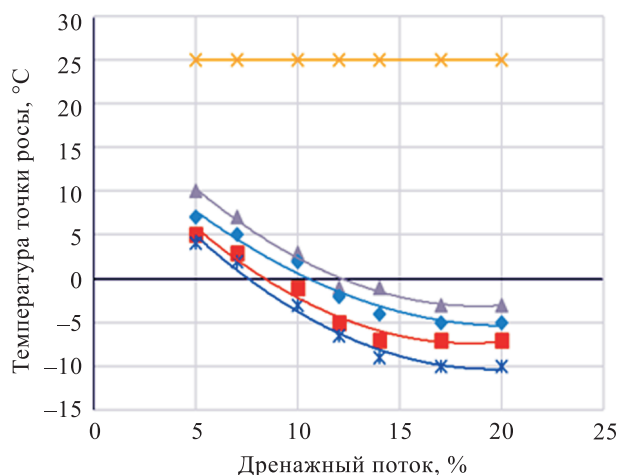


Рис. 8. Влияние доли дренажного потока на температуру точки росы осушаемого воздуха при разных давлениях на выходе: $p = 0,4$ МПа (▲); $p = 0,5$ МПа (◆); $p = 0,6$ МПа (■); $p = 0,7$ МПа (✕); ✕ — точка росы на входе

Следует заметить, что подобная информация необходима на этапе проектирования ВСОТР.

Заключение. Проведенный обзор и анализ существующих мембранных технологий и технических средств на отечественном рынке раскрывают пути их применения и адаптации к реалиям и задачам систем термостатирования стартовых комплексов. Характеристики зарубежных моделей мембранных осушителей и практика их применения в системах подготовки и осушения сжатого воздуха подтверждают возможность и перспективность использования подобных разработок в воздушных системах обеспечения температурного режима космодромов [10]. Однако одним из условий дальнейшего эффективного проектирования является необходимость получения дополнительных экспериментальных данных.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Козлов В.В., Крылов П.В., Пискун Е.С. Анализ перспективных технологических схем подготовки воздуха в системах термостатирования стартовых комплексов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 9. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-9-21>

- [2] *Atlas Copco*: [сайт]. URL: <https://www.atlascopco.com/> (дата обращения 05.12.2021).
- [3] Kozlov V.V., Shadrin V.S., Podchufarov A.A. Express analysis of technological processes of compression and drying of wet air at the stages of design and operation of compressor stations. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2141, art. no. 030029. DOI: 10.1063/1.5122079
- [4] *AirProducts* [сайт]. URL: <https://www.airproducts.ru/> (дата обращения 05.12.2021).
- [5] Булавинов С.Л. CarboPEEK — мембранная технология ГРАСИС для переработки и утилизации попутного нефтяного газа, *Химическая технология*, 2008, № 8, с. 34–35.
- [6] Булавинов С.Л. Мембранная технология для переработки и утилизации ПНГ. *Экологический вестник*, 2009, № 12, с. 11–14.
- [7] *Innovative gas systems* [сайт]. URL: <https://igs-generon.ru/> (дата обращения 05.12.2021).
- [8] *UBE membrane* [сайт]. URL: <https://www.ube.com/> (дата обращения 05.12.2021).
- [9] Пискун Е.С., Козлов В.В. Экспериментальное исследование влияния величины дренажного потока на эффективность мембранного осушителя компрессорной установки, *Будущее машиностроения России: Сб. докл. Двенадцатой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием)*. Москва, 2019, с. 574–577.
- [10] Александров А.А., Бармин И.В., Денисов О.Е., Чугунков В.В. Инновационные направления в развитии и эксплуатации наземной космической инфраструктуры технических комплексов космодромов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 5. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-5-1765>

Статья поступила в редакцию 24.02.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бармин И.В., Козлов В.В., Крылов П.В., Михайлова И.П. Современные тенденции развития мембранных технологий и их применения в системах термостатирования стартовых ракетных комплексов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-4-2172>

Бармин Игорь Владимирович — Советник генерального директора АО «ЦЭНКИ» по науке, член-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедры «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 150 научных работ в области ракетно-космической техники. e-mail: i.barmin@russian.space

Козлов Владимир Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 50 научных работ в области компрессорной техники, газоснабжения и термостатирования ракетно-космической техники. e-mail: vladimir.kozlov@bmstu.ru

Крылов Петр Владимирович — аспирант 1-го курса кафедры «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер 3-й категории отдела комплексного проектирования Филиала АО «ЦЭНКИ» — НИИ СК; автор трех научных работ в области ракетно-космической техники. e-mail: peter_krylov@list.ru

Михайлова Ирина Петровна — студентка 3-го курса кафедры «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. email: mikhaylovaip@student.bmstu.ru

Modern trends in the development of membrane technologies and their application in launch complex thermostatic control systems

© I.V. Barmin^{1,2}, V.V. Kozlov¹, P.V. Krylov^{1,2}, I.P. Mikhaylova¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

²Federal State Unitary Enterprise “TsENKI”, Moscow, 129110, Russia

The purpose of the study was to conduct a comparative analysis of domestic selective property polymer membranes used in gas separation problems and to estimate the prospects of using appropriate membrane technologies for air drying in launch complex thermostatic control systems. The study analyzes models of membrane dryers through the example of a temperature control system with the required outlet dew point minus 25 °C under normal conditions. The existing methods of membrane drying with the corresponding designs of membrane modules and the most promising models for use at launch complexes are described. The scientific novelty of the work lies in the development of schematic diagrams of thermostatic control systems using cartridges with hollow fiber membranes, structurally adapted to solve the tasks at the launch rocket complex.

Keywords: *spaceport, ground-based space infrastructure, launch complex, air temperature control system, air refrigerator, drying, membrane*

REFERENCES

- [1] Kozlov V.V., Krylov P.V., Piskun E.S. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2021, iss. 9. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-9-2111>
- [2] *Atlas Copco*. Available at: <https://www.atlascopco.com/> (accessed December 5, 2021).
- [3] Kozlov V.V., Shadrin V.S., Podchufarov A.A. Express analysis of technological processes of compression and drying of wet air at the stages of design and operation of compressor stations. *AIP Conference Proceedings* 2019, vol. 2141, art. no. 030029, pp. 1–11. DOI: 10.1063/1.5122079
- [4] *AirProducts*. Available at: <https://www.airproducts.ru/> (accessed December, 5 2021).
- [5] Bulavinov S.L. *Himicheskaya tehnologiya — Chemical technology*, 2008, no. 8, pp. 34–35.
- [6] Bulavinov S.L. *Ekologicheskiy vestnik (Ecological Herald)*, 2009, no. 12, pp. 11–14.
- [7] *Innovative gas systems*. Available at: <https://igs-generon.ru/> (accessed December, 5 2021).
- [8] *UBE membrane*. Available at: <https://www.ube.com/> (accessed December, 5 2021).
- [9] Piskun E.S., Kozlov V.V. Eksperimentalnoe issledovanie vliyaniya velichiny drenazhnogo potoka na effektivnost membrannogo osushitelya kompressornoy ustanovki [Experimental study of the effect of the drainage flow on the efficiency of a membrane dryer of a compressor unit]. *Budushee mashinostroeniya Rossii: Sbornik dokladov Dvenadtsatoy Vserossiyskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov (s mezhdunarodnim uchastiyem)* [The Future of Russian engineering: Collection of reports of the Twelfth All-Russian Conference of

Young Scientists and Specialists (with international participation)]. Moscow, 2019, pp. 574–577.

- [10] Aleksandrov A.A., Barmin I.V., Denisov O.E., Chugunkov V.V. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 5. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-5-1765>

Barmin I.V., Science Adviser to Director General, FSUE “TsENKI”; corresponding member, Russian Academy of Sciences; Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Rocket Launch Complexes, Bauman Moscow State Technical University; author of 150 research publications in the field of rocket and space technology.
e-mail: i.barmin@russian.space

Kozlov V.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Vacuum and Compressor Equipment, Bauman Moscow State Technical University; author of 30 research publications in the field of compressor equipment, gas supply and temperature control in rocket and space technology. e-mail: vladimir.kozlov@bmstu.ru

Krylov P.V., post-graduate student, Department of Rocket Launch Complexes, Bauman Moscow State Technical University; 3rd category engineer, Department of Integrated Design, Branch of FSUE “TsENKI” – Launch Complex Research Institute; author of 3 research publications in the field of rocket and space technology.
e-mail: peter_krylov@list.ru

Mikhaylova I.P., student, Department of Rocket Launch Complexes, Bauman Moscow State Technical University. email: mikhaylovaip@student.bmstu.ru