

Применение мембранных и парокомпрессионных технологий в двухступенчатой схеме осушения системы термостатирования стартового ракетного комплекса

© 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

Представлена оценка степени снижения энергопотребления воздушной системы обеспечения температурного режима стартового комплекса в результате включения в схему этой системы двухступенчатого блока осушения, состоящего из парокомпрессионной холодильной машины и мембранных осушителей. Рассмотрена система термостатирования с требуемой точкой росы на выходе $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ при нормальных условиях, спроектированная для обеспечения работы с перспективной ракетой-носителем тяжелого класса. Описаны существующие методы мембранного осушения с соответствующими конструкциями мембранных модулей, а также наиболее перспективные модели для применения на стартовых комплексах. Отмечено, что научная новизна рассмотренных принципиальных схем систем термостатирования заключается в том, что в них одновременно используются принципы парокомпрессионной холодильной машины и полуволоконных мембран.

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

Введение. Одними из основных задач совершенствования современной техники являются повышение технологичности и снижение энергопотребления существующих решений. Подобные тенденции прослеживаются и при разработке систем подготовки и осушения воздуха на стартовых комплексах [1].

В настоящее время в рамках ужесточения коммерческой конъюнктуры на мировом рынке космических услуг и космонавтики проявился отчетливый интерес ведущих космических агентств по экономической оптимизации ценообразования космических пусков к повышению их технологичности и снижению расходной базы сокращением пассивных и активных затрат [2]. Такие затраты возникают при проектировании, изготовлении, монтаже, испытаниях и дальнейшей эксплуатации всех технических и технологических систем стартового комплекса (СК), одной из которых является система его термостатирования.

Существующие системы термостатирования стартовых комплексов отличаются высокой энергоемкостью и технологической сложностью обеспечения режима в случаях подготовки потоков воздуха с высокими расходами и требуемой степенью осушения. Узлы подготовки

воздуха состоят из крупных многоступенчатых компрессорных и турбодетандерных блоков, а также каскадов теплообменников. Все это оборудование имеет огромное энергопотребление, обеспечение которого требует специальных проектировочных решений, связанных с поиском дополнительных источников энергии и созданием способов их подключения. Справиться с этими проблемами может помочь применение современных технологий мембранного осушения в схеме системы.

Цель работы — представить разработку метода получения заданной влажности воздуха в системе термостатирования на СК, реализованного менее энергозатратным и более технологичным способом, с использованием современных мембранных схем и технологий, позволяющих обеспечить более высокую степень осушения потока воздуха.

Методы и принятые допущения. Для примера рассмотрен рабочий режим системы термостатирования, использующей для охлаждения и осушения потока воздуха цикл воздушной холодильной машины [3]. При давлении 1,0 МПа и температуре +3 °С на входе в объект термостатирования влагосодержание воздуха должно составлять не более 0,3 г/кг сухого воздуха, что соответствует относительной влажности около 100 % при давлении 1,0 МПа. Влажный воздух рассматривается как двухкомпонентная смесь влаги и сухого воздуха, процесс осушения в мембранном осушителе проходит изотермически.

Традиционная схема осушения. Традиционная технологическая схема воздушной системы обеспечения температурного режима (ВСОТР) представлена на рис. 1.

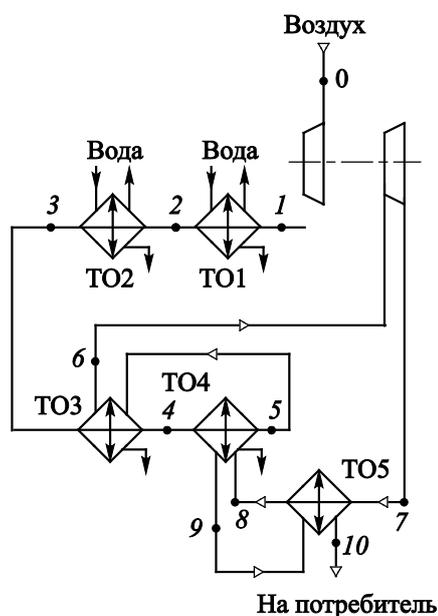


Рис. 1. Традиционная технологическая схема ВСОТР с каскадом теплообменников: ТО1–ТО5 — теплообменники; 0 — вход воздуха в компрессор; 1 — вход воздуха в ТО1; 2 — вход воздуха в ТО2; 3 — вход воздуха в ТО3; 4 — вход воздуха в ТО4; 5 — вход обратного потока воздуха в ТО3; 6 — вход воздуха в детандер; 7 — выход воздуха из детандера; 8 — вход обратного потока воздуха в ТО4; 9 — вход обратного потока воздуха в ТО5; 10 — выход воздуха на потребитель

Детандер в данной системе наряду с охлаждением потока воздуха за счет расширения до рабочего давления ВСОТР, равного 1,0 МПа, обеспечивает осушение методом конденсации в теплообменниках ТО3 и ТО4 до заданного остаточного влагосодержания. Процессы осушения в традиционной схеме ВСОТР (см. рис. 1), изображенные на диаграмме $i - d$ (энтальпия — влагосодержание) влажного воздуха для переменных давлений, представлены на рис. 2 и 3.

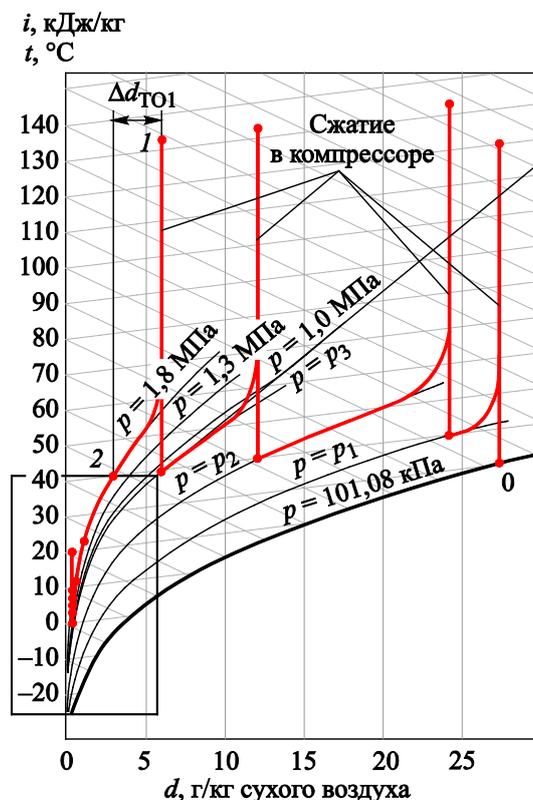


Рис. 2. Процесс осушения влажного воздуха на диаграмме $i - d$ при сжатии воздуха в компрессоре до 1,8 МПа и относительной влажности $\varphi = 100\%$ для переменных давлений воздуха p_1, p_2, p_3 после сжатия в 1-й, 2-й, 3-й ступени компрессора соответственно

Поток воздуха сжимается в компрессоре до 1,8 МПа (см. точки 0–1 на рис. 1, 2) и охлаждается в каскаде теплообменников сначала оборотной водой (точки 1–3 на рис. 1–3), а на более низком температурном уровне (точки 3–5 на рис. 1, 2) с помощью холодного обратного потока воздуха (точки 7–9 на рис. 1, 3) после его расширения в детандере (точки 6–7 на рис. 1, 3). На выходе из ВСОТР после расширения до давления 1,0 МПа влагосодержание воздуха соответствует температуре точки росы — не ниже +3 °С (точка 10 на рис. 1, 3). Очевидно,

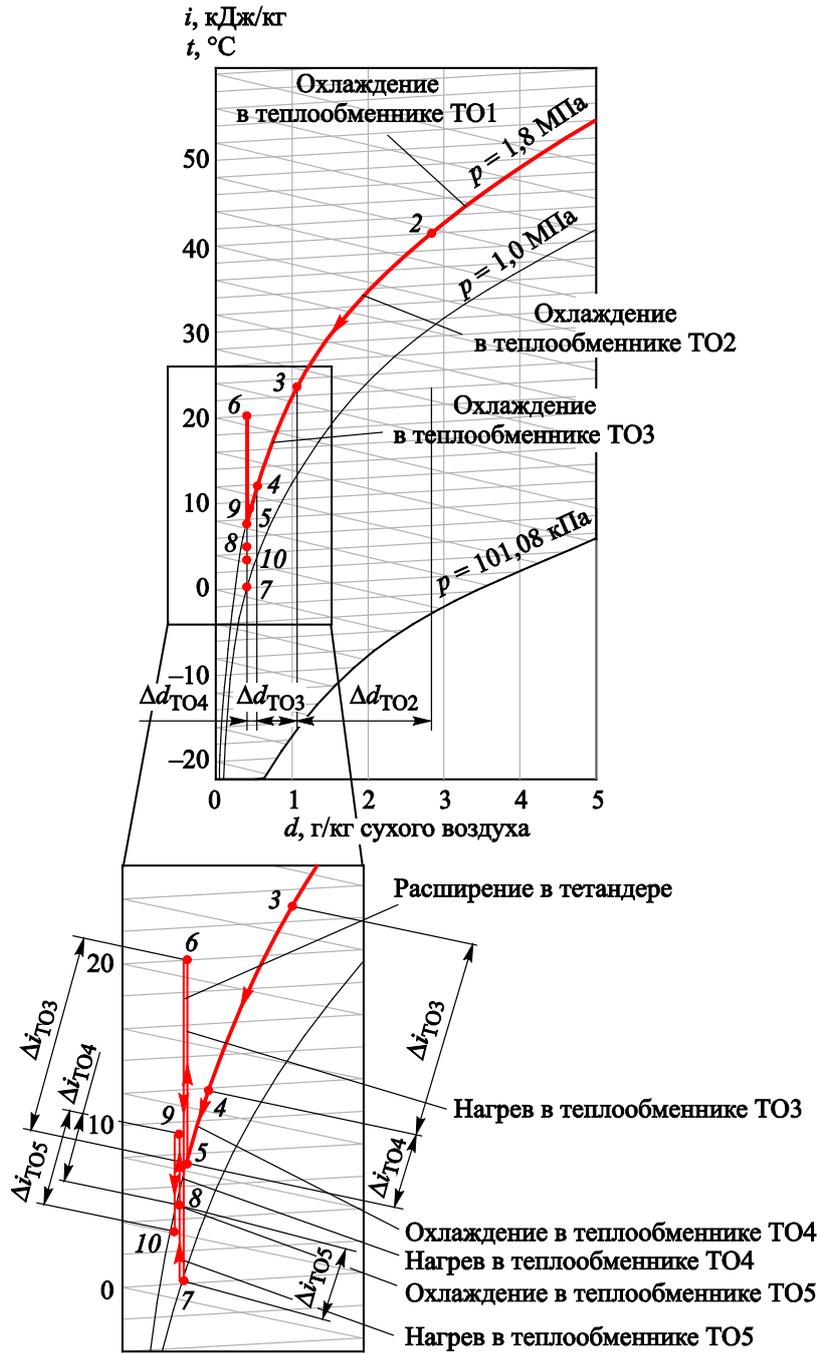


Рис. 3. Процессы осушения воздуха на $i - d$ диаграмме при $\phi = 100\%$ для переменных давлений p :

$\Delta d_{TO1}, \Delta d_{TO2}, \Delta d_{TO3}, \Delta d_{TO4}$ — изменение влагосодержания в TO1, в TO2, в TO3, в TO4 соответственно; $\Delta i_{TO1}, \Delta i_{TO2}, \Delta i_{TO3}, \Delta i_{TO4}, \Delta i_{TO5}$ — изменение энтальпии в TO1, в TO2, в TO3, в TO4, в TO5

что дальнейшее снижение влагосодержания воздуха посредством конденсации невозможно из-за перехода при температуре ниже 0 °С режима конденсации в режим инееобразования [4].

Существенным недостатком конденсационного осушения сжатого воздуха является известное явление туманообразования над поверхностью охлаждения в теплообменниках, возникающее в результате перехода состояния влажного воздуха в зону пересыщения. Данное явление снижает эффективность подготовки воздуха в системе и повышает реальные параметры влажности над заданными расчетными [5]. Эффективная работа традиционной схемы подготовки воздуха (см. рис. 1) в значительной степени зависит от стабильности режимных параметров и поддержания минимальных температурных напоров в теплообменниках-осушителях [4, 5].

Таким образом, перечисленные выше проблемы накладывают объективные ограничения на возможность повышения степени осушения воздуха в ВСОТР на базе воздушных холодильных машин, что вызывает необходимость модернизации технологических схем подготовки воздуха.

Схема осушения с мембранными блоками и парокомпрессионной холодильной машиной (ПКХМ). Более привлекательными для обеспечения стабильности параметра влагосодержания на выходе ВСОТР могут быть технологические схемы с мембранными осушителями. Применение этих осушителей в комплексе с ПКХМ позволяет избавиться от детандерной ступени и заменить четырехступенчатый компрессор менее энергоемким трехступенчатым. Технологическая схема доработанной системы представлена на рис. 4 [6].

Поток воздуха после сжатия в компрессоре (точка I на рис. 4) охлаждается водой в концевом теплообменнике ТО1 (рис. 5). ПКХМ устанавливается в качестве первой ступени осушения воздуха методом конденсации при охлаждении до температуры +5 °С (см. точки II–III на рис. 4). Такой режим ПКХМ позволяет использовать холодильную машину, избегая ее переохлаждения и необходимости последующей разморозки. Далее воздух окончательно осушается мембранным осушителем (точки III–IV). При этом часть осушенного воздуха идет на продувку мембраны (точки IV–V). Затем поток осушенного в мембранном осушителе воздуха смешивается с потоком на байпасе и направляется на потребитель (точки IV–VI).

Для расчета рабочего режима в качестве исходных данных используются: расход сжатого термостатируемого воздуха $G = 17\,500$ кг/ч; температура наружного воздуха $t_n = 25$ °С; температура входящего в воздухоохладитель воздуха (начальная температура термостатируемого воздуха) $t_{вх}^{Bo} = 25$ °С; температура выходящего из воздухоохладителя

воздуха (конечная температура термостатируемого воздуха) $t_{\text{ВХ}}^{\text{ВО}} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$; давление поступающего на воздухоохладитель сжатого воздуха $p = 11\text{ атм}$. В качестве рабочего тела (хладагента) используется фреон R12. Изменение температуры на воздухоохладителе составит $\Delta t = t_{\text{ВХ}}^{\text{ВО}} - t_{\text{ВЫХ}}^{\text{ВО}} = 25 - 5 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Значения и характеристики полученного рабочего режима ПКХМ представлены на диаграмме Молье на рис. 6 и в табл. 1.

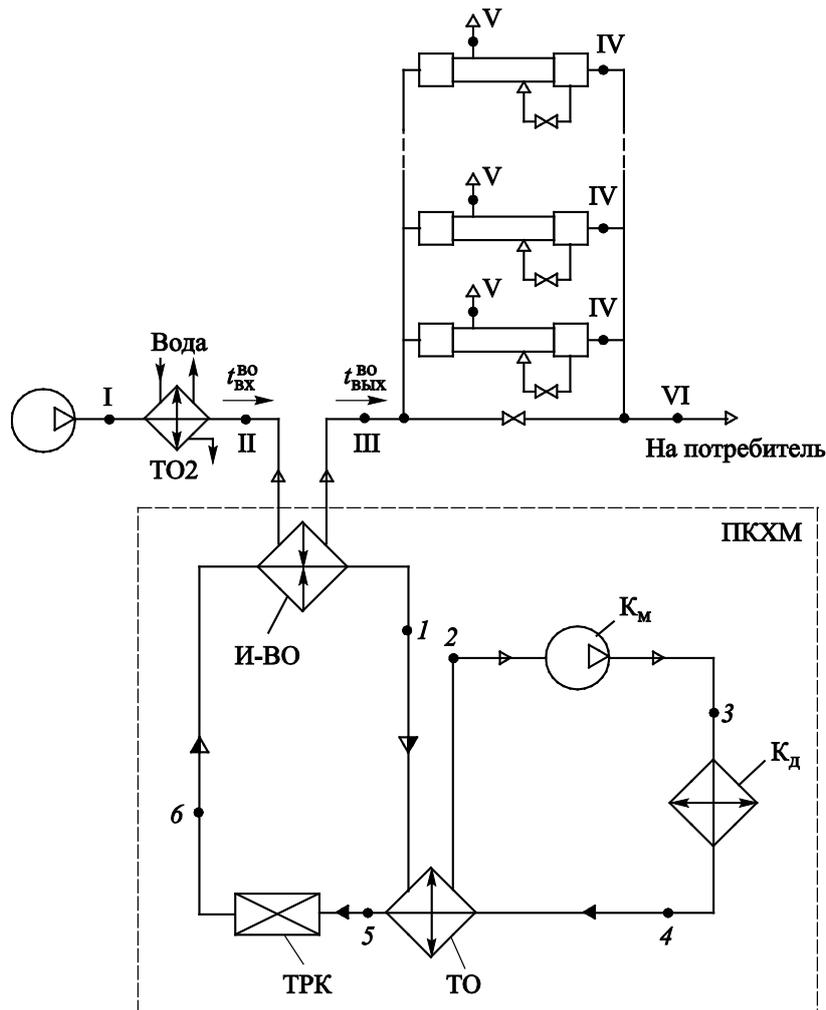


Рис. 4. Технологическая схема VSCOTR с ПКХМ и мембранными осушителями

На основе полученных данных рабочего режима ПКХМ были проведены теплофизические расчеты и определена потребляемая мощность ПКХМ (мощность электродвигателя компрессора ПКХМ):

$$N_{\text{KM}} = \frac{G_a(i_3 - i_2)}{\eta_i \eta_m \eta_{\text{KM}}} = \frac{2728(573 - 558)}{0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,95} = 53177 \text{ кДж} = 14771 \text{ Вт} = 14,8 \text{ кВт}, \quad (1)$$

где G_a — массовый расход хладагента, циркулирующего в машине,

$$G_a = \frac{c_p G \Delta t}{i_1 - i_6} = \frac{1,005 \cdot 17500 \cdot 20}{128} = 2728 \text{ кг/ч}; \quad \eta_i \text{ — индикаторный КПД}$$

холодильного компрессора, $\eta_i = \frac{T_0}{T_k} = 0,9$; η_m — механический КПД,

$\eta_m = 0,9$; η_i — КПД электродвигателя, $\eta_i = 0,95$; c_p — удельная молярная теплоемкость воздуха, $c_p = 1,005 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

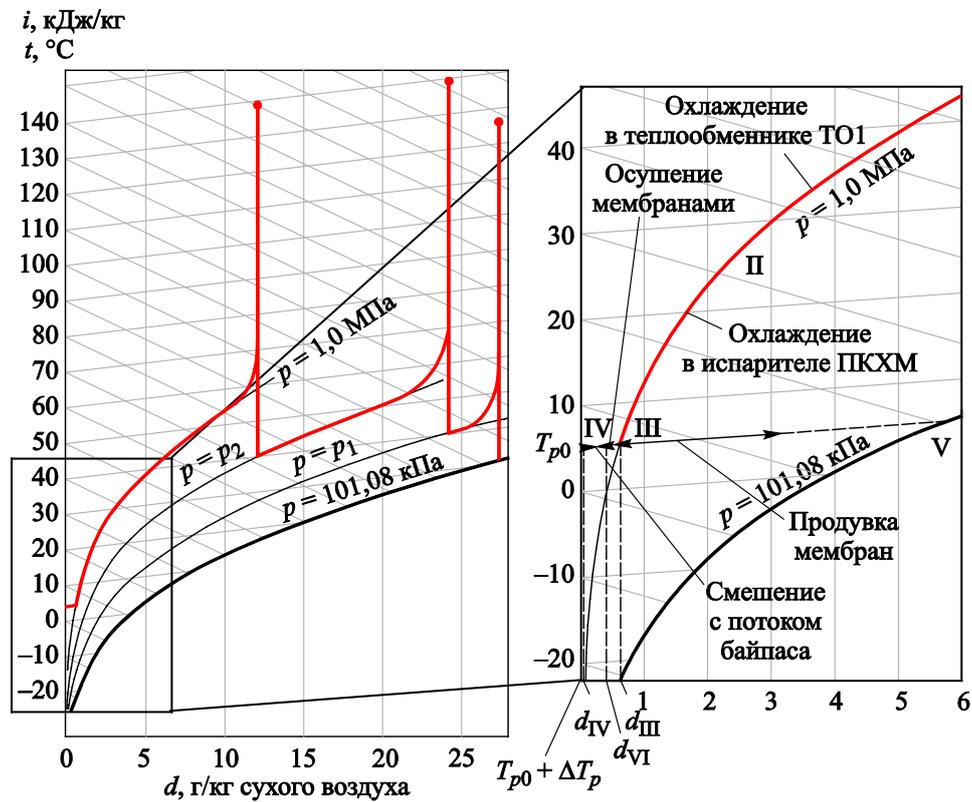


Рис. 5. Процессы осушения на диаграмме $i - d$ влажного воздуха при $\phi = 100\%$ для переменных давлений:

I — воздух на выходе из компрессора; II — воздух на входе в теплообменник ПКХМ; III — воздух на входе в мембранный осушитель; IV — воздух на выходе из мембранного осушителя; V — воздух после продувки мембранного осушителя; VI — воздух на потребитель; И-ВО — испаритель-воздухоохладитель; ТО — промежуточный теплообменник ПКХМ; ТРК — терморегулирующий клапан; К_д — конденсатор; К_м — компрессор

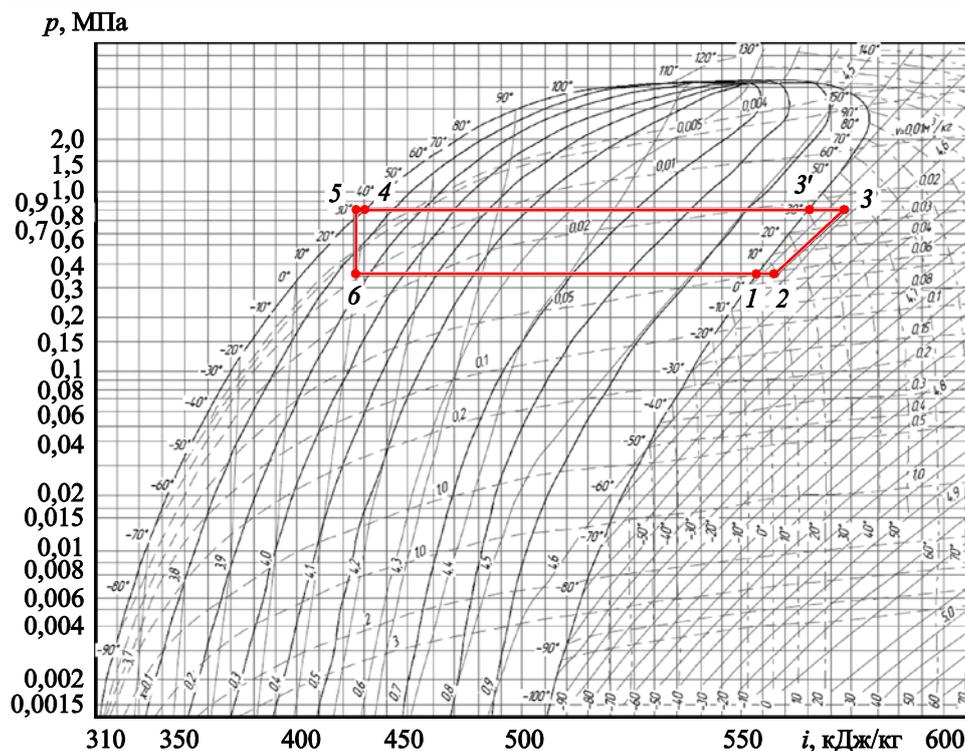


Рис. 6. Процессы рабочего цикла ПКХМ при предварительном осушении воздуха:
1–6 — узловые точки (см. рис. 4)

Таблица 1

Значения параметров узловых точек цикла ПКХМ

Параметры узловых точек	Узловые точки (см. рис. 6)					
	1	2	3	4	5	6
Температура t , °С	5	10	42	35	31	5
Энтальпия i , кДж/кг	554	558	573	432	426	426
Давление p , МПа	0,35	0,35	0,8	0,8	0,8	0,35
Энтропия S , кДж/(кг · К)	4,557	4,575	4,575	–	–	–

Блок мембранных осушителей обеспечивает окончательное осушение потока воздуха до требуемой точки росы. Поскольку мембранные осушители имеют невысокую пропускную способность, блок мембранного осушения представляет собой несколько осушителей, установленных параллельно.

Мембранные осушители могут осушить поток до точки росы значительно ниже требуемой потребителем. В конструкции устанавливается байпас с возможностью регулирования расхода потока через него, что позволяет регулировать конечное значение влажности потока, а также избежать его чрезмерного осушения и оптимизации

потерь на продувку мембран за счет повышенной точности настройки рабочего режима потока. Расчетная схема блока мембранных осушителей (n параллельных мембран) приведена на рис. 7.

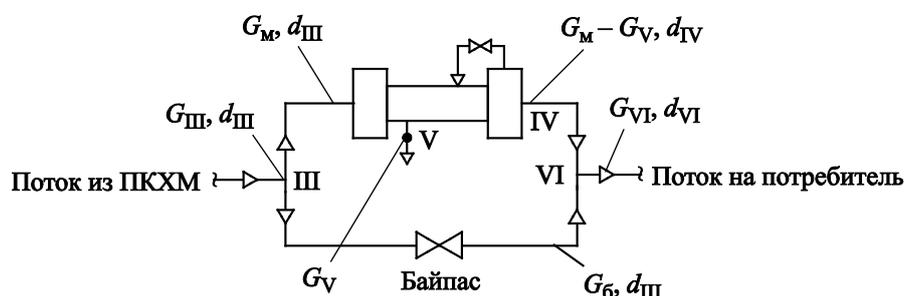


Рис. 7. Расчетная схема блока мембранных осушителей с байпасом

Для того чтобы дать оценку фактических потерь как доли потерянного сжатого воздуха компрессора на продувку мембран с учетом байпаса S , рассмотрен массовый баланс потоков влажного и сухого воздуха (см. рис. 7):

$$G_{III} = G_M + G_B = G_{VI} + G_V \text{ [кг/с]}, \quad (2)$$

где G_{III} — массовый расход воздушного потока на выходе из ПКХМ (точка III рис. 4, 7); G_{VI} — массовый расход потока воздуха на выходе на потребитель (точка VI); G_V — массовый расход воздуха на продувку мембраны (точка V); G_B — массовый расход потока воздуха на байпасе; G_M — массовый расход воздуха на входе в мембрану.

Массовый баланс влаги при смешении потоков в точке VI (перед потребителем) определяется выражением:

$$(G_M - G_V)(d_{VI} - d_{IV}) = G_B(d_{III} - d_{VI}), \quad (3)$$

где d_{VI} — влагосодержание потока на выходе из системы, определяемое техническим заданием, $d_{VI} = 0,3$ г/кг; d_{IV} — влагосодержание потока на выходе из мембранного блока (параметр мембранного осушителя); d_{III} — влагосодержание потока до мембранного блока (соответствует исходным данным влагосодержания воздуха после конечного охладителя компрессора).

Направляемая на байпас доля потока, x_B рассчитывается по формуле

$$x_B = \frac{G_B}{G_{III}} = \frac{(d_{VI} - d_{IV})(1 - S_M)}{d_{III} - d_{IV} - S_M(d_{VI} - d_{IV})}, \quad (4)$$

где $S_M = \frac{G_V}{G_M}$ — потери потока на продувку мембраны (параметр мембранного осушителя, без учета байпаса).

Значения d_{III} , d_{IV} и d_{VI} определяются согласно диаграмме, изображенной на рис. 4, 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 рассчитываться по формуле

$$S = \frac{G_V}{G_{III}} = S_M \frac{G_M}{G_{III}} = S_M (1 - x_6) = S_M \frac{d_{III} - d_{VI}}{d_{III} - d_{IV} + S_M (d_{IV} - d_{VI})}. \quad (5)$$

Количество параллельно соединенных мембранных модулей n определяется как отношение

$$n = \frac{Q_M}{Q_{Mi}} = \frac{Q_M (1 - x_6)}{Q_{Mi} (1 - S)}, \quad (6)$$

где Q_M — объемный расход потока воздуха на потребитель, определяемый техническим заданием, м³/ч (при начальных условиях — далее при н.у.); Q_{Mi} — объемный расход одного мембранного модуля, м³/ч (при н.у.); Q_M — объемный расход мембранного блока, м³/ч (при н.у.).

Согласно расчетной схеме и характеристикам мембранных осушителей из открытых источников, при осушающей способности мембранного осушителя понизить точку росы на -32 °С и потерях, равных 10 % входного расхода на продувку мембраны, доля потока на байпасе составит около 40 %, а суммарные потери на продувку в расчетной схеме — около 6 %. При пропускной способности одной мембраны около 500 м³/ч (при н.у.), потребуется установка 20 параллельных осушителей [7–9].

На основе полученных значений был подобран трехступенчатый компрессор, способный обеспечить подачу сжатого воздуха давлением 1,0 МПа с расходом 260 м³/мин (при н.у.) [10]. Данная модель компрессора имеет потребляемую электрическую мощность 1800 кВт, в то время как потребляемая мощность исходного четырехступенчатого компрессора составляла 2500 кВт.

Заключение. Таким образом, несмотря на повышение расхода потребляемого компрессором воздуха из-за возникающих потерь на обдувку мембранных осушителей, с учетом данных потерь и энергопотребления ПКХМ суммарное энергопотребление доработанной системы с мембранными осушителями будет на 25 % ниже, чем у системы,

работающей по традиционной схеме, что приводит к значительному снижению эксплуатационных расходов.

Разработанный в рамках представленной работы проект блока осушения воздуха системы термостатирования обеспечивает возможность получения осушенного воздуха в широком диапазоне характеристик расхода и влагосодержания методом двойного регулирования режима: за счет изменения доли потока в байпасе и изменения доли дренажного потока мембранного блока. Данный метод регулирования также обеспечивает возможность точной настройки требуемого режима, что, в свою очередь, приводит к повышению технологичности и снижению излишних затрат энергии.

Проведенный обзор и анализ мембранных технологий и технических средств, существующих на отечественном рынке, раскрывает возможные пути их применения и адаптации к реалиям и задачам систем термостатирования стартовых комплексов. Характеристики зарубежных моделей мембранных осушителей и известная практика их применения в системах подготовки и осушения сжатого воздуха подтверждают возможность и перспективность использования подобных разработок в воздушных системах обеспечения температурного режима космодронов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Матвеева О.П., Романык А.Ю., Удовик И.С. Анализ вариантов сокращения энергопотребления в процессах поддержания тепловых режимов космических аппаратов на стартовых комплексах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 12. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-12-1942>
- [2] Матвеева О.П., Чугунков В.В., Семячков Д.А. Системное проектирование наземного технологического оборудования технических и стартовых ракетных комплексов. *Контроллинг в экономике, организации производства и управлении: шансы и риски цифровой экономики: сборник научных трудов IX Международного конгресса по контроллингу. С.Г. Фалько, ред. Тула, 17 мая 2019года*. Москва, Изд-во НП «Объединение контроллеров», 2019, с. 158–162.
- [3] 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/10.18698/2308-6033-2021-9-2111>
- [4] 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
- [5] Козлов В.В. Эффективность работы осушителей сжатого воздуха конденсационного типа. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011, спец. вып. «Вакуумные и компрессорные машины и пневмооборудование», с. 132.
- [6] Александров А.А., Бармин И.В., Денисов О.Е., Чугунков В.В. Инновационные направления в развитии и эксплуатации наземной космической инфраструктуры технических комплексов космодронов. *Инженерный жур-*

- нал: наука и инновации, 2018, вып. 5. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-5-1765>
- [7] 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.
- [8] Roth H., Alders M., Luelf T., Emonds S., Mueller S.I., Teppera M., Wessling M. Chemistry in a spinneret — Sinusoidal-shaped composite hollow fiber membranes. *Journal of Membrane Science*, 2019, no. 585, pp. 115–125.
- [9] Emonds S., Roth H., Wessling M. Chemistry in a spinneret — Formation of hollow fiber membranes with a cross-linked polyelectrolyte separation layer. *Journal of Membrane Science*, 2020, no. 612 (4), art. ID 118325. DOI: 10.1016/j.memsci.2020.118325
- [10] Хисамеев И.Г., Максимов В.А., Баткис Г.С., Гузельбаев Я.З. *Проектирование и эксплуатация промышленных и центробежных компрессоров*. Казань, Изд-во «Фэн» Академии наук Республики Татарстан, 2010, 42 с.

Статья поступила в редакцию 11.06.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бармин И.В., Козлов В.В., Крылов П.В., Михайлова И.П. Применение мембранных и пароконденсационных технологий в двухступенчатой схеме осушения системы термостатирования стартового ракетного комплекса. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-6-2281>

Бармин Игорь Владимирович — Советник генерального директора АО «ЦЭНКИ» по науке, член-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «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 2-го курса кафедры «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер-конструктор 2-й категории отдела комплексного проектирования Филиала АО «ЦЭНКИ» — НИИ СК; автор 10 научных работ в области ракетно-космической техники. e-mail: peter_krylov@list.ru

Михайлова Ирина Петровна — студентка 4-го курса кафедры «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: mikhaylovaip@student.bmstu.ru

Membrane and vapor compression technologies use in the two-stage dehumidifying scheme of the rocket launch complex thermal regulation system

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

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

²Joint-stock company "TsENKI", Moscow, 129110, Russia

Objective of this study is to perform analysis aimed at assessing the degree of reduction in energy consumption of the launch complex temperature regime air support system by introducing a two-stage dehumidifying unit that includes a vapor-compression refrigeration machine (VCRM) and membrane dryers in the scheme. As part of the study, a thermal regulation system with the required outlet dew point of -25 °C under normal conditions was considered, which was designed to ensure operation with a promising heavy-class launch vehicle. The paper describes the existing methods of membrane dehumidifying along with corresponding designs of the membrane modules, as well as the most promising models for use at the launch complexes. Scientific novelty of this work lies in developing schematic diagrams of the thermal regulation systems using both the principles of VCRM and hollow fiber membranes.

Keywords: *cosmodrome, ground-based space infrastructure, launch complex, temperature regime air support system, air refrigeration machine, dehumidification, membrane*

REFERENCES

- [1] Matveeva O.P., Romanyak A.Yu., Udovik I.S. Analiz variantov sokrascheniya energopotrebleniya v protsessakh podderzhaniya teplovykh rezhimov kosmicheskikh apparatov na startovykh kompleksakh [Analyzing options of reducing power consumption of thermal conditions maintenance processes in spacecraft at launch pads]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 12. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-12-1942>
- [2] Matveeva O.P., Chugunkov V.V., Semyachkov D.A. Sistemnoe proyektirovaniye nazemnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya tekhnicheskikh i startovykh raketnykh kompleksov [System design of processing equipment of technical and launch complexes]. In: *Kontrolling v ekonomike, organizatsii proizvodstva i upravlenii: shansy i riski tsifrovoy ekonomiki: sbornik nauchnykh trudov IX Mezhdunarodnogo kongressa po kontrollingu, Tula, 17 maya 2019 goda* [Controlling in economy, organizing production and management: chances and risks in the digital economy: collection of scientific papers of the IX International Congress on Controlling. Tula, May 17, 2019]. S.G. Fal'ko, ed. Moscow, Publishing house of NP "Association of controllers", 2019, pp. 158–162.
- [3] Kozlov V.V., Krylov P.V., Piskun E.S. Analiz perspektivnykh tekhnologicheskikh skhem podgotovki vozdukha v sistemakh termostatirovaniya startovykh kompleksov [Analysis of perspective air preparation network designs in launch complex temperature control systems]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2021, iss. 9. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-9-2111>
- [4] 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. <https://doi.org/10.1063/1.5122079>

- [5] Kozlov V.V. Effektivnost raboty osushiteley szhatogo vozdukha kondensatsionnogo tipa [Operational efficiency of compressed air dehydrators of condensation type]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana — Herald of the BMSTU*, 2011, spets. vypusk “Vakuumnye i kompressornye mashiny i pnevmooborudovanie” [special issue “Vacuum and compression machines and pneumatic equipment”], 132 p.
- [6] Aleksandrov A.A., Barmin I.V., Denisov O.E., Chugunkov V.V. Innovatsionnye napravleniya v razvitii i ekspluatatsii nazemnoy kosmicheskoy infrastruktury tekhnicheskikh kompleksov kosmodromov [Innovative trends in the development and operation of space ground-based infrastructure at technical areas of cosmodromes]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 5. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-5-1765>
- [7] 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]. In: *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.
- [8] Roth H., Alders M., Luelf T., Emonds S., Mueller S.I., Teppera M., Wessling M. Chemistry in a spinneret — Sinusoidal-shaped composite hollow fiber membranes. *Journal of Membrane Science*, 2019, no. 585, pp. 115–125.
- [9] Emonds S., Roth H., Wessling M. Chemistry in a spinneret — Formation of hollow fiber membranes with a cross-linked polyelectrolyte separation layer. *Journal of Membrane Science*, 2020, no. 612 (4), art. ID 118325. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118325>
- [10] Hisameev I.G., Maksimov V.A., Batkis G.S., Guzelbaev Y.Z. *Proektirovanie i ekspluatatsiya promyshlennykh i tsentrobezhnykh kompressorov* [Design and operation of the industrial and centrifugal compressors]. Kazan, “Fen” Akademii nauk Respubliki Tatarstan Publ., 2010, 42 p.

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; 2nd category engineer, Department of Integrated Design, Branch of FSUE “TsENKI” — Launch Complex Research Institute; author of 10 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. e-mail: mikhaylovaip@student.bmstu.ru