

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СХЕМЫ ПОДГОТОВКИ
И ОСУШЕНИЯ ВОЗДУХА В СИСТЕМАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА СТАРТОВЫХ
РАКЕТНЫХ КОМПЛЕКСОВ СРЕДНЕГО КЛАССА**

П.В. Крылов^{1,2}

p.krylov@russian.space

Н.А. Абросимов¹

n.abrosimov@russian.space

И.А. Черкасов³

chermont@mail.ru

В.В. Козлов²

vladimir.kozlov@bmstu.ru

Е.А. Ксенофонтова¹

e.ksenofontova@russian.space

¹АО «ЦЭНКИ» — НИИ СК, Москва, Российская Федерация

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

³ООО «ОКБ СХМ Технатон», Москва, Российская Федерация

Аннотация

В связи с ужесточением коммерческой конфронтации на мировом рынке космических услуг и космонавтики ведущие космические агентства проявляют повышенный интерес к экономической оптимизации ценообразования космических пусков, в том числе путем снижения капитальных вложений и удельных затрат. Этот фактор влияет на усиление роли энергоэффективности технологического оборудования стартовых комплексов относительно других его параметров. Рассмотрена схема подготовки и осушения воздуха в воздушных системах обеспечения температурного режима с применением перспективных технологий. Приведена система термостатирования с требуемой точкой росы на выходе менее -30 °С при атмосферном давлении, обеспечивающая работу с ракетой космического назначения среднего класса. Описаны существующие и перспективные методы подготовки и осушения воздуха с соответствующими принципиальными схемами для применения на стартовых комплексах. Научная новизна заключается в интеграции современных технологий, используемых в смежных отраслях промышленности, в конструктивные решения, применяемые при построении архитектуры систем термостатирования стартовых ракетных комплексов

Ключевые слова

Стартовый ракетный комплекс, система термостатирования, холодильная машина, мембранное разделение газов, мембранное осушение, адсорбция, роторный адсорбер

Поступила 07.02.2024

Принята 23.09.2024

© Автор(ы), 2025

Введение. При проектировании воздушных систем обеспечения температурного режима (ВСОТР) стартовых комплексов (СК) необходимо учитывать ряд технических и экономических параметров системы, влияющих на общую эффективность ее функционирования и эксплуатации. К таким параметрам относятся как технологичность (надежность, простота конструкции, ремонтпригодность, максимально возможная автоматизация процессов при эксплуатации), так и экономическая эффективность разработки и эксплуатации (энергопотребление, затраты на НИР, капитальные затраты на создание, эксплуатационные расходы) [1, 2].

Цель настоящей работы — рассмотреть и провести сравнительный анализ схем подготовки и осушения воздуха ВСОТР, проектируемых с применением перспективных технологий, позволяющих повысить тактико-технические и технико-экономические характеристики системы.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. В качестве предмета исследования предлагаются система термостатирования СК космического ракетного комплекса (КРК) среднего класса на космодроме «Восточный» и потенциальные способы повышения ее эффективности с применением современных технологий подготовки и осушения воздуха. Влажный воздух рассматривается как двухкомпонентная смесь влаги и сухого воздуха, процесс осушения в мембранном осушителе происходит изотермически при постоянном давлении. Все протекающие процессы принимаются идеальными, потери негерметичности системы не учитываются. В качестве рассматриваемого (наиболее энергоемкого) режима работы системы выбран летний режим (температура окружающей среды не более 40 °С). Энергопотребление насосов подачи в контурах оборотной воды и хладагентов сопоставимо с общей погрешностью расчета и считается пренебрежимо малым [3]. Для анализа рассматриваемых схем и оценки количественных результатов их применения принимается задача по подготовке термостатирующего воздуха до точки росы –30 °С при атмосферном давлении в соответствии с требованиями, налагаемыми перспективной ракетой космического назначения (РКН) среднего класса к проектированию СК на космодроме «Восточный» [2, 4]. Электронагреватель на выходе из системы, предназначенный для регулирования температуры потока, подаваемого в РКН, не указан на рассматриваемых схемах и в расчетах не учитывается, поскольку принимается идентичным по энергопотреблению всем рассмотренным в настоящей работе другим схемам.

Схема 1. Подготовка воздуха с вымораживанием влаги холодом пароконденсионной холодильной машиной (ПКХМ). Схемное решение системы термостатирования состоит из пяти основных контуров:

1) оборотной воды с температурой 25...30 °С; 2) хладагента с температурой 10...15 °С; 3) хладагента с температурой –35...–30 °С; 4) рекуперации; 5) воздушного контура.

Воздушный контур обеспечивает подвод термостатирующего воздуха с заданными параметрами к РКН и состоит из высоконапорного вентилятора и воздухоохладителей теплообменника (ТО), необходимых для поддержания требуемых параметров воздуха.

Жидкостные контуры (оборотной воды и хладагента) предназначены для подготовки и подачи жидкости заданной температуры в воздухоохладители линии подготовки воздуха.

Расчетная схема с ПКХМ приведена на рис. 1, а, *i-d*-диаграмма протекающих в системе процессов влагомассообмена — на рис. 1, б.

Процесс подготовки воздуха осуществляется следующим образом. Воздух поступает в систему через всасывающий воздуховод из атмосферы (т. 1, см. рис. 1, а). В линии подготовки воздуха установлено три секции воздухоохладителей: ТО₁ (оборотной водой), ТО₂ и ТО₃ (хладагентами с температурой 10...15 °С и –35...–30 °С).

В секции ТО₁ при температуре окружающей среды 40 °С воздух охлаждается до расчетных ~ 30...35 °С оборотной водой с максимальной температурой ~ 25...30 °С (т. 2, см. рис. 1, а). В секции ТО₂ воздух охлаждается контуром хладагента с температурой 10 °С до расчетных ~ 10...15 °С (т. 3) с одновременным влагоотделением. Образовавшийся конденсат отводится из всех ТО через общий трубопровод слива конденсата. В целях снижения энергопотребления холодильных машин перед ТО₃ воздух предварительно охлаждается до нулевой температуры (т. 4) в рекуператорах хладагентом, циркулирующим в контуре рекуперации. После охлаждения в рекуператорах воздух поступает на охлаждение в третью секцию воздухоохладителей ТО₃, где охлаждается до заданной температуры точки росы –30 °С (т. 5, см. рис. 1, а) хладагентом с температурой –35...–30 °С, охлаждаемым испарителями ПКХМ с уровнем кипения ниже нуля.

После охлаждения в третьей секции воздухоохладителей воздух проходит через рекуператор, в котором нагревается хладагентом до ~ 5 °С (т. 6, см. рис. 1, а) и направляется по распределительным магистралям к потребителям в РКН.

Основными преимуществами данной системы являются высокая технологичность и умеренные габаритные размеры оборудования, значительная степень отработки технологии (применение ПКХМ на всех СК «Союз»), схема может быть легко доработана в случае необходимости обеспечения

большей производительности по расходу термостатирующего воздуха путем установки дополнительной автономной линии подготовки воздуха в воздушный контур системы.

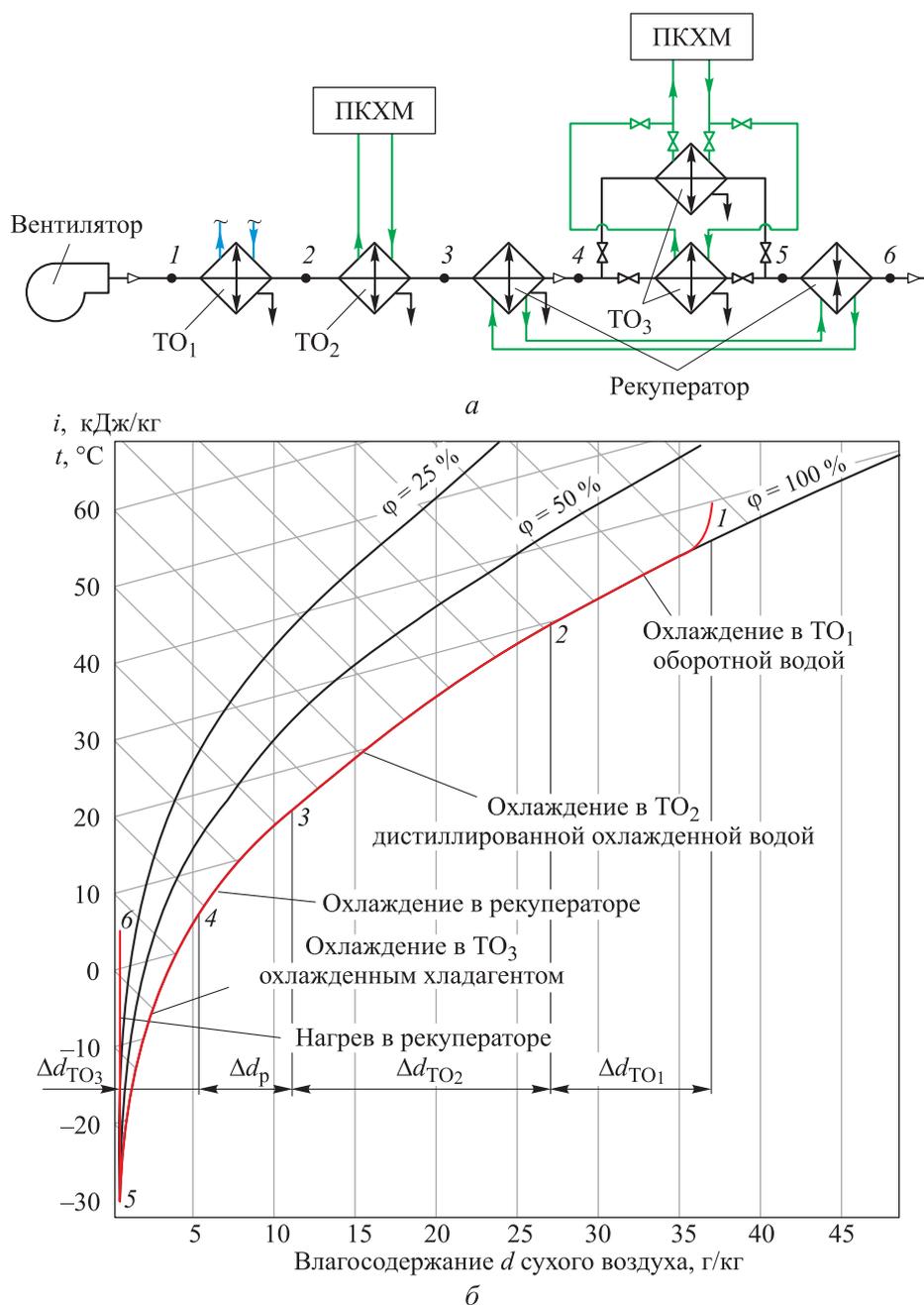


Рис. 1. Расчетная схема системы термостатирования с ПКХМ (контуры: — — воздушный, — — воды, — — хладагента) (а) и *i-d*-диаграмма протекающих процессов в схеме 1 подготовки воздуха (б)

Однако при отсутствии непрерывного функционирования ТО с хладагентом с отрицательной температурой может возникнуть эффект инееобразования и, как следствие, необходимость установки в процессе работы системы параллельного ТО с возможностью переключения для последующего оттаивания. Такой принцип работы повышает сложность схемы и может негативно повлиять на надежность системы, степень ее автоматизации и технологичность в целом.

Схема 2. Подготовка воздуха с применением воздушной холодильной машины (ВХМ). Расчетная схема системы подготовки воздуха с применением ВХМ приведена на рис. 2. Детандер в системе, кроме охлаждения потока воздуха за счет расширения воздуха, обеспечивает его осушение до заданного остаточного влагосодержания методом конденсации в $ТО_2$ и $ТО_3$ [5].

Поток воздуха сжимается компрессором до давления 20 атм (абс.). На первом этапе компримирования воздух охлаждается воздухоохладителями до температуры оборотной воды СК аналогично предыдущей рассмотренной схеме 1 [6]. Далее воздух с остаточным влагосодержанием поступает в $ТО_2$ и $ТО_3$ для осушения на более низком температурном уровне с помощью холодного обратного потока воздуха после его расширения в детандере (т. 6, см. рис. 2, а). При давлении 20 атм воздух в $ТО_2$ и $ТО_3$ охлаждается (с выделением конденсата) до $\sim 5...10$ °С (т. 4, см. рис. 2, а), что соответствует влагосодержанию воздуха с точкой росы -30 °С при атмосферном давлении. На выходе из системы поток вновь расширяется до низкого давления перед подачей потребителю.

Основным недостатком системы является чрезмерное энергопотребление при избыточном сжатии воздуха в целях его дальнейшего расширения и получения холода для осушения.

Указанные недостатки схем 1 и 2 подготовки воздуха накладывают потенциальные ограничения на возможность повышения степени осушения воздуха в ВСОТР, технологичности и автоматизации системы в целом, что вызывает необходимость рассматривать альтернативные способы подготовки воздуха.

Схема 3. Комбинированная схема подготовки воздуха с применением мембранных осушителей. Разработанная схема включает в себя линию подготовки воздуха, обеспечивающую термостатирование потребителей в РКН. С помощью компрессора на входе в систему давление воздуха поднимается до 4 атм (абс.) (т. 1, рис. 3, а). Повышенное давление необходимо для работы мембранных осушителей, принцип работы которых основан на разности парциальных давлений продувочного и осушаемого потоков воздуха [7, 8].

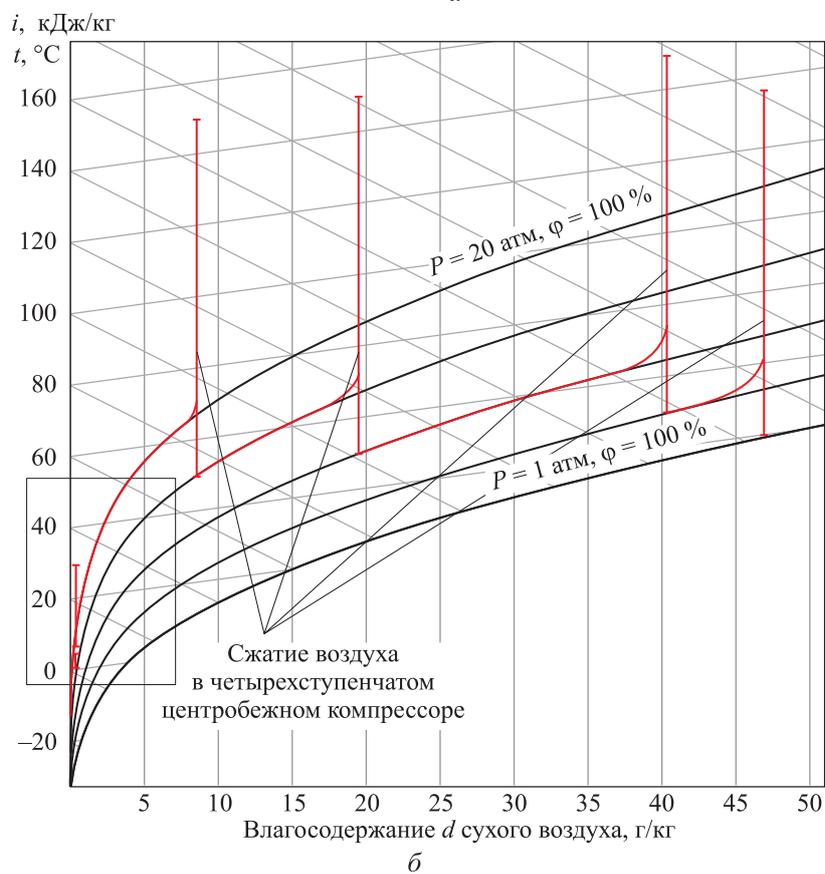
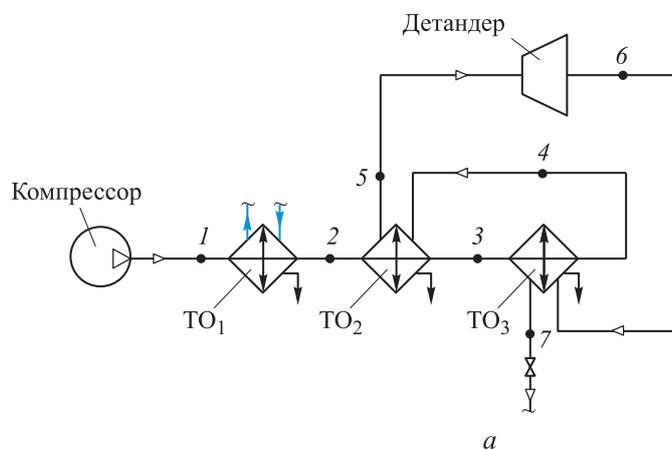


Рис. 2 (начало). Расчетная схема системы термостатирования с ВХМ (контур: — — воздушный, — — воды) (а) и i - d -диаграмма протекающих процессов в схеме 2 подготовки воздуха (б)

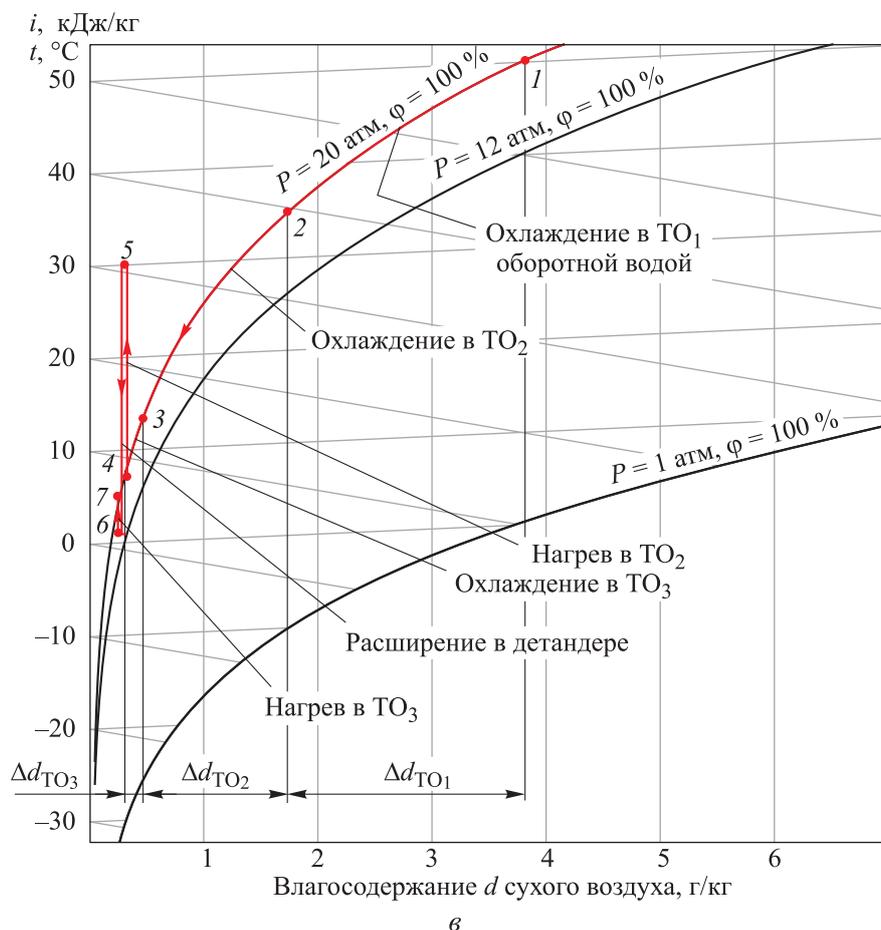


Рис. 2 (окончание). i - d -диаграмма протекающих процессов в схеме 2 подготовки воздуха после сжатия в компрессоре (в)

На первом этапе воздух охлаждается в $ТО_1$ оборотной водой до расчетной температуры $\sim 30 \dots 35$ °С (т. 2, см. рис. 3, а) аналогично схеме 1. Далее воздух в рекуператорах охлаждается хладагентом до $25 \dots 30$ °С, циркулирующим в контуре рекуперации (т. 3, см. рис. 3, а). В следующей секции $ТО_2$ воздух охлаждается до $\sim 0 \dots 5$ °С (т. 4, см. рис. 3, а) за счет холода, получаемого от холодильной машины. После охлаждения во второй секции воздухоохладителей воздух вновь проходит через рекуператор, в котором нагревается до $5 \dots 10$ °С (т. 5, см. рис. 3, а). На выходе из системы поток расширяется до низкого давления перед подачей потребителю. В отличие от схемы 1, вместо третьей секции воздухоохладителей для дальнейшего осушения воздуха установлен блок мембранных осушителей. Рекуперация в данной схеме позволяет уменьшить нагрузку на ПКХМ при охлаждении и осушении по-

тока на TO_2 , а также увеличить температуру потока перед входом в мембранный осушитель, что положительно влияет на эффективность мембранного осушения [9]. Расчетная схема и i - d -диаграмма протекающих процессов в схеме 3 подготовки воздуха приведены на рис. 3.

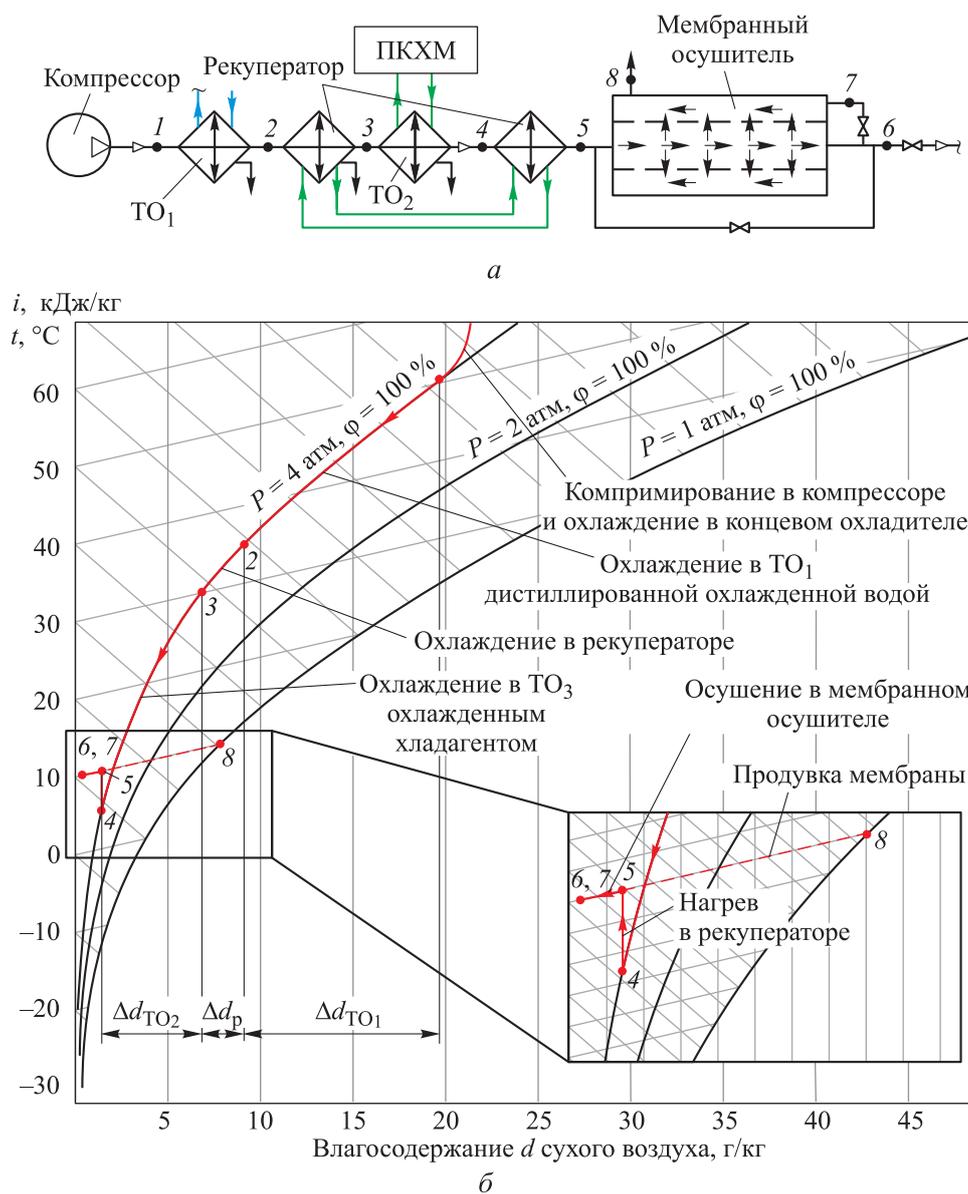


Рис. 3. Расчетная схема системы термостатирования с ПКХМ и мембранными осушителями (обозначение контуров см. рис. 1, а) (а) и i - d -диаграмма протекающих процессов в схеме 3 подготовки воздуха (б)

Основной принцип мембранной технологии заключается в избирательной проницаемости паров влаги через стенки некоторых материалов, называемых мембранами. Современные мембранные модули осушения выполнены в виде пучков полволоконных мембран с определенной пропускной способностью по отношению к молекулам H_2O [5].

Мембранный осушитель воздуха представляет собой модуль из специальных расположенных внутри цилиндрического корпуса полволоконных композитных стенок (мембран), способных пропускать влагу. Влага проникает через стенки при прохождении потока воздуха по модулю, а затем вытесняется из корпуса осушителя с частью осушенного воздуха, направленного обратным потоком. Основная часть осушенного воздуха выходит из корпуса и поступает к потребителю. Расчетная схема процессов разделения и переносов масс потоков, протекающих в мембранном осушителе процессов, приведена на рис. 4.

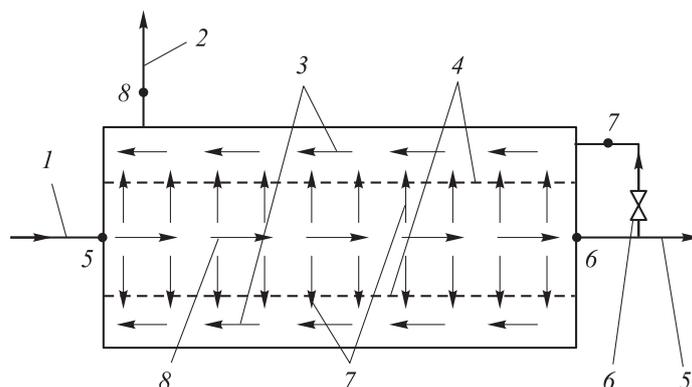


Рис. 4. Расчетная схема процессов разделения и переносов масс потоков, протекающих в мембранном осушителе сжатого воздуха:

- 1 — вход в мембрану; 2 — выход воздуха после продувки; 3 — продувка мембраны;
- 4 — полволоконная мембрана; 5 — выход к потребителю; 6 — дроссель;
- 7 — отведение влаги через мембрану; 8 — осушение воздуха (точки 5–8, см. рис. 3, а)

В качестве материалов в мембранных осушителях используют в основном композиционные материалы, имеющие высокие показатели проницаемости водяного пара и низкой проницаемости сухого воздуха (т. е. высокой селективности по данной паре газов). Немаловажными факторами являются высокая механическая прочность мембраны (поскольку материал работает на высоком давлении напорного потока) и геометрические параметры (возможность изготовления мембран малой толщины с высокой пористостью). В качестве примеров таких материалов можно привести полипропилен, полисульфон, поливинилиденфторид и другие гидрофильные полиме-

ры, содержащие сульфогруппы. В качестве пористой матрицы композиционного материала предлагается использование мембран, основанных на цеолитах, пористых стеклах, анодных оксидах алюминия или титана.

Процесс мембранного разделения газов полностью описывается феноменологическими законами диффузии (законы Фика) и растворения веществ (закон Генри). Процесс передачи влаги в мембранном осушителе прямо пропорционален градиенту парциального давления — основной движущей силе переноса паров воды [9]. Градиент парциального давления образуется за счет разности высокого давления на входе в мембрану и атмосферного давления продувочного потока.

Диапазон рабочих давлений мембранных осушителей варьируется в пределах 4...18 атм (абс.) [10–13]. В рассматриваемой системе отсутствует требование повышения давления термостатирующего воздуха, поэтому выбрано нижнее значение рабочего давления 4 атм в целях экономии энергопотребления на сжатие потока компрессором.

В схеме 3 мембранный осушитель выполняет функцию второй ступени осушения, что позволяет обеспечить подготовку воздуха до более высоких степеней осушения. Допускается вариативность получаемой кондиции осушаемого воздуха в процессе работы системы [14].

Доля потока воздуха ζ , затрачиваемого на продувку мембраны, может быть рассчитана на основании материального баланса влаги, зависит от степени осушения и определяется для конкретного режима работы по следующей формуле [3]:

$$\zeta = \frac{Q_8}{Q_5} = \frac{d_5 - d_6}{d_8 - d_6}. \quad (1)$$

При заданных условиях осушения воздуха до точки росы -30 °С и атмосферном давлении потери на продувку мембраны составляют ~ 15 % потока воздуха, сжимаемого на компрессоре. Расход воздуха, подаваемого компрессором, составит

$$Q_1 = Q_5 = \frac{Q_6}{1 - \zeta}. \quad (2)$$

Предлагаемая схема позволяет отказаться от параллельных охладителей вымораживания влаги холодом ПКХМ, работающих на режимах охлаждения в диапазоне отрицательных температур, что повышает общую технологичность и надежность системы, а также обеспечивает возможность получения более низких значений точек росы при подготовке воздуха и регулировку режима осушения непосредственно в процессе работы системы.

Недостатком схемы 3 являются потери на продувку мембраны, пропорциональные степени осушения в системе.

Схема 4. Комбинированная схема подготовки воздуха с применением роторного адсорбера. В промышленности широко применяется технология адсорбционного осушения газов, недостатком которой является наличие потерь на регенерацию сорбента, а также проскоков влаги при переключении адсорбционных колонн. Для достижения тех же показателей по степени осушения, что и в предыдущих схемах подготовки воздуха, но без потери осушаемого воздуха в промышленности применяются адсорбционные блоки, выполненные в виде вращающихся барабанов (роторов) [15]. Такой вариант комбинированной схемы подготовки воздуха аналогичен схеме 3, однако вместо мембранных осушителей в качестве второй ступени осушения воздуха устанавливается роторный адсорбер. Расчетная схема с интегрированным адсорбционным блоком роторного типа и $i-d$ -диаграмма протекающих процессов в схеме 4 подготовки воздуха приведены на рис. 5. Принципиальное отличие данной схемы заключается в использовании части (~ 20 %) потока сухого воздуха для регенерации адсорбента вместо влажного перегретого, применяющегося в традиционных схемах, с дальнейшей его подачей обратно в эжектор после повторного охлаждения с конденсацией влаги в ТО₃ [8]. В целях подогрева воздуха, подаваемого на регенерацию адсорбента, используется теплота рекуператора, а для охлаждения и конденсации влаги после регенерации — ПКХМ. Такое схемное решение приведено в составе с компрессором сжатия до 4 атм, обеспечивающим работу эжектора помимо рекуперации теплоты компримирования при регенерации адсорбента и позволяющим использовать более компактные барабаны с интенсивной работой сорбента [15]. По результатам осушения на роторном адсорбере влажность потока соответствует влагосодержанию воздуха с точкой росы -30 °С при атмосферном давлении. На выходе из системы поток вновь расширяется до низкого давления перед подачей потребителю.

Недостатком данной схемы является наличие дополнительных динамических составных частей, что может негативно повлиять на общую надежность, технологичность и ресурс. Применение ротационных адсорберов в ракетно-космической отрасли и их изготовление в данных целях, а также работа эжектора на низких давлениях требует проведения дополнительных исследований и проработки. К тому же необходимость охлаждения потока воздуха после регенерации дополнительно повышает энергопотребление ПКХМ.

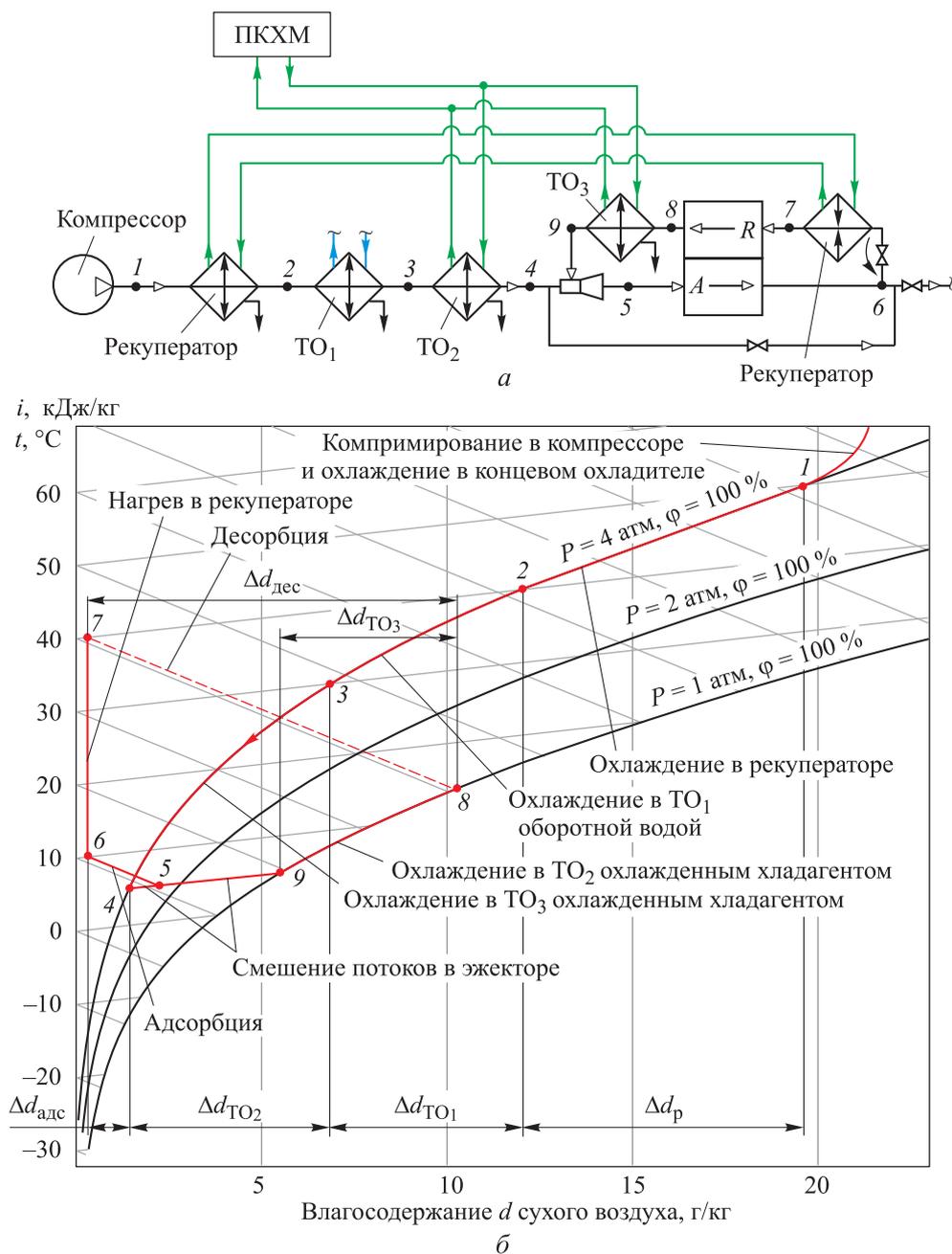


Рис. 5. Расчетная схема системы термостатирования с ПКХМ и роторным адсорбером (обозначение контуров см. рис. 1, а) (а) и i - d -диаграмма протекающих процессов в схеме 4 подготовки воздуха (б)

Анализ энергопотребления рассматриваемых схем подготовки воздуха. В целях сравнения энергоэффективности рассматриваемых схем целесообразно определить удельную энергоэффективность подготовки 1 кг/с

термостатирующего воздуха, осушенного до точки росы $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ при атмосферном давлении для каждой схемы.

В качестве основных потребителей энергии для рассматриваемых схем принимаются следующие агрегаты и узлы:

– высоконапорный вентилятор, ПКХМ первой ступени подготовки воздуха и ПКХМ второй ступени с охладителями вымораживания влаги (схема 1);

– четырехступенчатый центробежный компрессор сжатия до 20 атм (абс.) (схема 2);

– двухступенчатый центробежный компрессор сжатия до 4 атм (абс.) (обеспечивающий расход с учетом потерь на мембранном осушителе), ПКХМ (схема 3);

– двухступенчатый центробежный компрессор сжатия до 4 атм (абс.), ПКХМ (обеспечивающая в том числе охлаждение потока после регенерации сорбента) (схема 4).

Удельное энергопотребление вентилятора для схемы 1 [16]:

$$N_{\text{в}} = \frac{k\Delta P}{1000\rho\eta_{\text{в}}\eta_{\text{м.п}}}, \quad (3)$$

где k — коэффициент запаса мощности; ΔP — разность давлений на входе и выходе из высоконапорного вентилятора; ρ — плотность воздуха; $\eta_{\text{в}}$, $\eta_{\text{м.п}}$ — КПД вентилятора и механической передачи.

Удельное энергопотребление многоступенчатых центробежных компрессоров для схем 2, 3 и 4 [16]:

$$N_{\text{к}} = \frac{mnRT_0}{1000(n-1)\eta_{\text{к}}} \left(\varepsilon_i^{(n-1)/n} - 1 \right), \quad (4)$$

где m — число ступеней; n — показатель политропы сжатия; R — газовая постоянная воздуха; T_0 — температура газа на входе в компрессор; $\eta_{\text{к}}$ — КПД компрессора (с учетом КПД привода); $\varepsilon_i = \sqrt[n]{\varepsilon}$ — степень сжатия в одной ступени (ε — суммарная степень сжатия компрессора).

Коэффициент полезного действия компрессора [17]:

$$\eta_{\text{к}} = \eta_{\text{м}}\eta_{\text{ад}}\eta_{\text{эд}}\eta_{\text{м.п}}\eta_{\text{об}}\eta_{\text{г}}, \quad (5)$$

где $\eta_{\text{м}}$, $\eta_{\text{ад}}$ — механический и адиабатный КПД компрессора; $\eta_{\text{эд}}$ — КПД электродвигателя; $\eta_{\text{об}}$, $\eta_{\text{г}}$ — объемный (потери на утечки газа) и гидравлический (потери на гидравлические сопротивления) КПД [16–18].

Для оценки удельного энергопотребления ПКХМ для схем 1, 3 и 4 подготовки воздуха проведены соответствующие тепловые расчеты [19].

В качестве исходных данных принята температура наружного воздуха $t_H = 40$ °С; начальная температура воздуха $t_{\text{воз.вх}}$, поступающего в ТО₂, температура воздуха $t_{\text{воз.вых}}$, поступающего потребителю. В качестве рабочего тела (хладагента) принимается дифторхлорметан (хладагент R22). Изменение температуры воздуха в ТО₂ определяется как $\Delta t = t_{\text{воз.вх}} - t_{\text{воз.вых}}$, температура конденсации хладагента R22 — как $t_K = t_H + (10...20)$ °С [19].

Данные полученных рабочих режимов ПКХМ для рассматриваемых схем приведены на диаграмме $\lg P - i$ (рис. 6). На основании полученных диаграмм для каждой точки определены значения температур t и энтальпий i хладагента.

Удельные тепловая нагрузка на конденсатор и объемный расход пара хладагента, поступающего в компрессор, с учетом полученных значений определяются по следующим формулам [19]:

$$q_k = g_a(i_3 - i_5); \quad (6)$$

$$V_a = \frac{\Delta i_{\text{воз}} v_a}{i_1 - i_6}, \quad (7)$$

где $g_a = \frac{\Delta i_{\text{воз}}}{i_1 - i_6}$ — удельный массовый расход хладагента R22, циркулирующего в холодильной машине; $v_a = 0,024$ м³/кг — удельный объем пара хладагента R22; $\Delta i_{\text{воз}}$ — разность энтальпий воздуха на входе и выходе из воздухоохладителя.

Удельная потребляемая мощность компрессора ПКХМ:

$$N_{\text{к_ПКХМ}} = \frac{g_a(i_3 - i_2)}{\eta_i \eta_m \eta_{\text{эд}}}, \quad (8)$$

где $\eta_i = T_0 / T_K$ — индикаторный КПД холодильного компрессора [19].

Результаты. Данные, полученные в результате анализа рассматриваемых схем подготовки воздуха и соответствующих расчетов удельного энергопотребления, приведены в таблице и на рис. 7.

Согласно данным, приведенным в таблице, комбинированная схема 4 с ПКХМ и роторным адсорбером является наиболее энергоэффективной по сравнению с альтернативными. Тем не менее показатель энергозатрат на подготовку 1 кг/с воздуха для схемы 3 с мембранным осушением практически идентичен аналогичным затратам в схемах 1 и 4.

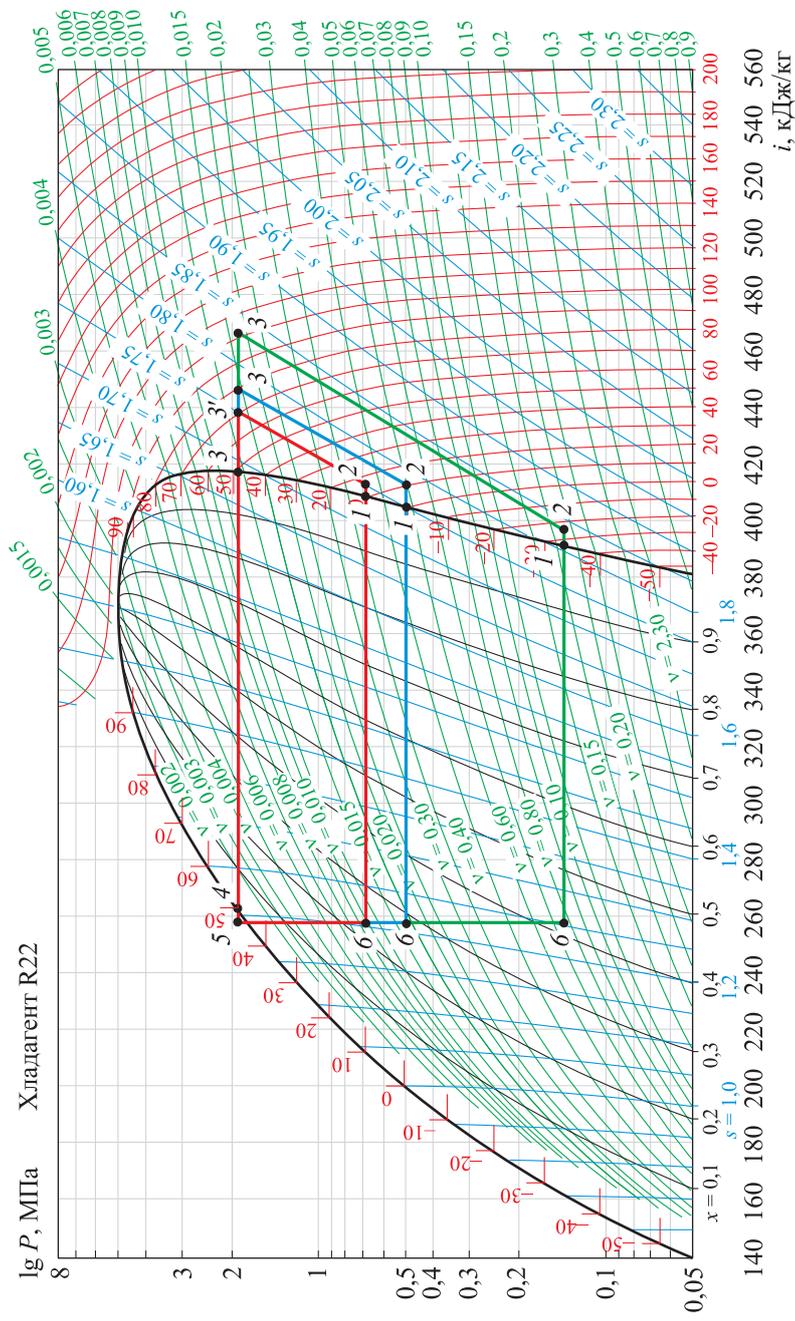


Рис. 6. Диаграмма $\lg P - i$ процессов рабочего цикла ПКХМ (— и — — первая и вторая ступени подготовки воздуха, схема 1, — — схемы 3 и 4) при охлаждении воздуха:

1-2 — изобарический перегрев паров хладагента R22 в испарителе; 2-3 — адиабатное сжатие пара в компрессоре;

3-3' — охлаждение перегретого пара при постоянном давлении; 3'-4 — конденсация пара при постоянных давлении и температуре;

4-5 — переохлаждение хладагента; 5-6 — процесс дросселирования хладагента; 6-1 — кипение хладагента в испарителе

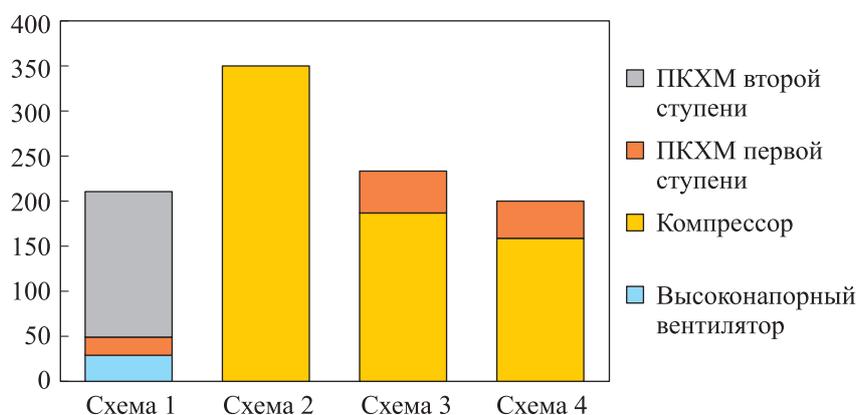


Рис. 7. Диаграмма данных сравнительного анализа схем подготовки воздуха

Результаты сравнительного анализа

Номер схемы	Потребитель	Удельное энергопотребление потребителем, кВт · с/кг	Суммарное удельное энергопотребление, кВт · с/кг
1	Высоконапорный вентилятор	30,08	210,4
	ПКХМ первой ступени	21,40	
	ПКХМ второй ступени	158,95	
2	Компрессор	351,41	351,4
3	Компрессор	187,85	234,2
	ПКХМ	46,39	
4	Компрессор	159,67	201,3
	ПКХМ	41,64	

Комбинированная схема 3 с ПКХМ и мембранным осушителем хотя и имеет более высокие удельные энергозатраты на подготовку воздуха по сравнению со схемой 4, позволяет избежать основных технических сложностей, связанных с необходимостью дополнительной проработки возможности применения роторных адсорберов и требуемых температур для их регенерации, так как основные производители и поставщики данного оборудования позиционируют роторные адсорберы как оборудование для осушения именно сжатого нагретого до высоких значений температуры и давления воздуха [5, 7, 8, 20].

Комбинированные схемы 3 и 4 с мембранным осушителем и роторным адсорбером позволяют избежать основных технических сложностей и недостатков схемы 1, таких как параллельная установка и размораживание

нагревателями охладителей с вымораживаем влаги холодом ПКХМ. Кроме того, по сравнению со схемой 2 с ВХМ эти решения указывают на значительно большую энергоэффективность, при этом сохраняются простота конструкции и надежность, свойственные схемам с ВХМ.

Заключение. В комбинированных схемах 3 и 4 подготовки воздуха с использованием мембранных осушителей и роторных адсорберов учтены все преимущества классических способов подготовки воздуха на СК (с использованием ВХМ или ПКХМ) и нивелированы все их недостатки. Следовательно, приведенные схемные решения являются наиболее перспективными для применения и развития в системах термостатирования стартовых ракетных комплексов, в особенности для обеспечения подготовки воздуха с высокой степенью осушения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Матвеева О.П., Чугунков В.В., Семячков Д.А. Системное проектирование наземного технологического оборудования технических и стартовых ракетных комплексов. В кн.: *Контроллинг в экономике, организации производства и управлении: шансы и риски цифровой экономики*. М., Объединение контроллеров, 2019, с. 158–162. EDN: XTCFJE
- [2] Александров А.А., Бармин И.В., Денисов О.Е. и др. Инновационные направления в развитии и эксплуатации наземной космической инфраструктуры технических комплексов космодромов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, № 5. EDN: URILKI. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-5-1765>
- [3] Бармин И.В., Козлов В.В., Крылов П.В. и др. Современные тенденции развития мембранных технологий и их применения в системах термостатирования стартовых ракетных комплексов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, № 4. EDN: WZKEZF. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-4-2172>
- [4] Баранов Д.А., Еленев В.Д., Смородин А.В. Принципы построения систем и объектов космического ракетного комплекса среднего класса повышенной грузоподъемности. *Вестник СГАУ им. академика С.П. Королёва*, 2012, № 2, с. 25–34. EDN: OHHLUE
- [5] 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, № 9. EDN: MTMAXB. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-9-2111>
- [6] Кобызев С.В. Методика расчета коэффициентов массоотдачи при осушке углеводородного ракетного топлива. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2011, № 11, с. 49. EDN: OKIHLT

[7] 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 Conf. Proc.*, 2019, vol. 2141, no. 1, art. 030029. EDN: OYNKBC.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.5122079>

[8] Козлов В.В., Шадрин В.С., Подчуфаров А.А. Современные тенденции развития техники осушения сжатого воздуха в компрессорных станциях промышленных предприятий. *Тр. XVII Междунар. науч.-техн. конф. по компрессорной технике*. Казань, 2017, с. 429–435.

[9] Мордовская А.А. Мембранные технологии и их применение. *Сб. IX Междунар. студ. науч. конф. «Студенческий научный форум»*. М., Академия естествознания, 2017. EDN: XVZKVT

[10] Scott J. Hollow fibers. Manufacture and application. New Jersey, Noyes Data Corp. Park Ridge, 1981.

[11] Emonds S., Roth H., Wessling M. Chemistry in a spinneret — formation of hollow fiber membranes with a cross-linked polyelectrolyte separation layer. *J. Membr. Sc.*, 2020, vol. 612, no. 4, art. 118325. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118325>

[12] Дытнерский Ю.И. Мембранные процессы разделения жидких смесей. М., Химия, 1975.

[13] Абдуллин И.Ш., Ибрагимов Р.Г., Парошин В.В. и др. Композиционные мембраны. *Вестник Казанского технологического университета*, 2012, № 15, с. 67–75.

EDN: PESTZX

[14] Козлов В.В., Крылов П.В., Михайлова И.П. и др. Модернизация турбодетандерной установки системы термостатирования стартового комплекса путем применения мембранных блоков осушения воздуха. *Компрессорная техника и пневматика*, 2022, № 3, с. 42–47. EDN: ASGJES

[15] 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. 132–137.

[16] Кауров И.В., Ткаченко И.С., Салмин В.В. Методика проектирования системы обеспечения теплового режима малых космических аппаратов и верификация математических моделей на основе данных телеметрии. *Вестник МАИ*, 2021, т. 28, № 3, с. 113–129. EDN: RURCYO. DOI: <https://doi.org/10.34759/vst-2021-3-113-129>

[17] Кауров И.В. Методика проектирования системы обеспечения теплового режима малых космических аппаратов и ее верификация на базе опытно-эксплуатационной отработки. Дис. ... канд. техн. наук. Самара, Самарский университет, 2022.

[18] Землянский Б.А., Анфимов Н.А., Балько Ю.П. и др. Методологические основы научных исследований при обосновании направлений космической деятельности, облика перспективных космических комплексов и систем их научно-технического сопровождения. Т. 4. Методология исследований аэротермодинамики и тепловых режимов в обеспечение разработки изделий ракетно-космической техники. М., Дашков и К, 2016.

[19] Chugunkov V.V., Komlev D.S. Modeling the air flow and heat transfer characteristics in the ground-based complex vehicle cargo compartments during rocket equipment transportation. *AIP Conf. Proc.*, 2021, vol. 2318, no. 1, art. 100001.

DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0036227>

[20] Бармин И.В., Зверев В.А., Украинский А.Ю. и др. Обоснование некоторых основных характеристик стартового оборудования космодромов XXI века. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 3. EDN: RCSAHZ.

DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-3-630>

Крылов Петр Владимирович — инженер-конструктор 2-й категории отдела комплексного проектирования филиала АО «ЦЭНКИ» — НИИ СК (Российская Федерация, 119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 2); аспирант кафедры «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Абросимов Николай Анатольевич — главный конструктор по созданию стартовых комплексов филиала АО «ЦЭНКИ» — НИИ СК (Российская Федерация, 119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 2).

Черкасов Илья Анатольевич — канд. техн. наук, директор, главный конструктор ООО «ОКБ СХМ Технатон» (Российская Федерация, 111401, Москва, 1-я Владимирская ул., д. 25, корп. 1).

Козлов Владимир Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Ксенофонтова Екатерина Анатольевна — инженер отдела эксплуатации стартовых комплексов филиала АО «ЦЭНКИ» — НИИ СК (Российская Федерация, 119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 2).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Крылов П.В., Абросимов Н.А., Черкасов И.А. и др. Перспективные схемы подготовки и осушения воздуха в системах обеспечения температурного режима стартовых ракетных комплексов среднего класса. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2025, № 1 (152), с. 14–36. EDN: UZVMNK

PERSPECTIVE SCHEMES FOR AIR PREPARATION AND DRYING IN THE AIR TEMPERATURE CONTROL SYSTEMS OF THE MEDIUM-CLASS ROCKET LAUNCH COMPLEXES

P.V. Krylov^{1,2}

p.krylov@russian.space

N.A. Abrosimov¹

n.abrosimov@russian.space

I.A. Cherkasov³

chermont@mail.ru

V.V. Kozlov²

vladimir.kozlov@bmstu.ru

E.A. Ksenofontova¹

e.ksenofontova@russian.space

¹JSC “TsENKI” — Launch Complexes Research Institute,
Moscow, Russian Federation

²BMSTU, Moscow, Russian Federation

³LLC Experimental Design Bureau of Special Refrigeration Machines Technaton,
Moscow, Russian Federation

Abstract

Due to the tightening commercial confrontation in the global market of space services and astronautics, the leading space agencies clearly demonstrate their interest in economic optimization of the space launch pricing, which includes reducing the capital investment and specific costs. This factor affects strengthening the role of the technological equipment power efficiency of a launch complex relative to its other parameters. The paper considers a scheme of air preparation and dehumidification in the air systems in ensuring the temperature regime by using the promising technologies. It presents an air temperature control system with the required dew point at the output of less than -30 °C at the atmospheric pressure operating with the medium-class space rockets. The paper describes the existing and promising methods in air preparation and dehumidification with the corresponding basic schemes for implementation at the launch complexes. Scientific novelty lies in integration of the modern technologies used in the related industries and design solutions in constructing the air temperature control system architecture for the rocket launch complexes

Keywords

Launch complex, air temperature control system, refrigerator, membrane gas separation, membrane drying, adsorption, rotary adsorber

Received 07.02.2024

Accepted 23.09.2024

© Author(s), 2025

REFERENCES

[1] Matveeva O.P., Chugunkov V.V., Semyachkov D.A. Sistemnoe proektirovanie nazemnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya tekhnicheskikh i startovykh raketnykh kompleksov [System design of ground processing equipment of technical and launch

complexes]. V kn.: *Kontrolling v ekonomike, organizatsii proizvodstva i upravlenii: shansy i riski tsifrovoy ekonomiki* [In: Controlling in economics, production organisation and management: chances and risks of the digital economy]. Moscow, Obedinenie kontrolerov Publ., 2019, pp. 158–162 (in Russ.). EDN: XTCFJE

[2] Aleksandrov A.A., Barmin I.V., Denisov O.E., et al. 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, no. 5 (in Russ.). EDN: URILKI.

DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-5-1765>

[3] Barmin I.V., Kozlov V.V., Krylov P.V., et al. Modern trends in the development of membrane technologies and their application in launch complex thermostatic control systems. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2022, no. 4 (in Russ.). EDN: WZKEZF.

DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-4-2172>

[4] Baranov D.A., Elenev V.D., Smorodin A.V. Principles of constructing systems and objects of a middle-class space rocket complex with increased load-carrying capacity. *Vestnik SGAU im. akademika S.P. Koroleva*, 2012, no. 2, pp. 25–34 (in Russ.). EDN: OHHLUE

[5] Kozlov V.V., Krylov P.V., Piskun E.S. Analysis of perspective air preparation network designs in launch complex temperature control systems. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2021, no. 9 (in Russ.).

EDN: MTMAXB. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-9-2111>

[6] Kobzyev S.V. Method of calculating mass transfer coefficients during drying of hydrocarbon rocket fuel. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education: Scientific Publication], 2011, no. 11 (in Russ.). EDN: OKIHLLT

[7] 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 Conf. Proc.*, 2019, vol. 2141, no. 1, art. 030029. EDN: OYNKBC.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.5122079>

[8] Kozlov V.V., Shadrin V.S., Podchufarov A.A. [Modern trends in the development of compressed air dehumidification technology in compressor stations of industrial enterprises]. *Tr. XVII Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. po kompressornoj tekhnike* [Proc. XVII Int. Sc. Tech. Conf. on Compressor Technology]. Kazan, 2017, pp. 429–435 (in Russ.).

[9] Mordovskaya A.A. [Membrane technologies and their application]. *Sb. IX Mezhdunar. stud. nauch. konf. "Studencheskiy nauchnyy forum"* [Proc. IX Int. Student Sc. Conf. Student Scientific Forum]. Moscow, Akademiya estestvoznaniya Publ., 2017. EDN: XVZKVT

[10] Scott J. Hollow fibers. Manufacture and application. New Jersey, Noyes Data Corp. Park Ridge, 1981.

[11] Emonds S., Roth H., Wessling M. Chemistry in a spinneret — formation of hollow fiber membranes with a cross-linked polyelectrolyte separation layer. *J. Membr. Sc.*, 2020, vol. 612, no. 4, art. 118325. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118325>

[12] Dytnerskiy Yu.I. Membrannye protsessy razdeleniya zhidkikh smesey [Membrane processes of separation of liquid mixtures]. Moscow, Khimiya Publ., 1975.

[13] Abdullin I.Sh., Ibragimov R.G., Paroshin V.V., et al. Composite membranes. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2012, no. 15, pp. 67–75 (in Russ.).

EDN: PESTZX

[14] Kozlov V.V., Krylov P.V., Mikhaylova I.P., et al. Air turboexpander temperature control system modernisation with membrane dryers. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika* [Compressors & Pneumatics], 2022, no. 3, pp. 42–47 (in Russ.). EDN: ASGJES

[15] Kozlov V.V. Efficiency of compressed air dehumidifiers of condensation type. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2011, spec. iss. Vacuum and compressor machines and pneumatic equipment, pp. 132–137 (in Russ.).

[16] Kaurov I.V., Tkachenko I.S., Salmin V.V. Design technique for small spacecraft thermal control system and mathematical models verification based on telemetry data. *Vestnik MAI* [Aerospace MAI Journal], 2021, vol. 28, no. 3, pp. 113–129 (in Russ.).

EDN: RURCYO. DOI: <https://doi.org/10.34759/vst-2021-3-113-129>

[17] Kaurov I.V. Metodika proektirovaniya sistemy obespecheniya teplovogo rezhima mal'kikh kosmicheskikh apparatov i ee verifikatsiya na baze opytno-ekspluatatsionnoy otrabotki. Dis. kand. tekhn. nauk [Method of designing a system for ensuring the thermal regime of small spacecraft and its verification on the basis of experimental and operational work. Cand. Sc. (Eng.). Diss.]. Samara, Samara University, 2022 (in Russ.).

[18] Zemlyanskiy B.A., Anfimov N.A., Balyko Yu.P., et al. Metodologicheskie osnovy nauchnykh issledovaniy pri obosnovanii napravleniy kosmicheskoy deyatel'nosti, oblika perspektivnykh kosmicheskikh kompleksov i sistem ikh nauchno-tekhnicheskogo soprovozhdeniya. T. 4. Metodologiya issledovaniy aerotermodinamiki i teplovykh rezhimov v obespechenie razrabotki izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki [Methodological foundations of scientific research in substantiating the directions of space activities, the appearance of promising space complexes and systems of their scientific and technical support. Vol. 4. Methodology of research on aerothermodynamics and thermal regimes to ensure the development of products of rocket and space technology]. Moscow, Dashkov i K Publ., 2016.

[19] Chugunkov V.V., Komlev D.S. Modeling the air flow and heat transfer characteristics in the ground-based complex vehicle cargo compartments during rocket equipment transportation. *AIP Conf. Proc.*, 2021, vol. 2318, no. 1, art. 100001.

DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0036227>

[20] Barmin I.V., Zverev V.A., Ukrainskiy A.Yu., et al. Justification of some basic characteristics for the launch equipment of the 21st Century spaceports. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 3 (in Russ.).

EDN: RCSAHZ. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-3-630>

Krylov P.V. — Design Engineer of the 2nd category, Department of Integrated Design, Branch of the JSC “TsENKI” — Launch Complexes Research Institute (Vernadskogo prospekt 101, korp. 2, Moscow, 119526 Russian Federation); Post-Graduate Student, Department of Rocket Launch Complexes, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Abrosimov N.A. — Chief Designer for Creation of the Launch Complexes, Branch of the JSC “TsENKI” — Launch Complexes Research Institute (Vernadskogo prospekt 101, korp. 2, Moscow, 119526 Russian Federation).

Cherkasov I.A. — Cand. Sc. (Eng.), Director, Chief Designer, LLC Experimental Design Bureau of Special Refrigeration Machines Technaton (1-ya Vladimirskaya ul. 25, korp. 1, Moscow, 111401 Russian Federation).

Kozlov V.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Vacuum and Compressor Equipment, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Ksenofontova E.A. — Engineer, Department of Launch Complexes Operation, Branch of the JSC “TsENKI” — Launch Complexes Research Institute (Vernadskogo prospekt 101, korp. 2, Moscow, 119526 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Krylov P.V., Abrosimov N.A., Cherkasov I.A., et al. Perspective schemes for air preparation and drying in the air temperature control systems of the medium-class rocket launch complexes. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2025, no. 1 (152), pp. 14–36 (in Russ.). EDN: UZVMNK