

Анализ перспективных технологических схем подготовки воздуха в системах термостатирования стартовых комплексов

© В.В. Козлов, П.В. Крылов, Е.С. Пискун

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

Цель исследования — провести сопоставительный анализ систем подготовки сжатого воздуха по влагосодержанию. Рассмотрены традиционные и перспективные способы осушения сжатого воздуха с использованием методов конденсации, адсорбции и мембранной технологии. Представлена система термостатирования с требуемой точкой росы на выходе $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ при нормальных условиях, что соответствует температуре точки росы $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ при давлении $1,0\text{ МПа}$, т. е. 4-му классу чистоты по ГОСТ Р ИСО 8573-1–2016. Описаны основные преимущества применения перспективных технологических схем осушения, в том числе технологической схемы современного осушителя с ротационным адсорбером, которая обеспечивает понижение температуры точки росы сжатого воздуха до $-25\text{...}-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ на уровне давления $1,0\text{ МПа}$ без потерь на регенерацию адсорбента. Научная новизна работы заключается в анализе применимости современных адсорбционных и мембранных модулей к задачам на стартовом ракетном комплексе. Анализ всех рассмотренных в статье технологических схем осушения воздуха применительно к системам термостатирования на базе воздушных холодильных машин проведен с использованием i - d диаграммы влажного воздуха для переменных давлений.

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

Введение. Влагосодержание воздуха как теплоносителя является одним из важных параметров воздушных систем обеспечения температурного режима (ВСОТР) на стартовых ракетных комплексах помимо температуры. Влажность воздуха для ВСОТР регламентируется федеральным стандартом ГОСТ Р ИСО 8573-1–2016 «Сжатый воздух. Часть 1. Загрязнения и классы чистоты» и отраслевым стандартом ОСТ 92-1577–78 «Воздух сжатый. Азот газообразный». В статье проведен сопоставительный анализ технологических схем подготовки сжатого воздуха по влагосодержанию для расширения возможностей современных и перспективных систем ВСОТР с целью повышения степени осушки воздуха, подаваемого потребителю, что соответствует инновационным направлениям развития и эксплуатации наземной космической инфраструктуры [1].

Методы и принятые допущения. В качестве примера рассмотрим рабочий режим системы термостатирования, в которой для охлаждения и осушения потока воздуха используется цикл воздушной

холодильной машины [2, 3]. При давлении 1,0 МПа и температуре +3 °С на входе в объект термостатирования влагосодержание воздуха должно составлять не более 0,35 г/кг сухого воздуха, что соответствует относительной влажности около 100 % при давлении 1,0 МПа. Анализ возможных технологических схем осушения в данной системе проведен с использованием *i-d* диаграммы влажного воздуха для переменных давлений. Все протекающие процессы приняты идеальными, процессы расширения и сжатия воздуха — адиабатическими, потери не учитываются.

Традиционная схема осушения. Традиционная технологическая схема ВСОТР представлена на рис. 1. Детандер в данной системе наряду с охлаждением потока воздуха ВСОТР за счет расширения до рабочего давления 1,0 МПа обеспечивает осушение методом конденсации в теплообменниках Т03 и Т04 до заданного остаточного влагосодержания [4, 5].

Поток воздуха поступает в систему термостатирования из пневмосети с давлением 1,6 МПа, после чего дополнительным бустеркомпрессором давление поднимается до 1,8 МПа. Охлаждение воздуха на каждом этапе (1–10) компримирования производится воздухоохладителями на уровне температуры оборотной воды предприятия (окружающей среды) [6]. При этом из потока воздуха за счет конденсации суммарно отводится около 70 % содержащейся во входящем воздухе влаги.

Далее с остаточным влагосодержанием (в летнее время — около 1 г/кг) воздух поступает в теплообменные аппараты ВСОТР Т03

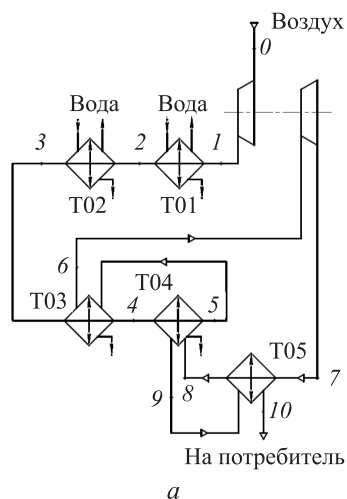
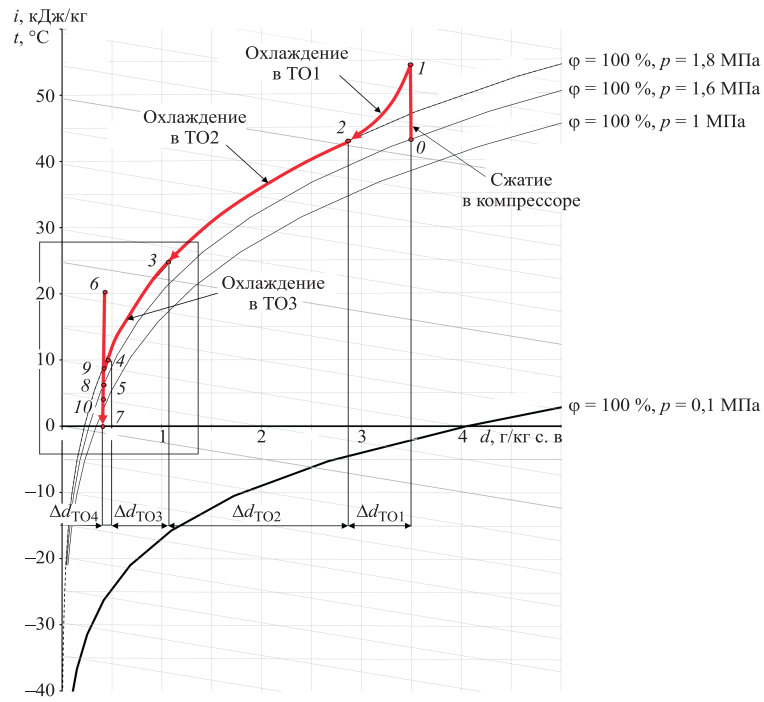
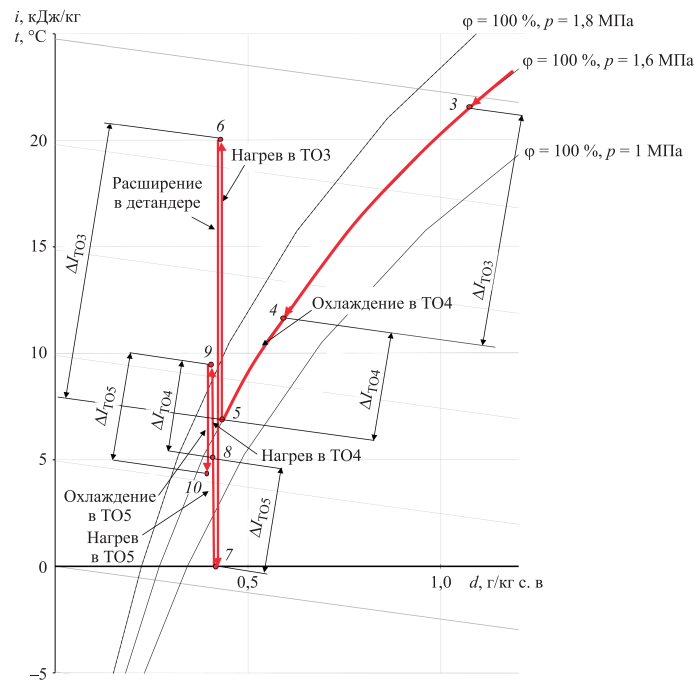


Рис. 1 (начало). Традиционная технологическая схема ВСОТР с каскадом теплообменников (а) для переменных давлений

и Т04 для осушения на более низком температурном уровне с помощью холодного обратного потока воздуха после его расширения в детандере (точка 7 на рис. 1). На уровне давления 1,8 МПа воздух охлаждается в Т03 и Т04 с выделением конденсата при температуре поверхности не ниже +6 °С, чтобы исключить возможность обмерзания аппаратов. В результате воздух ВСОТР осушается до температуры точки росы около +7 °С при давлении 1,8 МПа (точка 5 на рис. 1). 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). Очевидно, что дальнейшее



б



б

Рис. 1 (окончание). Процессы осушения на i - d диаграмме влажного сжатого воздуха (б) для переменных давлений

снижение влагосодержания воздуха за счет конденсации невозможно из-за перехода при температуре ниже 0 °С режима конденсации в режим инееобразования [7].

Другой недостаток конденсационного осушения сжатого воздуха — известное явление туманообразования над поверхностью охлаждения в теплообменниках при определенных режимных параметрах. Это накладывает некоторые ограничения из-за опасности образования шлейфа тумана над поверхностью за счет перехода состояния влажного воздуха в зону пересыщения (тумана) и снижает эффективность подготовки воздуха в системе, а также повышает реальные параметры влажности над заданными расчетными [8]. Так, образование только 0,1 г влажного тумана в 1 кг осушаемого воздуха на уровне температуры +3 °С и при давлении 1,0 МПа повышает температуру точки росы осушенного воздуха на 5...10 °С. Следовательно, эффективная работа традиционной схемы подготовки воздуха, представленной на рис. 1, в значительной степени зависит от стабильности режимных параметров и поддержания минимальных температурных напоров в теплообменниках-осушителях [7, 8].

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 с адсорбционным осушением по TSA-технологии. Известно, что наиболее распространенной технологией осушения сжатого воздуха на уровне давления 1,0 МПа для достижения низких температур точки росы является адсорбция.

Классическими в промышленности являются двухколонные осушители, выполненные по схемам TSA-технологии горячей регенерации (Thermal Swing Adsorption) или PSA-технологии холодной регенерации (Pressure Swing Adsorption). При расходах сжатого воздуха от 50 до 250 Н·м³/мин общепризнано применение схем с горячей регенерацией адсорбента как менее энергозатратных в данном диапазоне.

При всем многообразии технологических схем с горячей регенерацией адсорбента можно выделить среди них две: системы, использующие для регенерации тепло компримирования, и системы, в которых для этого применяются посторонние источники энергии. Поскольку на данном этапе ввиду удаленности от компрессорной станции ВСОТР не располагает теплом компримирования в достаточных количествах (температура воздуха регенерации должна быть выше 100 °С), наиболее приемлемой могла бы быть схема (рис. 2) с регенерацией адсорбента атмосферным воздухом с электроподогревом [7].

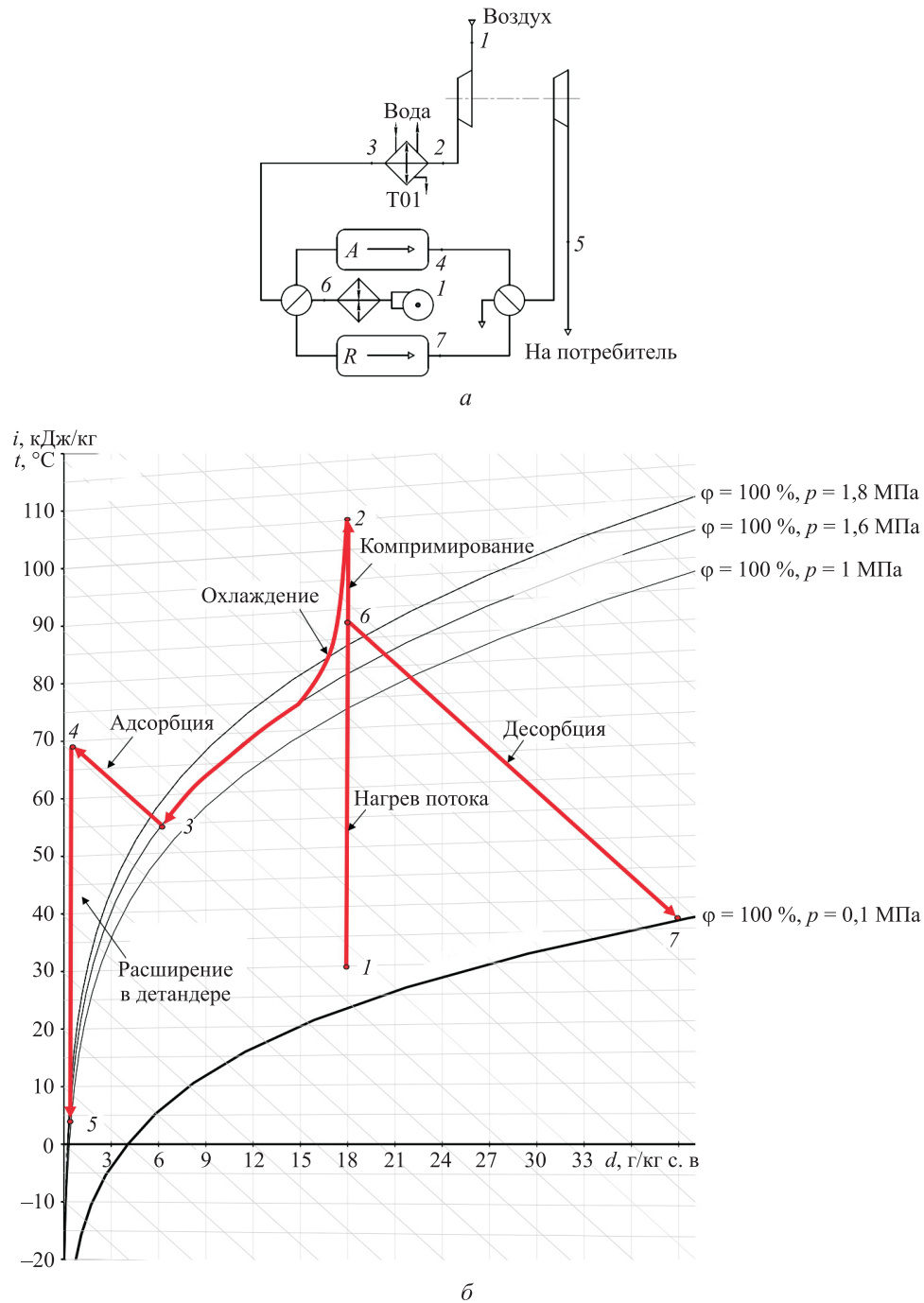
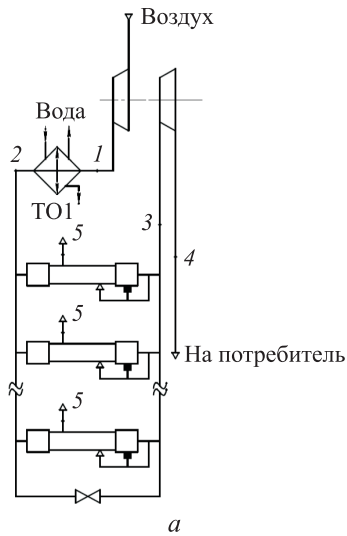


Рис. 2. Схема (а) и процессы в системе с адсорбционным осушением по TSA-технологии на $i-d$ диаграмме влажного воздуха (б)

Следует отметить, что несмотря на широкую распространенность данных аппаратов в промышленности, они обладают определенным недостатком, связанным с циклическим переключением двух колонн



с адсорбентом в процессе осушки и регенерации. В результате на выходе такой установки в процессе каждого цикла может наблюдаться некоторый проскок влаги, что недопустимо с точки зрения надежности рассматриваемых систем [7].

Схема осушения с мембранными блоками. Более привлекательными для обеспечения стабильности параметра влагосодержания на выходе ВСОТР могут быть мембранные технологические схемы и технологические схемы с роторными (вращающимися) адсорберами.

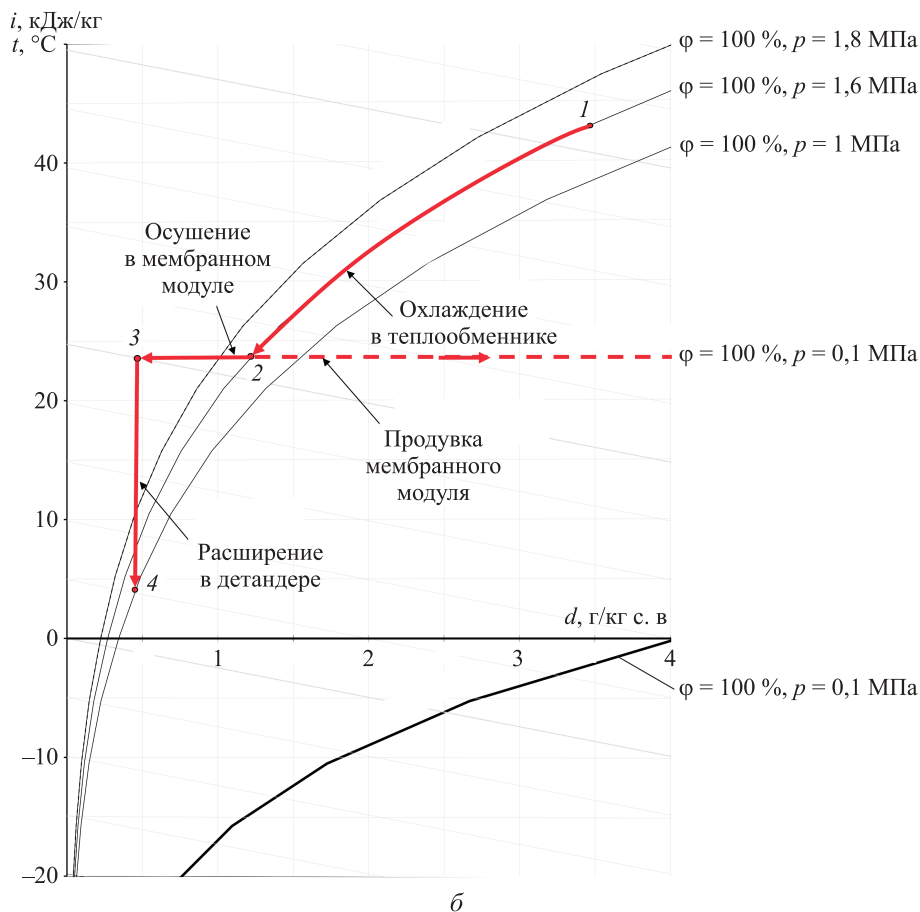


Рис. 3. Схема (а) и процессы осушения в системе с мембранными блоками на $i-d$ диаграмме влажного воздуха (б)

Мембранные технологические схемы имеют безусловное преимущество, связанное с простотой интеграции мембранных модулей в ВСОТР. Основной принцип мембранной технологии заключается в избирательной проницаемости паров влаги через стенки некоторых материалов, называемых мембранами. Современные мембранные модули выполнены в виде пучков волоконных мембран с определенной пропускной способностью по отношению к молекулам H_2O .

Мембранные осушители представляют собой конструкцию из параллельно установленных мембранных блоков, количество которых определяется требуемой степенью осушения. В качестве способа регулирования степени осушения может использоваться байпас потока. Схема ВСОТР с мембранными блоками и $i-d$ диаграмма протекающих процессов представлены на рис. 3. При всей простоте и высокой степени осушения (до точки росы $-40\text{ }^\circ\text{C}$) мембранные осушители имеют существенный недостаток, связанный с потерей части осушенного воздуха (от 5 до 15 %) на продувку полостей мембранных блоков.

Схема осушения с адсорбционным осушителем роторного типа. Для достижения практически тех же показателей по степени осушения, но без потери осушаемого воздуха в промышленности нашли применение адсорбционные блоки, выполненные в виде вращающихся барабанов (роторов). Данную технологию для сжатого воздуха давлением до 1,6 МПа активно разрабатывает компания Atlas Copco. Схема ВСОТР с интегрированным адсорбционным блоком роторного типа последней разработки Atlas Copco и $i-d$ диаграмма протекающих процессов представлены на рис. 4. Данная схема принципиально отличается от предшествующих тем, что в ней используется часть потока сухого воздуха для регенерации адсорбента, а не влажный перегретый, применяемый в традиционных схемах [9].

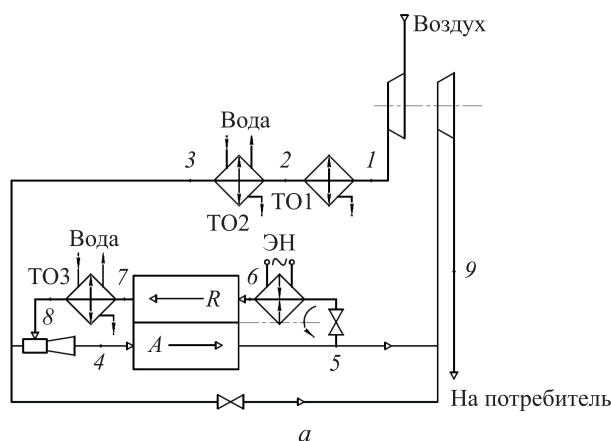


Рис. 4 (начало). Схема ВСОТР с адсорбционным блоком роторного типа (а)

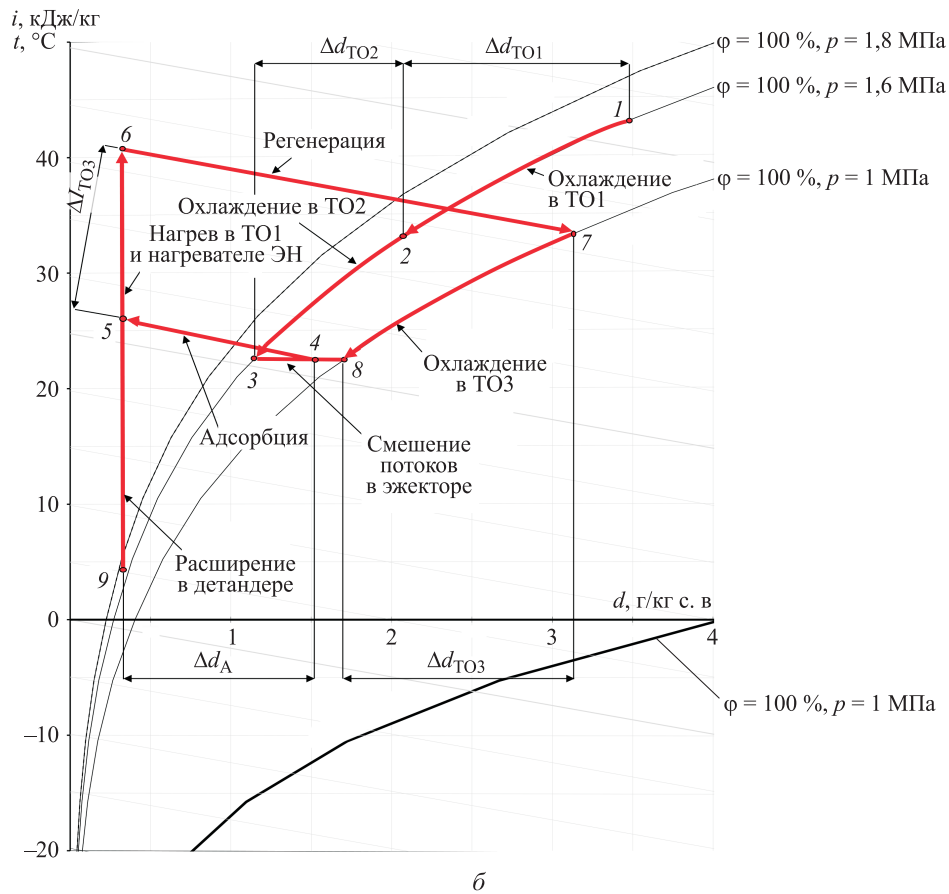


Рис. 4 (окончание). Процессы осушения в системе с адсорбционным осушителем роторного типа на i - d диаграмме влажного воздуха (б)

Недостатком схемы является то, что потребуется дополнительный электронагреватель, если в условиях ВСОТР невозможно в полной мере использовать тепло компримирования для подогрева воздуха, подаваемого на регенерацию адсорбента.

Заключение. Проведенный обзор и анализ технологических способов и схем подготовки сжатого воздуха раскрывают пути совершенствования существующих технологических схем ВСОТР на базе воздушных холодильных машин в целях достижения более высоких показателей по влагосодержанию воздуха, используемого в системах термостатирования стартовых комплексов [10]. К наиболее перспективным с этой точки зрения можно отнести мембранные технологические схемы и технологические схемы с роторными (вращающимися) адсорберами, позволяющие на уровне принятых в ВСОТР давлений понизить температуру точки росы воздуха до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует 3-му и 2-му классам качества воздуха по ГОСТ Р ИСО 8573-1-2016.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-5-1765
- [2] Баранов Д.А., Еленев В.Д., Смородин А.В. Принципы построения систем и объектов космического ракетного комплекса среднего класса повышенной грузоподъемности. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета)*, 2012, № 2 (33), с. 25–34.
- [3] Бармин И.В., Зверев В.А., Украинский А.Ю., Чугунков В.В., Языков А.В. Обоснование некоторых основных характеристик стартового оборудования космодромов XXI века. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 3. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-3-630
- [4] Золин А.В., Чугунков В.В. К выбору технического облика и рациональных параметров систем охлаждения и обезвоживания для хранилищ углеводородного горючего космодромов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2012, спец. вып., с. 39–42.
- [5] Александров А.А., Игрицкий В.А., Гончаров Р.В., Чугунков В.В. Методика выбора рациональных режимов охлаждения углеводородного горючего стартовым оборудованием перед заправкой топливных баков ракеты-носителя. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011, № 1 (82), с. 40–46.
- [6] Кобызев С.В. Методика расчета коэффициентов массоотдачи при осушке углеводородного ракетного топлива. *Наука и образование: электронное научно-техническое издание*, 2011, № 11.
URL: <http://technomag.edu.ru/doc/245147.html>
- [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 Conference Proceedings*, 2019, vol. 2141, no. 030029, pp. 1–11. DOI: 10.1063/1.5122079
- [8] 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.
- [9] Козлов В.В., Шадрин В.С., Подчуфаров А.А. Современные тенденции развития техники осушения сжатого воздуха в компрессорных станциях промышленных предприятий. *Труды. XVII Международная научно-техническая конференция по компрессорной технике*. Казань, 2017, с. 429–435.
- [10] Исаев В.Г., Озерский М.Д. Состояние и перспективы развития отечественной системы средств выведения космических аппаратов. *Информационно-технологический вестник*, 2014, т. 2, № 2, с. 54–62.

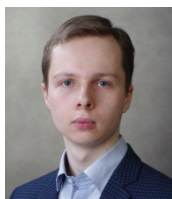
Статья поступила в редакцию 07.05.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

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>



Козлов Владимир Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, автор более 30 научных работ в области компрессорной техники, газоснабжения и термостатирования ракетно-космической техники. e-mail: vladimir.kozlov@bmstu.ru



Крылов Петр Владимирович — студент 6-го курса кафедры «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: peter_krylov@list.ru



Пискун Екатерина Сергеевна — аспирант кафедры «Вакуумная и компрессорная техника», автор двух научных работ в области компрессорной техники и систем подготовки сжатых газов. e-mail: piskun@bmstu.ru

Analysis of perspective air preparation network designs in launch complex temperature control systems

© V.V. Kozlov, P.V. Krylov, E.S. Piskun

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The purpose of the research is to perform a comparative analysis of compressed air preparation systems on the basis of moisture content. The article discusses conventional and perspective methods for drying compressed air using condensation, adsorption and membrane technologies. The article considers a temperature control system with the required dew point of minus 25°C at the exit under standard conditions, which corresponds to the dew point temperature plus 3 °C at a pressure of 1.0 MPa, or class 4 according to GOST R ISO 8573-1–2016. The main advantages of using advanced technological drying system designs are described, including the design of a modern drier with a rotary adsorber that can reduce the dew point temperature of compressed air to minus 25...30 °C at 1.0 MPa pressure without any losses on the adsorbent regeneration. This research is the first to analyze the applicability of modern adsorption and membrane modules to the launch complex functions. All the air drying designs were considered in this paper in relation to air temperature control systems based on air refrigerators using the I-d hygro-metric chart for variable pressures.

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

REFERENCES

- [1] Aleksandrov A.A., Barmin I.V., Denisov O.E., Chugunkov V.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 5, pp. 1–11. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-5-1765
- [2] Baranov D.A., Elenev V.D., Smorodin A.V. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta — Vestnik of the Samara State Aerospace University*, 2012, no. 2 (33), pp. 25–34.
- [3] Barmin I.V., Zverev V.A., Ukrainsky A.Yu., Chugunkov V.V., Yazykov A.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, iss. 3. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-3-630
- [4] Zolin A.V., Chugunkov V.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2012, spec. issue, pp. 39–42.
- [5] Aleksandrov A.A., Igritskiy V.A., Goncharov R.V., Chugunkov V.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroyeniye — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2011, no. 1 (82), pp. 40–46.
- [6] Kobayev S.V. *Nauka i obrazovanie: elektronnyy nauchno-tekhnicheskij zhurnal — Science and Education: Electronic Scientific and technical Journal*, 2011, no. 11. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/245147.html>
- [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 Conference Proceedings*, 2019, vol. 2141, no. 030029, pp. 1–11. DOI: 10.1063/1.5122079

- [8] Kozlov V.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroyeniye — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2011, spec. issue, pp. 132.
- [9] Kozlov V.V., Shadrin V.S., Podchufarov A.A. Sovremennyye tendentsii razvitiya tekhniki osusheniya szhatogo vozdukha v kompressornykh stantsiyakh promyshlennykh predpriyatiy [Modern trends in the development of compressed air drying technology in compressor stations of industrial enterprises]. In: *Trudy XVII Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii po kompressornoy tekhnike — Proceedings of the XVII International science-technical conference of compressor technology*. Kazan, 2017, pp. 429–435.
- [10] Isaev V.G., Ozersky M.D. *Informatsionno-tekhnologicheskiiy vestnik (Information Technology Bulletin)*, 2014, vol. 2, no. 2, pp. 54–62.

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 technology, gas supply and temperature control in rocket and space technology. e-mail: vladimir.kozlov@bmstu.ru

Krylov P.V., 6th year student, Department of Rocket Launch Complexes, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: peter_krylov@list.ru

Piskun E.S., post-graduate student, Department of Vacuum and Compressor Equipment, Bauman Moscow State Technical University; author of 2 research publications in the field of compressor technology and compressed gases preparation systems. e-mail: piskun@bmstu.ru