

ТЕПЛОСМЕСИТЕЛИ ЭЖЕКТОРНОГО ТИПА ПРИ КОНДИЦИОНИРОВАНИИ ВОЗДУХА НА ТРАНСПОРТЕ

Д.Т.Н. Меркулов В.И.¹, Попов А.А.¹, Поликарпов А.В.¹, К.Т.Н. Тищенко И.В.²

¹Московский политехнический университет, Москва, Россия

²МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Constructor.Alex@yandex.ru

В современном мире системы кондиционирования воздуха (СКВ) получили максимально широкое распространение и стали обыденной частью повседневной жизни. Однако ввиду сложности конструкции при проектировании СКВ и развития современных технологий до сих пор остается много узлов системы, допускающих модернизацию и улучшения. Наряду с такими параметрами, как эргономика и массогабаритные характеристики, огромную роль играют такие параметры работы СКВ, как эффективность, надежность, ресурс. Особенно актуальными становятся эти параметры в условиях миниатюризации и работы по замкнутому циклу в мобильных транспортных средствах (автомобильная, авиационная и корабельная техника), поскольку эффективность, масса и ресурс оказывают решающее воздействие на итоговую стоимость техники и затраты по ее обслуживанию и эксплуатации. Основными параметрами, которые регулирует СКВ, являются температура, расход и влажность подаваемого воздуха. В статье рассматриваются и сравниваются методы первичного охлаждения горячего воздуха, подаваемого в СКВ вертолета, при обогреве кабины в условиях низких температур. Зачастую это производится с использованием воздухо-воздушных теплообменников (ВВТ). В материалах статьи предлагается к рассмотрению вариант замены одного из таковых на теплосмеситель эжекторного типа, приводится описание и сравнение существующих и предлагаемого вариантов модернизации схем СКВ и оценивается приемлемость их реализации на вертолете. Также проведена сравнительная работа по оценке преимуществ и недостатков при такой замене. Проведены первичные оценочные расчеты изменения параметров системы в случае внедрения замены на всех условных режимах нагрузки типовой модели вертолета. Приведены особенности применения данной замены и указаны дополнительные нововведения, необходимые для ее реализации. Для вычислений использовался программный комплекс ANSYS CFX, MathCAD, Solid Edge ST8. В ходе работы была выявлена конструкция и метод, обеспечивающие оптимальные параметры и метод реализации при внедрении эжектора в состав СКВ.

Ключевые слова: воздухо-воздушный теплообменник, теплосмеситель, эжектор, СКВ, ресурс, авиационный транспорт, расход, регулирование температуры, термические напряжения, эффективность, надежность.

Введение

Применительно к наземным транспортным средствам (автомобилям, тракторам, сельскохозяйственным машинам) система кондиционирования воздуха (СКВ) достаточно хорошо отработана [1, 2]. Современный авиационный транспорт летает на высотах, климатические условия которых значительно отличаются от наземных. В большинстве случаев (при высоте полета более 4,5 км над уровнем моря) температура, давление и содержание кислорода в воздухе находятся на уровне, при котором человеческий организм не может длительно существовать и нормально функционировать без дополнительного защитного снаряжения.

Причем условия заборной среды напрямую связаны с высотой относительно уровня моря. Для решения данной проблемы и упрощения работы человека (за счет отсутствия сковывающего защитного снаряжения) в большинстве современной авиационной техники применяются внутренняя (СКВ) и система автоматического регулирования давления (САРД) на борту самолета, призванные поддерживать нормальные условия микроклимата на борту [3].

Отдельно из многообразия авиационной техники можно выделить вертолеты. Из-за небольшой высоты полета САРД на них практически не применяется [4, 5], а к СКВ стали предъявляться более жесткие требования в связи с

развитием новых перспективных технологий по освоению территорий с резко выраженным климатом (пустынная и арктическая местность) и применением специального бортового оборудования, такого как морские спасательные комплексы (МСК). В этих условиях традиционные обогреватели и охлаждающие контуры становятся неэффективными [6], и, как никогда, становится актуальным вопрос установки СКВ, схожей с устанавливаемой на модели авиационной техники, предназначенные для больших высот полета, и также значимым становится вопрос эффективности обогрева.

Цель исследования

Целью исследования является анализ работы теплосмесителей эжекторного типа при кондиционировании воздуха на транспорте.

Описание системы

В большинстве случаев СКВ представляет собой систему автоматического регулирования температуры на борту за счет подачи в кабину воздуха, отбираемого от компрессора двигателей. При этом необходимо учитывать, что после отбора от компрессора воздух имеет параметры, значительно превышающие нормальные условия [7]. Давление такого воздуха может достигать до 3 МПа, а температура достигать 600 °С. Поэтому принцип работы по автоматическому регулированию СКВ сводится к снижению/ограничению давления до при-

емлемого уровня, разделению отбираемого воздуха на два потока, охлаждению одного из потоков до низких температур и последующему смешению данных потоков в определенных пропорциях до получения требуемого температурного значения [8].

Пример подобной схемы потока воздуха и агрегатов, входящих в состав СКВ представлен на рис. 1 [9].

Открываются краны отбора воздуха (ЗРУ1 и ЗРУ2) в тракт СКВ, где при помощи крана-ограничителя расхода (ЗРУ3) и реле давления (РД2 и РД3) контролируется отбираемый расход. После этого высокотемпературный воздух проходит через первичный стальной воздухо-воздушный теплообменник (АТ1), охлаждаясь до приемлемого значения. Интенсивность и степень охлаждения определяются расходом продувочного воздуха, который в свою очередь регулируется изменением степени подсоса в эжектор (ЭЖ1) [10], путем открытия/закрытия заслонкой (ЗРУ5) тракта подсасывающего воздуха в линию эжектирования из общей магистрали подачи в СКВ. После всего теплый воздух подается в кабину через заслонку обогрева кабины (ЗРУ4), обдувая температурные датчики ДТ4-ДТ6. Исходя из их показателей автоматическими блоками управления и регулирования (БУР1 и БУР2) осуществляется изменение положения перекрытия ЗРУ4 и ЗРУ5 для выхода СКВ на требуемый режим обогрева [11].

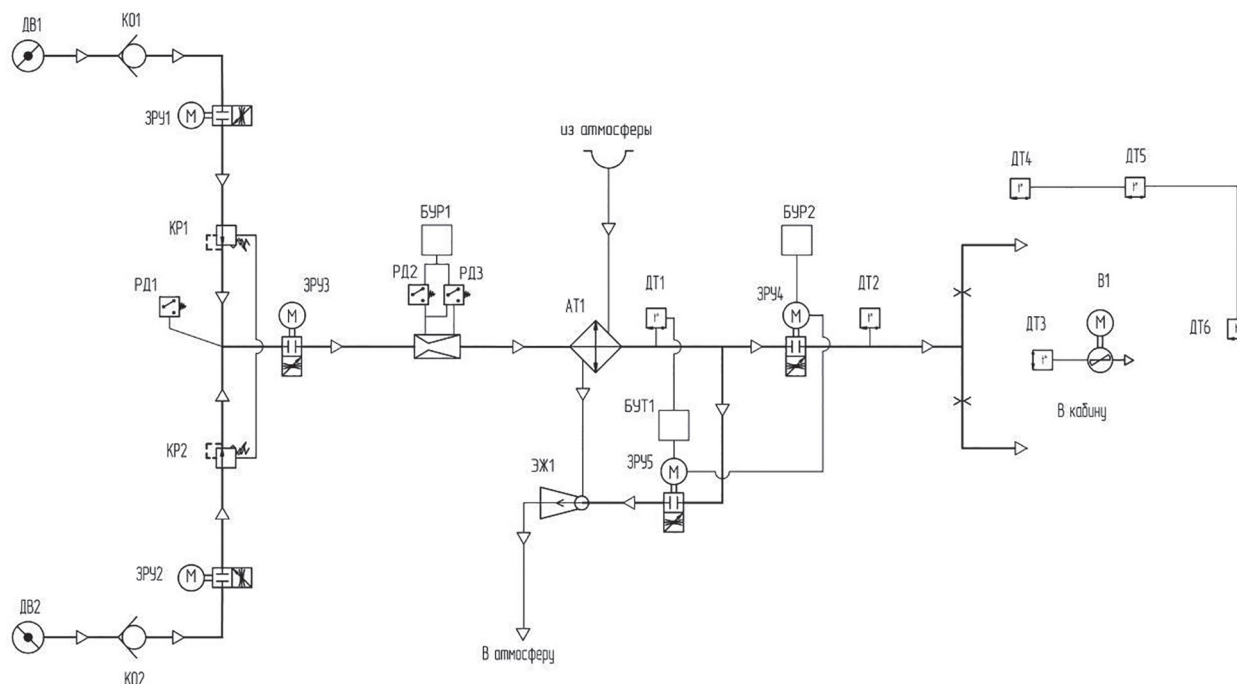


Рис. 1. Стандартная схема СКВ с автоматическим регулированием

Альтернативный нерегулируемый вариант

Также существует ранее широко распространенный, а ныне все реже встречающийся вариант обогрева кабины в ручном режиме по тактильным ощущениям. Схема [12] его принципа работы представлена на рис. 2.

При помощи включаемого по желанию экипажа напорного вентилятора (ЭВ) воздух циркулирует внутри кабины, продуваясь через теплообменник керосинового авиационного обогревателя (КО-50) и прогреваясь за счет теплообмена через тонкую стенку с трактом сгорания топлива, сжигаемого внутри обогревателя. Датчик температуры ДТЗ применяется экипажем для оценки температуры в кабине и избегания перегрева тракта КО-50 выше предельно допустимых температур.

Условные обозначения в представленных схемах:

АТ – воздушно-воздушный теплообменник;

БУР – блок управления расходом воздуха;

БУТ – блок управления температурой воздуха;

В – вентилятор обдува датчиков;

ДВ – компрессор двигателя;

ДТ – датчик температуры;

КО – обратный клапан;

КР – регулятор избыточного давления;

РД – датчики давления и перепада давления;
ЗРУ – запорно-регулирующие устройства/заслонки;

ЭЖ – эжектор подсоса воздуха;

КО-50 – керосиновый обогреватель (состоит из камеры сгорания – КС и контура теплообмена – КТ).

Агрегатами первичного изменения температуры воздуха в обоих рассмотренных случаях выступают воздушно-воздушные теплообменники (ВВТ). В ВВТ происходит контакт горячих и холодных потоков воздуха через теплопередающую стенку. При этом теплообменник испытывает износ вследствие циклических температурных нагрузок. Это приводит к необходимости изготовления ВВТ из более жаропрочных материалов, что в свою очередь приводит либо к значительному увеличению массы [7], либо удорожанию системы. Кроме того, в обоих вариантах довольно низкая энергетическая эффективность обогрева из-за сброса части полезного тепла в окружающую среду при теплообмене. Эти особенности были учтены в предлагаемом к рассмотрению варианте с заменой узла ВВТ на теплосмесительный эжектор при работе СКВ.

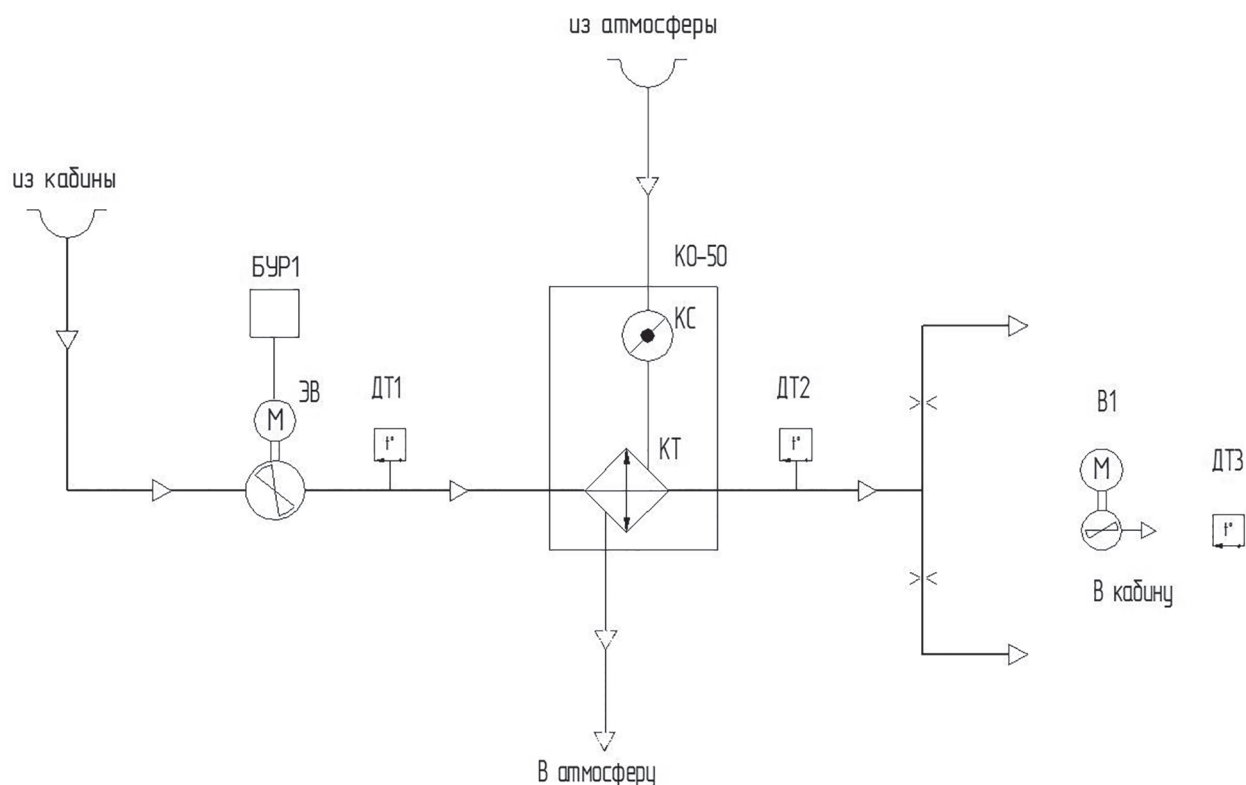


Рис. 2. Схема обогрева в СКВ без автоматического регулирования

Предлагаемый вариант

При использовании традиционного первичного теплообменника возникает ряд недостатков, которые можно устранить заменой механизма первичного охлаждения. В качестве альтернативного варианта для выполнения данной функции предлагается применение теплосмесительного эжектора [10], установленного в тракт подачи воздуха от компрессора в СКВ. Охлаждение подаваемого воздуха в данном случае будет происходить не за счет теплообмена через стенку между средами, а за счет разбавления подаваемого горячего воздуха подмешиваемым забортным. Принципиальная схема работы данного технического решения представлена на рис. 3.

Как и в базовом варианте, при включении СКВ происходит отбор воздуха от компрессоров двигателей при открытии кранов отбора ЗРУ1 и ЗРУ2. Отличие состоит в другой настройке режима работы регуляторов избыточного давления КР1 и КР2. При подаче в тракт СКВ блоком управления БУР1 учитывается температура подаваемого воздуха, за счет считывания параметров с датчиков температуры ДТ1 и ДТ2. Блоком БУР2 учитываются тем-

пературные параметры с датчиков ДТ4–ДТ6, установленных по периметру кабины. По контрольному датчику ДТ3 отслеживаются критические температуры, и, в случае необходимости, происходит перекрытие тракта подачи при помощи ЗРУ3 [12]. Основное регулирование температуры происходит за счет изменения пропорций поступающего в эжектор (ЭЖ1) горячего воздуха из тракта отбора и подсасываемого из кабины холодного воздуха, их перемешивание с выравниванием температуры и подача в грузовую кабину прогретого воздуха для обогрева последней до заданного температурного значения в автоматическом режиме.

Расчетно-оценочная часть. За основу для компьютерных расчетов брались характеристики отбираемого от компрессора воздуха на примере двигателя вертолета Ми-8. По условиям расчета предполагалось, что потребители на борту получают воздух от СКВ в одинаковом количестве и с одинаковыми параметрами в обоих вариантах. Расчет выполнен в программе *MathCAD* [7]. В итоге при сравнении всех описанных выше способов кондиционирования был выделен ряд отличий, представленных в табл. 1.

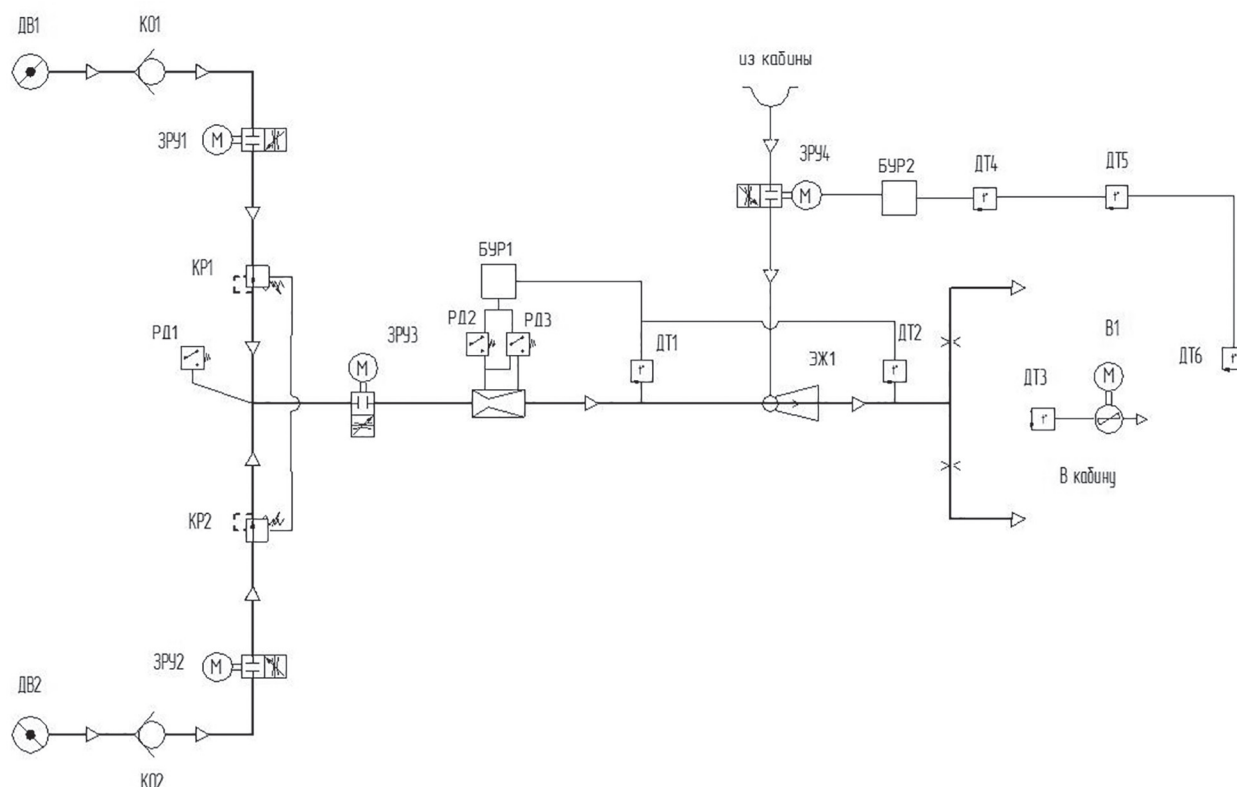


Рис. 3. Принципиальная схема предлагаемого варианта автоматического регулирования

Таблица 1

Основные отличия между вариантами

Особенности СКВ при реализации	Варианты реализации СКВ		
	Стандартный с ВВТ	Обогрев в ручном режиме с КО-50	Предлагаемый вариант с эжектором
Масса системы в сборе, кг	25...30	15	18...20
Расход воздуха отбираемого от компрессора, кг/ч	800...1200	отсутствует	150...250
Максимальные температурные перепады узла, °С	350	500	250...270
Дополнительный расход топлива на обогрев, кг/ч	30...50	40...60	10...20

Предварительные выводы

При первичной оценке предлагаемого варианта реализации СКВ можно выделить ряд преимуществ:

- снижение массы узла СКВ, т.к. смесительная камера эжектора при аналогичных характеристиках имеет меньшую площадь поверхности, чем разветвленная поверхность контакта пластинчато-ребристого теплообменника;

- снижение общей массы системы, за счет меньшего числа агрегатов СКВ, и сопоставимая масса с вариантом обогрева в ручном режиме, при сохранении возможности автоматического регулирования в отличие от последнего;

- снижение влияния температурного износа, за счет меньшего перепада температур в эжекторе при смешении потоков, чем на границах теплопередающей стенки теплообменника;

- уменьшение количества отбираемого от компрессора двигателей воздуха для обеспечения работы СКВ, и, как следствие, повышение стабильности его работы на всех режимах;

- снижение перерасхода топлива на обогрев из-за увеличения эффективности передачи тепловой энергии при смешении потоков в эжекторе в отличие от теплопередачи через тонкую стенку теплообменника.

В качестве главного недостатка можно отметить сложность поддержания правильного режима смешения потоков в эжекторе, приводящая к необходимости разработки дополнительных алгоритмов регулирования расхода подаваемого и подмешиваемого в эжектор потоков воздуха. Но данная проблема может быть нивелирована более тонкой настройкой рабочего режима регуляторов избыточного давления и внедрением специального ПО в блоки управления и автоматического регулирования [5].

Заключение

По итогам сравнительных расчетов можно сделать вывод, что применение теплосмесителей является перспективным направлением в развитии СКВ авиационной техники. Среди главных преимуществ, выявленных уже в первичных расчетах, можно выделить уменьшение массогабаритных характеристик СКВ и меньшее падение давления в тракте двигателя при отборе. В перспективе данное решение способно повысить термо- и износостойкость на участках повышенных термических напряжений и снизить общие энергетические потери СКВ. Но для подтверждения данных преимуществ необходимо продолжение работы в данном направлении, изготовление прототипа эжектора под заданные расходы воздуха и проведение стендовых испытаний СКВ с предлагаемой модификацией.

Литература

1. Степанов И.С., Евграфов А.Н., Карунин А.Л., Ломакин В.В., Шарипов В.М. Автомобили и тракторы. Основы эргономики и дизайна / Под общ. ред. В.М. Шарипова. М.: МГТУ «МАМИ», 2002. 230 с.
2. Шарипов В.М., Михайлов В.А., Шарипова Н.Н. Климатическая комфортабельность колесных и гусеничных машин. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. 197 с.
3. Воронин Г.И., Верба М.И. Кондиционирование воздуха на летательных аппаратах. М.: Машиностроение, 1965. 480 с.
4. Антонова Н.В., Дубовин Л.Д., Шустров Ю.М. и др. Проектирование авиационных систем кондиционирования воздуха. М.: Машиностроение, 2006. 384 с.
5. Щербakov А.В. Автоматическое регулирование авиационных систем кондиционирования воз-

- духа. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э.Баумана, 2010. 290 с.
6. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии. СПб.: Химиздат, 2009. 544 с.
 7. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. М.: Наука, 1986. 414 с.
 8. Варгафтик Л. П., Филиппов А. А. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.
 9. ГОСТ 22270-76. Оборудование для кондиционирования воздуха, вентиляции и отопления. М.: Изд-во стандартов, 1976. 36 с.
 10. Александров В.Ю., Климовский К.К. Оптимальные эжекторы (теория и расчет). М.: Машиностроение, 2012. 136 с.
 11. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1991. 600 с.
 12. ГОСТ 2.781-96. Обозначения условные графические. Аппараты гидравлические и пневматические, устройства управления и приборы контрольно-измерительные. М.: Изд-во стандартов, 1996. 123 с.
- ### References
1. Stepanov I.S., Evgrafov A.N., Karunin A.L., Lomakin V.V., Sharipov V.M. *Avtomobili i traktory. Osnovy ergonomiki i dizayna* [Automobiles and tractors. Basics of ergonomics and design]. Pod obshch. red. V.M. Sharipova. Moscow: MGTU «МАМИ» Publ., 2002. 230 p.
 2. Sharipov V.M., Mikhaylov V.A., Sharipova N.N. *Klimaticheskaya komfortabel'nost' kolesnykh i gusenichnykh mashin* [Climatic comfort of wheeled and caterpillar vehicles]. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. 197 p.
 3. Voronin G.I., Verba M.I. *Konditsionirovanie vozdukha na letatel'nykh apparatakh* [Air conditioning on the aircraft]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1965. 480 p.
 4. Antonova N.V., Dubovin L.D., Shustrov Yu.M. i dr. *Proektirovanie aviatsionnykh sistem konditsionirovaniya vozdukha* [Designing of the aircraft air conditioning systems]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2006. 384 p.
 5. Shcherbakov A.V. *Avtomaticheskoe regulirovanie aviatsionnykh sistem konditsionirovaniya vozdukha* [Automatic control of the aircraft air conditioning systems]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2010. 290 p.
 6. Romankov P.G., Frolov V.F., Flisyuk O.M. *Metody rascheta protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii* [Methods for calculating the processes and apparatus of chemical technology]. SPb.: Khimizdat Publ., 2009. 544 p.
 7. Kutateladze S.S., Borishanskiy V.M.. *Spravochnik po teploperedache* [The reference book of heat transfer]. Moscow: Nauka Publ., 1986. 414 p.
 8. Vargaftik L.P., Filippov A.A. *Spravochnik po teploprovodnosti zhidkostey i gazov* [The reference book of the thermal conductivity of liquids and gases]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1990. 352 p.
 9. GOST 22270-76. Equipment for air conditioning, ventilation and heating. Moscow: Izd-vo standartov Publ., 1976. 36 p.
 10. Aleksandrov V.Yu., Klimovskiy K.K. *Optimal'nye ezhektory (teoriya i raschet)* [Optimal ejectors (theory and calculation)]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2012. 136 p.
 11. Abramovich G.N. *Prikladnaya gazovaya dinamika* [Applied gas dynamics]. Moscow: Nauka Publ., 1991. 600 p.
 12. GOST 2.781-96. Graphic designations. Hydraulic and pneumatic valves, control devices measuring instruments, indicators, switches. Moscow: Izd-vo standartov Publ., 1996. 123 p.

EJECTOR-TYPE HEAT EXCHANGERS IN THE AIR CONDITIONING IN TRANSPORT

Dr.Eng. **V.I. Merkulov**¹, **A.A. Popov**¹, **A.V. Polikarpov**¹, Ph.D. **I.V. Tishchenko**²

¹Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

²Bauman MSTU, Moscow, Russia, Constructor.Alex@yandex.ru

In the modern world, the air conditioning systems have become the most widespread application and have become an everyday part of everyday life. However, due to the complexity of the construction during the designing of the air conditioning systems and the development of modern technologies, there are still many system's assemblies that can be upgraded and improved. Along with such parameters as ergonomics and weight and size characteristics, a significant role is played by such parameters of the operation of the air conditioning systems as efficiency, reliability, resource. These parameters are particularly relevant in the context of miniaturization and work on a closed cycle in mobile transport vehicles (automotive, aircraft and ship equipment), since efficiency, mass and resource exert a determinative influence on the total cost of vehicles and the costs of its maintenance and operation. The main parameters that regulate the air conditioning systems are the temperature, flow rate and humidity of the supplied air. The article studies and compares the methods of primary cooling of hot air supplied to the helicopter's air conditioning systems, when the cabin is heated at low temperatures. Often this is done using air-to-air heat exchangers. In the materials of the article, it is proposed to consider the option of replacing one of such heat exchanger with an ejector-type heat exchanger, a description and comparison of the existing and proposed options for the modernization of the air conditioning system's schemes, and estimate the acceptability of their implementation on the helicopter. Also, a comparative work was conducted to estimate the advantages and disadvantages of such a replacement. The primary estimated calculations of the change in the system's parameters were implemented in the case of introduction of a replacement in all conventional load modes of a typical helicopter model. Specific features of the application of this replacement are given and additional innovations which are necessary for its implementation are pointed out. For calculations, the software complex ANSYS CFX, MathCAD, Solid Edge ST8 was used. In the course of the work, a construction and a method were revealed that provided the optimal parameters and method of implementation for the introduction of the ejector into the composition of the air conditioning system.

Keywords: air-to-air heat exchanger, heat mixer, ejector, air conditioning system, service life, aircraft transport, consumption, temperature control, thermal stresses, efficiency, reliability.