

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОДСИСТЕМ УВЛАЖНЕНИЯ ВОЗДУХА ПРИ КОНДИЦИОНИРОВАНИИ НА ТРАНСПОРТЕ

Д.Т.Н. Меркулов В.И., Попов А.А.

Московский политехнический университет, Москва, Россия, Constructor.Alex@yandex.ru

При длительной деятельности человека очень многие факторы начинают вносить существенный вклад в утомляемость и снижение концентрации внимания. Вопрос встает еще более актуально, когда речь заходит о водителях и операторах дорожной строительной и сельскохозяйственной техники. Работа на данных видах транспорта предполагает повышенную опасность и дополнительную ответственность за жизнь и здоровье людей. Наряду с такими параметрами, как эргономика и оптимизация режима труда и отдыха, огромную роль играют оптимальные значения параметров микроклимата в зоне водителя или оператора транспортной техники. К параметрам микроклимата относятся: давление, концентрация кислорода в воздухе, температура и влажность. И если с регулированием содержания кислорода и давления в наземном транспорте, в отличие от летательных аппаратов, необходимости не возникает, а температура регулируется при помощи систем кондиционирования воздуха автомобиля, то параметрам влажности не уделяется должного внимания. В условиях работы автомобильного транспорта и строительной техники, в зонах пониженной влажности или повышенного пылевыведения, низкий уровень влагосодержания в кондиционируемом воздухе начинает играть ключевую роль в повышенной утомляемости и развитии хронических заболеваний у водителей. Это может быть чревато как снижением работоспособности и экономическими потерями, так и созданием дополнительных опасных ситуаций для жизни и здоровья людей. В статье рассматриваются и сравниваются основные способы и методы влагонасыщения сухого воздуха и оценивается приемлемость их реализации на автотранспорте, проводятся характерные оценочные расчеты изменения параметров системы от условий нагрузки. Приведены особенности применения увлажнения воздуха в системах кондиционирования на наземном и авиационном транспорте, произведена обобщенная оценка способов увлажнения, их преимуществ и недостатков, выявлены наиболее оптимальные, с точки зрения транспортной техники, методы увлажнения воздуха. Для вычислений использовался программный комплекс MathCAD.

Ключевые слова: влажность, влагосодержание, микроклимат, система увлажнения воздуха, наземный транспорт, авиационный транспорт, утомляемость.

Введение

Требования СанПиНа и современные исследования физиологии человека заставляют по-новому учитывать параметры влажности воздуха в рабочей зоне оператора при работе на транспорте в областях с засушливым климатом и местах с повышенным пылевыведением. При работе водителя (оператора) в подобных условиях концентрация внимания может снижаться более чем на 45% и в разы увеличиваться утомляемость [1] по сравнению с аналогичной деятельностью в условиях с нормальными параметрами микроклимата. Зачастую наблюдаются нарушения водно-солевого баланса, сухость глаз, сонливость, рассеянность и возможно развитие хронических заболеваний верхних дыхательных путей и сердечно-сосудистой системы. Для того чтобы снизить риск возникновения вышеописанных последствий,

необходимо больше внимания уделять вопросу увлажнения сухого воздуха внутри кабины транспортного средства водителя (рабочее место оператора).

Методы увлажнения воздуха в кабинах тракторов и сельскохозяйственных машин с помощью увлажняемой насадки рассмотрены в работах [2–5]. Однако для транспортных машин они не получили распространения.

Целью исследования является разработка метода проектирования подсистемы увлажнения в системе кондиционирования и вентиляции воздуха на транспорте.

Для достижения данной цели необходимо проводить модернизацию системы кондиционирования воздуха на транспорте с целью внедрения подсистемы увлажнения воздуха, поступающего в кабину транспортного средства. При реализации данной подсистемы следует

выбирать из всего многообразия наиболее оптимальный метод увлажнения воздуха для выполнения поставленной задачи.

Классификация методов

По способу насыщения подаваемого воздуха влагой методы испарения условно классифицируются [6] на:

- холодное испарение (естественное испарение воды с поверхности материала при обдувании воздушными потоками);
- форсуночное распыление (механическое распыление мелкодисперсной водяной взвеси);
- паровое увлажнение (вода при контакте с электродами нагревается, начинает кипеть и испаряться);
- барботажно-пленочное насыщение (контакт турбулентного потока воздуха с тонкой водяной пленкой и образованием паровоздушной смеси, в которой за счет турбулизации потока происходит насыщение воздуха водой);
- ультразвуковое рассеивание (выброс в воздух мелкодисперсных частиц под действием высокочастотных колебаний пьезоэлемента и образование водяного аэрозоля (тумана)).

Сравнение рассмотренных методов с аналогами

Каждый из этих методов имеет свои недостатки: установка дополнительного оборудования для подготовки компонентов (подаваемого воздуха и расходуемой на увлажнение воды), сложности в эксплуатации, узкий диапазон режимов нормальной работы и т.д. Более подробно наличие недостатков у того или иного метода увлажнения представлены в табл. 1.

Изначально с учетом условий эксплуатации (движущееся транспортное средство) наиболее подходящими выглядят варианты холодного испарения, форсуночного распыления и ультразвукового рассеивания. Был проведен патентный поиск [7] изделий-прототипов и выявлены проблемы, приведенные ниже.

У патента US 20070245751A1 (ультразвуковой увлажнитель воздуха) для получения заданного уровня влажности сильно усложнена электросхема подключения, что делает возможным использование данного метода лишь на авиационном транспорте. При упрощении логики подключения и миниатюризации возникает проблема перенасыщения воздуха и образования водяного тумана. Также, поскольку увлажнение происходит за счет механического разделения жидкости на мелкодисперсный аэрозоль – вместе с ней в воздух попадают и

Таблица 1

Преимущества и недостатки методов увлажнения воздуха

Методы увлажнения воздуха	Недостатки и задачи, возникающие при проектировании системы, основанной на данном методе												
	Установка мелкодисперсного воздушного фильтра	Установка водного фильтра мелкой очистки	Установка водного фильтра обратного осмоса	Создание высокого избыточного давления подачи воды	Конденсация и возникновение капельной влаги	Невозможность быстрого обслуживания	Сложность поддержания рабочего процесса	Требования к тепло - отводу	Требования совместимости к РЭО	Необходимость плановой замены составляющих	Сложность реализации увлажнения при малых расходах воздуха	Перерасход воды при отказе в системе подачи	Наличие ломающихся движущихся нагревательных элементов
Холодное испарение	-	+	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-
Форсуночное распыление	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	-
Паровое увлажнение	-	+	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	+
Барботажно-пленочное насыщение	-	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	-
Ультразвуковое рассеивание	+	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+

взвешенные частицы, что приводит к образованию соляных налетов на поверхностях.

У патентов US 20140077396A1 и US 19915037585A1 (форсуночные увлажнители) конструкция усложняется добавлением компрессора для создания повышенного давления на впрыск. Отдельно следует отметить, что конструкция, из-за маленького размера сопла форсунки, предъявляет очень жесткие требования к качеству воды, которую можно было бы использовать в данном агрегате (двойной дистиллят с фильтрацией обратного осмоса).

На основании рассмотренных методов и найденных патентов можно сделать вывод, что самым оптимальным при проектировании системы увлажнения воздуха является применение метода холодного испарения воды.

Расчетно-оценочная часть

Ниже приводятся исследования влияния основных значимых параметров подсистемы увлажнения воздуха в составе комплексной системы кондиционирования с целью определения оптимальных входных параметров системы: температура подаваемого воздуха, время увлажнения, расход воды.

Для численной реализации задачи в описанной постановке использовался конечно-элементный программный комплекс MathCAD.

Основные проводимые критерии оценки расчетной части.

Оценка расхода воды для обеспечения необходимого влагосодержания при работе системы кондиционирования в кабине была произведена по формулам, приведенным ниже.

При этом массовый расход воздуха [8]

$$G = 60 G_{\min} \rho.$$

Расход воды на увлажнение [8]

$$G_{\text{воды}} = \frac{G p M_{\text{пара}}}{M_{\text{возд.}} p_{\text{возд.}}},$$

где $M_{\text{возд.}}$ – молярная масса воздуха, кг/кмоль; $M_{\text{пара}}$ – молярная масса пара, кг/кмоль; $p_{\text{возд.}}$ – давление увлажняемого воздуха; p – парциальное давление водяного пара.

Поскольку при испарении воды затрачивается тепловая энергия на изменения агрегатного состояния жидкости в газ, то тепло неизменно будет поглощаться из подаваемого на кондиционирование воздуха и необходима оценка тепловых потерь при испарении влаги в системе кондиционирования.

При испарении 1 грамма воды на кг сухого воздуха происходит падение температуры последнего на $2,7^{\circ}\text{C}$ [9]. Соответственно, при доведении влагосодержания сухого воздуха до расчетных (из расхода) 7 грамм воды на кг воздуха происходит падение температуры воздуха на $\approx 19^{\circ}\text{C}$.

Количество теплоты, необходимое для подогрева воздуха, можно определить из выражения [9]

$$Q = c G \Delta t,$$

где Δt – повышение температуры воздуха при подогреве, $^{\circ}\text{C}$; G – расчетный расход воздуха, кг/ч; $c = 1005$ Дж/(кг·К) – удельная теплоемкость воздуха.

Запас мощности на подогрев увлажненного воздуха

$$N = Q/\tau.$$

Отдельно при проектировании и расчете было учтено, что в зависимости от начальной температуры подаваемого воздуха будет изменяться скорость испарения влаги с поверхности увлажняющего устройства.

Немаловажную роль в процессе испарения играет площадь поверхностного контакта сухого воздуха с капиллярной влагой. При испарении воды происходит диффузионная массопередача от жидкости к поступающему на увлажнение воздуху [10].

Согласно законам диффузии, число молей воды, испарившейся в единицу времени, можно выразить уравнением:

$$v = k(p_{\text{нас}} - p_0)F,$$

где k – коэффициент массопередачи между мокрой поверхностью и потоком воздуха; $p_{\text{нас}}$ – давление насыщенного водяного пара при заданной температуре; p_0 – парциальное давление водяного пара в воздушном потоке (для поступающего сухого воздуха принимается равным нулю); F – площадь испарительной поверхности.

В свою очередь зависимость между коэффициентами массо- и теплопередачи [10]:

$$k = \frac{\alpha}{c p M} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Sc}} \right)^{\frac{2}{3}},$$

где α – коэффициент теплопередачи между потоком воздуха и мокрой поверхностью (для

рассматриваемых условий $\alpha \approx 15$ Дж/(кг·К); c – удельная теплоемкость воздуха; p – среднее парциальное давление сухого воздуха ($p \approx 100$ кПа); M – молярная масса воздуха; Pr – критерий Прандтля; Sc – критерий Шмидта.

Таблица 2

Расчетные значения параметров системы увлажнения

Основные расчетные параметры	Численные значения
Расход воды на увлажнение, кг/ч	0,14
Дополнительная мощность на подогрев, кВт	0,11
Площадь испарительной поверхности, м ²	0,38
Степень увлажнения, %	40

Обобщая данные расчетные рекомендации можно сделать вывод, что при проектировании подсистемы увлажнения в системе кондиционирования и вентиляции воздуха на транспорте необходимо учитывать и выбирать наиболее оптимальные параметры, при каждом случае из таких факторов, как:

- расход воды на увлажнение;
- дополнительные теплотраты на подогрев поступающего воздуха;
- место для размещения испарительной камеры с заданными размерами поверхности контакта сухого воздуха и влаги.

За оптимальные [11] принимаются следующие параметры микроклимата рабочей зоны: температура от +19 до +24°C; минимальная влажность 40%; давление водяных паров при заданной влажности 1,03 кПа. Минимальное количество подачи свежего воздуха на человека – 0,28 м³/мин. Давление воздуха в салоне принимается равным атмосферному, влагосодержание 0 г/кг; плотность воздуха при данном давлении 1,23 кг/м³.

Результаты вычислений, полученные на основании заданных характеристик, представлены в табл. 2.

Заключение

Таким образом, при проектировании подсистемы увлажнения в системе кондиционирования и вентиляции воздуха на транспорте необходимо учитывать и выбирать наиболее оптимальные параметры из таких факторов, как расход воды на увлажнение, дополнительные теплотраты на подогрев поступающего воздуха и место для размещения испарительной камеры с заданными размерами поверхности контакта сухого воздуха и влаги.

Литература

1. Гусева Е.И., Марков Д.С. Влияние температуры воздуха на организм человека // *Успехи современного естествознания*. 2013. № 8. С. 72–72
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. Степанов И.С., Евграфов А.Н., Карунин А.Л. Автомобили и тракторы. Основы эргономики и дизайна / под общ. ред. В.М. Шарипова. М.: МГТУ «МАМИ», 2002. 230 с.
4. Михайлов В.А., Шарипова Н.Н., Климова Е.В. Разработка конструкции инновационного локального водоиспарительного воздухоохладителя для кабин тракторов // *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2013. № 2(16). Т. 1. С. 179–184.
5. Михайлов В.А., Шарипова Н.Н. Инновационный локальный водоиспарительный воздухоохладитель для кабин тракторов // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2014. № 2. С. 3–6.
6. Антонова Н.В., Дубовин Л.Д., Егоров Е.Е. Проектирование авиационных систем кондиционирования воздуха / под ред. Ю.М. Шустрова. М.: Машиностроение, 2006. 384 с.
7. Электронные ресурсы – патентная база США. Режим доступа: <https://www.uspto.gov/>
8. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии. СПб.: Химиздат, 2009. 544 с.
9. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. М.: Наука, 1986. 414 с.
10. Варгафтик Л.П., Филиппов А.А. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.
11. ГОСТ 22270-76. Оборудование для кондиционирования воздуха, вентиляции и отопления. М.: Издательство стандартов, 1976. 22 с.

References

1. Guseva E.I., Markov D.S. Influence of air temperature on the human body. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2013. No 8, pp. 72–72 (in Russ.).
2. Sharipov V.M., Mikhaylov V.A., Sharipova N.N. *Klimaticheskaya komfortabel'nost' ko-lesnykh i gusenichnykh mashin* [Climate comfort of wheeled and caterpillar vehicles]. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. 197 p.
3. Stepanov I.S., Evgrafov A.N., Karunin A.L. *Avtomobili i traktory. Osnovy ergonomiki i*

- dizayna* [Automobiles and tractors. Basics of ergonomics and design]. Pod obshch. red. V.M. Sharipova. Moscow: MGTU «MAMI» Publ., 2002. 230 p.
4. Mikhaylov V.A., Sharipova N.N., Klimova E.V. Development of the design of an innovative local evaporator air cooler for tractor cabins. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2013. No 2(16). Vol. 1, pp. 179–184 (in Russ.).
 5. Mikhaylov V.A., Sharipova N.N. Innovative local water evaporator air cooler for tractor cabins. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2014. No 2, pp. 3–6 (in Russ.).
 6. Antonova N.V., Dubovin L.D., Egorov E.E. *Proektirovanie aviatsionnykh sistem konditsionirovaniya vozdukha* [Designing of aviation air conditioning systems]. Pod red. Yu.M. Shustrova. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2006. 384 p.
 7. Elektronnye resursy – patentnaya baza SShA. URL: <https://www.uspto.gov/>
 8. 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.
 9. Kutateladze S.S., Borishanskiy V.M. *Spravochnik po teploperedache* [Handbook on heat transfer]. Moscow: Nauka Publ., 1986. 414 p.
 10. Vargaftik L.P., Filippov A.A. *Spravochnik po teploprovodnosti zhidkostey i gazov* [Handbook on the thermal conductivity of liquids and gases]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1990. 352 p.
 11. GOST 22270-76. *Oborudovanie dlya konditsionirovaniya vozdukha, ventilyatsii i otopleniya* [Equipment for air conditioning, ventilation and heating]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1976. 22 p.

PERSPECTIVES OF USING HUMIDIFICATION SUBSYSTEMS FOR AIR CONDITIONING IN TRANSPORT

DSc in Engineering **V.I. Merkulov, A.A. Popov**

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia, Constructor.Alex@yandex.ru

With long-term human activity, many factors begin to make a significant influence on fatigue and reduced concentration. The question is even more urgent when it comes to drivers and operators of road construction and agricultural machinery. Work on these modes of transport involves increased danger and additional responsibility for life and health of people. Along with such parameters as ergonomics and optimization of the work and rest regime, the optimal values of the microclimate parameters in the driver's area or the operator of transport equipment play an important role. The microclimate parameters include: pressure, oxygen concentration in air, temperature and humidity. And if there is no need to regulate the oxygen content and pressure in land transport, in contrast to aircraft, and the temperature is regulated by the air conditioning systems of the car, the humidity parameters are not given proper attention. In the conditions of road transport and construction equipment, in areas of low humidity or increased dust generation, a low level of moisture content in conditioned air begins to play a key role in the increased fatigue and the development of drivers chronic diseases. This can be fraught with both a decline in efficiency and economic losses, and the creation of additional dangerous situations for life and health of people. The article discusses and compares the main methods of moisture saturation of dry air, and assesses the acceptability of their implementation in road transport, and conducts typical estimated calculations of changes in system parameters for load conditions. The peculiarities of the application of air humidification in air conditioning systems for ground and air transport are given, a generalized assessment of the methods of moistening, their advantages and disadvantages is made, the most optimal methods of humidifying air are revealed from the point of view of transport technology. For the calculations, the software complex MathCAD was used.

Keywords: humidity, moisture content, microclimate, air humidification system, land transport, aviation transport, fatigue.