

РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЛОКАЛЬНОГО ВОДОИСПАРИТЕЛЬНОГО ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛЯ КАБИН САМОХОДНЫХ МАШИН С УЧЕТОМ ИНДИВИДУАЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРОВ И ИЗМЕНЯЕМОСТИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ

д.т.н. Михайлов В.А., к.т.н. Дмитриев М.И., д.т.н. Ивоботенко Б.А.

Университет машиностроения
8 (495) 223-05-23, ostashkov@bk.ru

Рассмотрена возможность рационального использования в кабинах локального воздухоохлаждителя как средства нормализации теплового состояния операторов с учетом их пола, массы, а также изменяющейся температуры воздуха внешней среды в течение дневной рабочей смены. Показано, что для ассимиляции различных по уровню тепловыделений возможно большего числа операторов производительность аппарата по воздуху должна иметь бесступенчатую регулировку. В то же время выявлено, что при изменении внешней температуры специального регулирования подачи воздуха не требуется. При этом степень охлаждения воздуха в орошаемой насадке аппарата сохраняет принятое постоянное значение во всем диапазоне изменения начальной температуры и расхода воздуха.

Ключевые слова: нормализация теплового состояния оператора, тепловыделения оператора, подача воздуха, степень снижения температуры, холодопроизводительность, ассимиляционный перепад температур, бесступенчатое регулирование подачи воздуха

Одним из средств нормализации теплового состояния операторов самоходных машин в теплый период года является локальный водоиспарительный воздухоохлаждитель [1–7]. Режим работы такого аппарата, характеризующийся подачей воздуха L в область «голова-грудь» человека и степенью E_a снижения его температуры, выбирается, исходя из условия отведения от тела выделяемой организмом теплоты $Q_{\text{ч}}$. При оценке функционального качества опытной модели созданного в МАДИ такого аппарата [1] с постоянной $L = 120 \text{ м}^3/\text{ч}$ в результате эксперимента было выявлено, что из 20 испытуемых мужчин и женщин 85% дали положительную оценку локальному охлаждению. Это приемлемо согласно методике [8], но такой относительно высокий показатель все же не в полной мере отвечает перспективному направлению [9] в части удовлетворения возможно большего числа операторов с помощью индивидуального аппарата. Указанное вызывает

необходимость проведения соответствующего исследования, и здесь прежде всего требуется учитывать следующее.

В статье отмечается, что значения тепловыделений человека $Q_{\text{ч}}$ по ГОСТ 12.1.005-88 ориентированы на «стандартную персону», т.е. на «условного» человека, под которым подразумевается оператор массой $m_{\text{ч}} = 70 \text{ кг}$. Однако считается [10], что это приемлемо лишь для системы кондиционирования помещений значительного объема (концертные залы, спортивные комплексы, кинотеатры и др.), когда в них присутствует большое количество людей. Если же система предназначена для небольших помещений (каюты, купе-люкс, кабины и т.п.), то она должна обеспечивать тепловой комфорт не «условного», а конкретного находящегося здесь человека, особенно если помещение одноместное. Таким образом, в нашем случае речь идет об индивидуальной тепловой защите оператора, связанной с его массой, от

Таблица 1

Полные тепловыделения операторов в зависимости от их массы и пола при выполнении работы средней тяжести

Масса оператора, m_o , кг		60	70	80	90
Тепловыделения, Q_o , Вт	мужчины	168	196	224	252
	женщины	143	167	190	214

которой зависят тепловыделения организма. Их величину для операторов-мужчин предлагается [10] определять по выражению:

$$Q_o = m_o \cdot A_o \cdot (1 - \eta_o), [\text{Вт}]$$

где A_o – показатель активности деятельности оператора, зависящий от ее вида, Вт/кг; η_o – безразмерный показатель эффективности деятельности.

Приняв по данным [10] для оператора транспортного средства при выполнении им работы средней тяжести $A_o = 2,8$ Вт/кг и $\eta_o = 0$, получим $Q_o = 2,8m_o$.

Отметим, что по данным [11] тепловыделения женщин составляет 85% от тепловыделений мужчин при одинаковой их массе.

Результаты соответствующего расчета тепловыделений при наиболее характерных значениях массы операторов $m_o = 60...90$ кг [10] представлены в таблице 1.

Отметим, что по ГОСТ 12.1.005-88 для «условного» оператора-мужчины массой 70 кг при выполнении им работы средней тяжести его полные тепловыделения составляют 175...232 Вт, а по «Справочнику проектировщика» [12] – 200 Вт, что достаточно близко к значению $Q_o = 196$ Вт по таблице 1. Это свидетельствует о правомерности использования выражения (2) в нашем случае.

Созданный в МАМИ усовершенствованный локальный воздухоохладитель [13] обладает следующими функциональными показателями:

- режим повышенной подачи воздуха $L_{\max} = 125$ м³/ч (0,035 м³/с);
- режим пониженной подачи воздуха $L_{\min} = 100$ м³/ч (0,028 м³/с);
- коэффициент эффективности снижения температуры воздуха $E_a = 0,66$.

Оценим, в какой мере такой аппарат отвечает условию обеспечения нормализации теплового состояния операторов по таблице 1. Для этого используем соответствующие известные математические выражения при расчете не-

обходимых функциональных параметров, что представлено далее.

Тепловое состояние оператора нормализуется, если будет обеспечен достаточный отвод выделяемой его организмом теплоты Q_o в обдувающий открытую поверхность его тела поток охлажденного воздуха, который должен обладать необходимой ассимилирующей способностью, зависящей от холодопроизводительности аппарата Q_o . В нашем случае она определяется по выражению [9]:

$$Q_o = c_p \cdot \rho_a \cdot L \cdot (t - t_a), [\text{Вт}]$$

где $c_p = 1005$ Дж/(кг×°С) – теплоемкость воздуха; ρ_a – плотность воздуха при температуре t_a , кг/м³; L – подача воздуха из аппарата, м³/с; t и t_a – температура воздуха по сухому термометру соответственно начальная и на выходе из аппарата, °С.

Преобразовав это выражение и приняв $Q_o = Q_o$, получим формулу для определения минимально необходимой подачи L для нормализации теплового состояния оператора:

$$L = \frac{Q_o}{c_p \cdot \rho_a \cdot L \cdot (t - t_a)}, \left[\frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right] \quad (1)$$

Величина E_a определяется по выражению:

$$E_a = \frac{(t - t_a)}{(t - t_m)}, \quad (2)$$

где t_m – начальная температура обрабатываемого воздуха по мокрому термометру, °С.

Преобразовав выражение (2), при указанном выше значении $E_a = 0,66$ получим формулу для определения величины t_a :

$$t_a = t - 0,66 \cdot (t - t_m). \quad (3)$$

Как установлено [1], при локальном обдуве оператора неохлажденным воздухом при его повышенной скорости нормализация теплового состояния возможна лишь при температуре до 28°С, а при более высокой наружной тем-

пературе t необходимо охлаждение. В связи с этим, на первом этапе нашего исследования примем для открытой кабины машины исходные температурно-влажностные условия, соответствующие стандартным климатическим параметрам для г. Москвы [14]: $t = 28,5^{\circ}\text{C}$ и $t_m = 19^{\circ}\text{C}$. Тогда по формуле (3) определим, что $t_a = 22,2^{\circ}\text{C}$. Приняв при этой температуре $\rho_a = 1,196 \text{ кг/м}^3$, по выражению (1) для «условного» оператора-мужчины с массой $m_q = 70 \text{ кг}$ при $Q_q = 196 \text{ Вт}$ (по таблице 1), найдем, что $L = 0,0259 \text{ м}^3/\text{с}$ ($93 \text{ м}^3/\text{ч}$). Проведя аналогичным образом расчеты для операторов-мужчин с другой массой тела, а также учитывая, что тепловыделения операторов-женщин составляют $0,85$ тепловыделений мужчин, получим данные, приведенные в таблице 2.

Сравнение величин подачи воздуха из локального воздухоохладителя МАМИ с данными таблицы 2 для операторов-мужчин свидетельствует о следующем. Подача воздуха из аппарата $L_{\text{max}} = 125 \text{ м}^3/\text{ч}$ близка к оптимальной лишь для обеспечения теплового баланса $Q_o = Q_q$ оператора-мужчины массой 90 кг . Однако она является избыточной при их массе $60...80 \text{ кг}$.

Что же касается операторов-женщин, то для всех $L_{\text{max}} = 125 \text{ м}^3/\text{ч}$ является избыточной.

Как указывалось ранее, в аппарате МАМИ предусмотрен режим подачи $L_{\text{min}} = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$. Он практически приемлем для операторов-мужчин массой 70 и 80 кг , но избыточен при массе 60 кг и недостаточен при массе 90 кг . Для операторов-женщин такой режим приемлем только при массе 90 кг , но избыточен при массе $60...80 \text{ кг}$.

Таким образом, можно заключить, что для эффективного использования единого аппарата на практике подача воздуха должна иметь бесступенчатую (плавную) регулировку от 68 до $120 \text{ м}^3/\text{ч}$, исходя из субъективной реакции оператора. При этом с учетом современной тенденции автоматического управления техническими системами [15] регулирование ре-

жимов подачи не должно быть ручным, чтобы не отвлекать оператора от выполнения им его основной функции по обеспечению безопасной эксплуатации машины. Поэтому дальнейшей, однако выходящей за рамки настоящей статьи, задачей должно явиться усовершенствование конструкции локального воздухоохладителя в части автоматизации его работы. Современный же уровень электроники и микропроцессорной техники в установках кондиционирования воздуха помещений стационарных и мобильных объектов (система «климат-контроль») позволит решить такую задачу.

Рассмотренный этап оценки функционирования локального охладителя проводился на примере его использования в климатических условиях Средней полосы России при $t = 28,5^{\circ}\text{C}$. Поскольку же аппарат может эксплуатироваться и в других регионах страны с более высокой температурой и учитывая, что в течение дневной рабочей смены она изменяется, на втором этапе нашего исследования необходимо оценить, как это отразится на действии системы «воздухоохладитель-оператор».

В таблице 3 представлены результаты расчета изменения холодопроизводительности аппарата Q_o при постоянной $L = 93 \text{ м}^3/\text{ч}$ применительно к оператору массой 70 кг при $Q_q = 196 \text{ Вт}$ в процессе работы машины в Южном регионе страны в течение дневной рабочей смены [16]. Отметим, что по данным [11] величина полных тепловыделений человека является постоянной при температуре воздуха $t = 20^{\circ}\text{C}$ и выше.

Из приведенного следует, что аппарат в диапазоне $t = 29,0...37,3^{\circ}\text{C}$ при $Q_o = 217...340 \text{ Вт}$ обладает достаточным потенциалом для ассимиляции теплоизбытков $Q_q = 196 \text{ Вт}$. Однако величина Q_o здесь является избыточной, и, на первый взгляд, требуется регулирование подачи воздуха, чтобы обеспечить баланс $Q_o = Q_q$. Вместе с тем необходимо учитывать следующее.

Таблица 2

Минимально необходимая подача воздуха локального охладителя для операторов в кабине самоходных машин

Масса оператора, m_q , кг		60	70	80	90
Подача воздуха, L , $\text{м}^3/\text{ч}$	мужчины	80	93	106	120
	женщины	68	79	90	102

Таблица 3

Изменение холодопроизводительности локального аппарата в течение дневной рабочей смены

Масса оператора, тч, кг		60	70	80	90
Подача воздуха, L, м ³ /ч	мужчины	80	93	106	120
	женщины	68	79	90	102

По данным [1] ассимилирующая способность воздуха при его локальной подаче определяется выражением:

$$Q_{ac} = 1,07 \cdot (2,5 + 10,3 \cdot \sqrt{\vartheta_a}) \cdot (t_u - t_m),$$

где: ϑ_a – скорость движения воздуха около тела оператора, м/с, обусловленная подачей L ; $t_u = 35^\circ\text{C}$ – температура обдуваемой поверхности тела оператора, свидетельствующая о его нормальном тепловом состоянии.

Из этой формулы следует, что при постоянной ϑ_a (т.е. при $L = const$) Q_{ac} зависит от величины ассимиляционного перепада температур $\Delta t_{ac} = 35 - t_a$. При этом, чем меньше значение t_a по сравнению с t_u , тем интенсивнее будет отводиться теплота от тела оператора, и наоборот, при возрастании t_a отвод теплоты замедляется. Если же Δt_{ac} сохраняет постоянное значение, то $Q_{ac} = const$, т.е. она теоретически не будет зависеть от внешней температуры t_a по таблице 3.

Поскольку ранее была дана оценка работы аппарата при $t = 28,5^\circ\text{C}$ для условий г. Москвы (практически на уровне $t = 29^\circ\text{C}$ по табл. 3), в дальнейшем будем рассматривать режимы работы аппарата при более высокой температуре $t = 34,8...37,3^\circ\text{C}$, поскольку здесь имеет место существенное повышение $Q_0 = 304...340$ Вт.

По данным таблицы 3 среднее значение t_a в этом случае составляет $25,5^\circ\text{C}$. Отклонение от этой величины $t_a = 24,9^\circ\text{C}$ при $t = 34,8^\circ\text{C}$ составляет 2,4%, а $t_a = 26,3^\circ\text{C}$ при $t = 37,3^\circ\text{C}$ – 3,1%, что несущественно. Это с практической точки зрения позволяет считать в нашем случае $\Delta t_{ac} = const$. Следовательно, здесь при изменении t специальное регулирование подачи воздуха охладителя не требуется. Несколько же повышенная при этом в силу естественного саморегулирования аппарата [16, 17] его холодопроизводительность служит гарантией надежного отведения теплоты от оператора.

Вместе с тем встает вопрос, в какой мере насадка воздухоохлаждителя может обеспечить принятую нами постоянную степень снижения температуры $E_a = 0,66$ при переменной L в диапазоне от 68 до 120 м³/ч по табл. 2 (т.е. при изменении ее величины в 1,76 раза) и колебании начальной температуры от 28,5 до 37,3^oC. Как показали результаты исследования [18], это осуществимо, поскольку для интенсифицированной насадки колебание начальной температуры обрабатываемого воздуха в рабочем диапазоне 25...40^oC и изменение его расхода в 2 раза от первоначального практически не оказывает влияния на величину E_a конкретного аппарата.

Литература

1. Михайлов В.А., Сотникова Е.В., Карев С.В. Нормализация теплового состояния оператора транспортного средства локальным охлаждением // Безопасность жизнедеятельности. – 2008. – № 9.
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. Михайлов В.А., Шарипова Н.Н. Оценка функциональных качеств локального воздухоохлаждителя в кабине трактора // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – № 10.
4. Михайлов В.А., Шарипова Н.Н., Климова Е.В. Разработка конструкции инновационного локального водоиспарительного воздухоохлаждителя для кабин тракторов // Известия МГТУ «МАМИ». – 2013. – № 2(16), т. 1.
5. Михайлов В.А., Шарипова Н.Н., Тарасова Л.И. Выбор рационального энергосберегающего способа нормализации теплового состояния оператора трактора в теплый период года // Известия МГТУ «МАМИ». – 2013. – № 2(16), т. 1.
6. Михайлов В.А., Шарипова Н.Н. Теоретические основы создания орошаемой насадки регулярной структуры для воздухоохлаждителей кабин колесных и гусеничных машин // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 12.

7. Михайлов В.А., Шарипова Н.Н. Орошаемые насадки для обработки воздуха в системах колесных и гусеничных машин // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 4.
8. Giacco M. Сравнительный анализ двух методик оценки климатического комфорта на примере климатизации морского круизного лайнера. // АВОК. – 2005. – № 3.
9. Fanger P.O. Качество внутреннего воздуха в XXI веке: влияние на комфорт, производительность и здоровье людей // АВОК. – 2003. – № 4.
10. Бурцев С.И., Цветков Ю.Н. Тепловой и газовый комфорт с учетом индивидуальных особенностей человека // Теплоэнергоэффективные технологии. – 2002. – № 1.
11. Меклер В.Я., Овчинников П.А. Промышленная вентиляция и кондиционирование воздуха. – М.: Стройиздат. – 1978.
12. Справочник проектировщика. Внутренние санитарно-технические устройства. Часть 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Книга 1. – М.: Стройиздат. – 1992.
13. Михайлов В.А., Шарипова Н.Н. Инновационный локальный водоиспарительный воздухоохладитель для кабин тракторов // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 2.
14. Строительные нормы и правила. Отопление, вентиляция и кондиционирование. СН и П 2.04.05-91*. – М.: Минстрой России, ГЦ ЦПП. – 1994.
15. Управление техническими системами / Е.Б. Бунько, К.И. Кеша, Е.Г. Мурачев и др. Под ред. В.И. Харитоновой. – М.: Форум. – 2010.
16. Михайлов В.А. Регулирование систем нормализации микроклимата тракторных кабин в теплый период года // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1995. – №2.
17. Богословский В.Н., Щеглов В.П., Разумов Н.Н. Отопление и вентиляция. – М.: Стройиздат. – 1980.
18. Михайлов В.А. Создание системы модульных типизированных и унифицированных средств нормализации микроклимата и оздоровления воздушной среды в кабинах самоходных машин. Автореф. дис... д-ра техн. наук. – М.: МАМИ, 1999.