

Выбор рационального энергосберегающего способа нормализации теплового состояния оператора трактора в тёплый период года

д.т.н. проф. Михайлов В.А., к.т.н. доц. Шарипова Н.Н., Тарасова Л.И.

Университет машиностроения
(495)223-05-23, доб. 1587, avt@mami.ru

Аннотация. Проанализированы способы нормализации теплового состояния оператора в тракторной кабине путём объёмного кондиционирования и за счёт локального действия с учётом специфики объектов применения. Установлена рациональность использования в кабинах различного объёма при эксплуатации тракторов в любых климатических зонах страны единого для всех машин водоиспарительного энергосберегающего локального воздухоохладителя.

Ключевые слова: система кондиционирования воздуха, нормализация теплового состояния оператора, локальное охлаждение, водоиспарительный воздухоохладитель.

Безопасные условия труда на тракторах характеризуются различными факторами, из которых одним из важнейших является нормализация теплового состояния оператора в тёплый период года с помощью различных установок кондиционирования воздуха (УКВ). С этой целью традиционно на мощных дорожных тракторах применяют зарубежные хладоновые кондиционеры (воздухоохладители) объёмного действия, создающие необходимые параметры микроклимата во всём пространстве кабины путём «вытеснения» из него тёплого воздуха за счёт подачи сюда потока охлаждённого воздуха. Это обуславливает относительно высокие энергозатраты на привод УКВ от ДВС трактора, приводящие к дополнительному расходу топлива.

Федеральный Закон РФ "Об энергосбережении" №28-ФЗ от 03.04.96 г. предопределяет снижение потребления энергозатрат на функционирование УКВ. Его выполнение на тракторах способствует уменьшению расхода топлива и выбросов в атмосферу токсичных веществ с отработавшими газами.

Нормирование параметров микроклимата в кабинах тракторов при объёмном кондиционировании воздуха в тёплый период года производится по ГОСТ 12.2.120-88 [1] в зависимости от температуры наружного воздуха на местности в зонах эксплуатации. Так, при расчётной наружной средней температуре t_A воздуха в 13 часов самого жаркого месяца (параметр «А» по СНиП 2.04.05-91 [2] до 25°C температура воздуха t_K в объёме кабины не должна превышать 28°C ; для зон с $t_A = 25...30^{\circ}\text{C}$ $t_K \leq 31^{\circ}\text{C}$; для зон с $t_A > 30^{\circ}\text{C}$ $t_K \leq 33^{\circ}\text{C}$. При этом перепад температуры воздуха по объёму кабины не должен быть более 4°C , его относительная влажность $\varphi_K \leq 60\%$, а скорость движения $V_K \leq 1,5$ м/с. Указанные параметры микроклимата учитывают категорию производственной деятельности тракториста (работа средней тяжести) и прерывистый характер его нахождения в кабине и вне её в течение рабочей смены. Последнее обстоятельство особенно характерно для универсально-пропашных тракторов, для которых ставится под сомнение целесообразность применения объёмного кондиционирования воздуха.

При проведении, например, работ по культивации периодичность выходов оператора из кабины составляет 20-30 минут. Если он открыл дверь кабины, то пока выходит из неё, а затем через определённое время опять открывает дверь и возвращается на рабочее место, то даже при непрерывном функционировании УКВ температура воздуха в кабине резко изменяется по величине в сторону её повышения за счёт поступления наружного воздуха через дверной проём.

Обслуживание орудий (например очистка лап культиватора) требует времени, в течение которого оператор подвергается воздействию высокой температуры наружного воздуха и прямой солнечной радиации. Это, естественно, приводит к тепловой перегрузке его организма, сопровождаемой негативными ощущениями. По возвращении оператора в кабину при закрытии её двери воздух интенсивно охлаждается за счёт действия УКВ, но, чтобы на рабо-

чем месте вновь установилась равномерная по всему объёму кабины температура, должно пройти какое-то время. Как показывает практика, на это уходит 15-25 минут, т.е. примерно тот же период, через который оператор снова должен покинуть кабину. В связи с этим, по существу, кондиционирование здесь уже не является объёмным в классическом понимании с достижением в кабине установившегося (квазистационарного) температурного режима именно из-за специфики деятельности тракториста. Отметим, что указанный квазистационарный режим присущ лишь помещениям, относящимся к категории постоянных рабочих мест, где оператор находится не менее 3 часов. Рассмотренное обстоятельство обуславливает изыскание иных, специфических средств обеспечения нормализации теплового состояния тракториста, учитывая, что, по данным исследования [3], этот вопрос может решаться неоднозначно.

Для определения рационального способа решения нашей задачи проведём следующий анализ. При объемном кондиционировании УКВ должна иметь холодопроизводительность, рассчитанную на ассимиляцию всех теплопритоков в кабину [4], которые и составляют тепловую нагрузку

$$Q_{\text{п}} = Q_{\text{вн}} + Q_{\text{огр}} + Q_{\text{инс}} + Q_{\text{инф}} + Q_{\text{ч}}, \text{ Вт} \quad (1)$$

где: $Q_{\text{вн}}$ - тепловыделения внутренних механизмов; $Q_{\text{огр}}$ - теплопоступления за счёт передачи через ограждения; $Q_{\text{инф}}$ - теплопоступления за счёт инфильтрации воздуха через неплотности ограждений; $Q_{\text{инс}}$ - теплопоступления за счёт солнечной радиации; $Q_{\text{ч}}$ - поступления за счёт тепловыделений человека (оператора).

Полная холодопроизводительность по отведённой явной теплоте из обрабатываемого в УКВ воздуха определяется выражением [4]

$$Q_o = c_p \cdot \rho_0 \cdot L_0 \cdot (t_n - t_0), \text{ Вт} \quad (2)$$

где: c_p - теплоёмкость воздуха, Дж/(кг·К); L_0 - объёмная подача воздуха из УКВ, м³/с; t_n - начальная температура обрабатываемого воздуха, °С; t_0 - температура охлаждённого воздуха после УКВ, °С; ρ_0 - плотность воздуха при температуре t_0 , кг/м³.

Преобразовав выражение (2), найдём необходимую подачу охлаждённого воздуха:

$$L_0 = Q_o / [c_p \cdot \rho_0 \cdot (t_n - t_0)].$$

Уровень энергетического совершенства УКВ в режиме охлаждения оценивается с помощью холодильного коэффициента [4]

$$\eta_0 = Q_o / N_0, \quad (3)$$

где: N_0 - потребляемая мощность УКВ на достижение Q_o .

Тепловая нагрузка $Q_{\text{п}}$ по выражению (1) является переменной по величине и зависит в значительной степени от внешней температуры и объёма кабины, что связано с площадью её ограждений. Тепловыделения $Q_{\text{вн}}$ внутренних механизмов в современных кабинах незначительны. Теплопоступления $Q_{\text{ч}}$ от оператора полагают постоянными, не зависящими от температуры окружающего воздуха [5], и в нашем случае при работе средней тяжести категории Пб составляют 233-290 Вт.

Теплонапряженность стационарных помещений характеризуется удельной тепловой нагрузкой [6], приходящейся на 1 м³ их объёма $V_{\text{п}}$:

$$q_{\text{уд}} = Q_{\text{п}} / V_{\text{п}}. \quad (4)$$

При этом к незначительным теплоизбыткам относятся те, которые не превышают 23 Вт/м³. Если они больше, то такие помещения относят к категории «горячих цехов», и в них решение вопроса нормализации теплового состояния оператора требует специфического подхода. В частности, по данным [6] здесь может быть использована местная вентиляция локального действия, при которой осуществляется «душирование» оператора направленным на него потоком охлаждённого воздуха. В объёме же самого помещения температура воздуха остаётся высокой.

По данным [7] при повышенной температуре наружного воздуха в Южном регионе

страны тепловая нагрузка кабины объёмом $3,4 \text{ м}^3$ может достигать $Q_{\text{п}} = 1460 \text{ Вт}$. Тогда её удельная тепловая нагрузка $q_{\text{уд}}$ по выражению (4) составит $429,4 \text{ Вт/м}^3$, что более чем на порядок превосходит удельную нагрузку «горячих цехов» стационарных помещений. Даже в невероятном случае, когда в кабине будут только тепловыделения человека $Q_{\text{ч}} = 290 \text{ Вт}$, то здесь $q_{\text{уд}}$ составит $82,3 \text{ Вт/м}^3$. Поэтому можно сделать вывод, что в кабинах тракторов вопрос нормализации теплового состояния оператора необходимо решать с учётом указанной специфики.

Необходимо также иметь в виду, что по данным [7] количество дней в году, когда требуется охлаждение приточного воздуха, составляет: в Южном регионе - до 100; в Средней полосе - до 50; в Северном регионе - до 25. Поскольку же тепловая нагрузка кабины трактора одной и той же модели в этих регионах различна, то здесь требуются кондиционеры различной холодопроизводительности. Если же учесть, что кабины тракторов различного класса имеют объём от $1,5$ до $3,4 \text{ м}^3$, то для объёмного кондиционирования необходим типизированный ряд охладителей [4].

Укажем также на ещё один аспект использования систем объёмного кондиционирования воздуха в кабинах тракторов, связанный с оценкой параметров микроклимата. Как указывалось выше, по ГОСТ 12.2.120-88 такая оценка производится по предельно допустимым значениям температуры $t_{\text{к}}$, относительной влажности $\phi_{\text{к}}$ и скорости движения $V_{\text{к}}$ воздуха на рабочем месте. Однако это недостаточно объективно и не учитывает требований ГОСТ 12.1.005-88 [8], касающегося общих санитарно-гигиенических требований к воздуху рабочей зоны стационарных объектов, где предписывается нормирование сочетаний $t_{\text{п}}$, $\phi_{\text{п}}$ и $V_{\text{п}}$ в помещении: при $t_{\text{п}} = 28^\circ\text{C}$ должно быть $\phi_{\text{п}}$ не более 55% и $V_{\text{п}} = 0,2 \text{ м/с}$; при $t_{\text{п}} = 27^\circ\text{C}$, $\phi_{\text{п}} = 60\%$ и $V_{\text{п}} = 0,3 \text{ м/с}$; при $t_{\text{п}} = 26^\circ\text{C}$ $\phi_{\text{п}} = 65\%$ и $V_{\text{п}} = 0,4 \text{ м/с}$; при $t_{\text{п}} = 25^\circ\text{C}$ $\phi_{\text{п}} = 70\%$ и $V_{\text{п}} = 0,5 \text{ м/с}$; при $t_{\text{п}} = 24^\circ\text{C}$ и ниже $\phi_{\text{п}} = 75\%$ и $V_{\text{п}} = 0,6 \text{ м/с}$. Таким образом, необходим интегральный показатель обеспечения теплового комфорта оператора, который является «эквивалентно-эффективной температурой» [9], более полно отражающей субъективные ощущения человека. При этом указанные условные количественные показатели теплового комфорта человека дают возможность оценить его при использовании на рабочем месте любых систем вентиляции и кондиционирования воздуха.

Целевой функцией при подаче охлаждённого воздуха в кабину является нормализация теплового состояния оператора. Как следует из выражения (1), в итоге нам необходимо ассимилировать $Q_{\text{ч}}$, т.е. здесь полезная холодопроизводительность $Q_{\text{о}}^{\text{п}}$ аппарата должна равняться $Q_{\text{ч}}$. При объёмном кондиционировании энергия на охлаждение воздуха в кабине тратится также на блокирование остальных составляющих общей тепловой нагрузки. Кроме того, из кабины охлаждённый до температуры $t_{\text{к}}$ воздух через её неплотности вытесняется в атмосферу в количестве равном L_0 . Таким образом, на «охлаждение» атмосферы непродуктивно будет тратиться тепловая энергия в количестве

$$Q_{\text{выб}} = c_{\text{р}} \cdot \rho_{\text{к}} \cdot L_0 \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{к}}), \quad (5)$$

где: $c_{\text{р}}$ - плотность воздуха при температуре $t_{\text{к}}$, кг/м^3 .

Например, по данным [4, 7] для Южного региона для кабины объёмом $3,4 \text{ м}^3$ при $t_{\text{п}} = 37,3^\circ\text{C}$, $t_{\text{к}} = 29,3^\circ\text{C}$, $c_{\text{р}} = 1005 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$, $c_{\text{к}} = 1,168 \text{ кг/м}^3$ и $L_0 = 480 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($0,133 \text{ м}^3/\text{с}$) $Q_{\text{выб}}$ составит 1250 Вт при общей холодопроизводительности кондиционера $Q_{\text{о}} = 3400 \text{ Вт}$. Получается, что здесь 36,8% общей холодопроизводительности кондиционера объёмного действия расточительно тратится на «охлаждение» наружного воздуха. Отметим, что при величине холодильного коэффициента $\eta_0 = 0,9$ по данным [4] при указанной Q_0 энергозатраты на привод такого кондиционера составят 3780 Вт .

Ранее отмечалось, что при объёмном кондиционировании необходим типаж УКВ. Это может найти отражение лишь в моделях вновь создаваемых тракторов. Однако в хозяйствах в эксплуатации находятся ранее выпущенные машины, на которых воздухоохладителей нет.

Поэтому целесообразно закрыть этот вопрос с помощью относительно простых и достаточно дешевых аппаратов, которые можно было бы смонтировать в кабинах для защиты операторов от перегрева при проведении работ в жаркий период года. Если обратиться к зарубежному опыту, то в последние 15 лет там промышленностью были освоены локальные водоиспарительные воздухоохладители для легковых автомобилей и других самоходных машин, хотя в их кабинах широко применяются хладоновые кондиционеры.

Результаты теоретической и экспериментальной оценок эффективности локального охлаждения оператора при подаче на него в область «голова—грудь» потока воздуха в количестве $110-120 \text{ м}^3/\text{ч}$ приведены в работе [9]. При этом при теоретической оценке применялась номограмма «эффективно-эквивалентных температур», а при экспериментальных исследованиях использовалась методика оценки теплового состояния оператора по семибалльной шкале [11] применительно к кабине городского маршрутного автобуса. Дополнительно к этому авторами проведена теоретическая оценка функциональных качеств локального водоиспарительного воздухоохладителя в кабине трактора [10]. Таким образом, результаты наших исследований [9,10] свидетельствуют о том, что локальное водоиспарительное охлаждение оператора в достаточной мере способно нормализовать тепловое состояние его организма при относительно низких энергозатратах. Так, по данным [9] величина холодильного коэффициента при водоиспарительном охлаждении составляет не менее $\eta_0 = 5$. Тогда при $Q_0=Q_{\text{ч}}=290 \text{ Вт}$ энергозатраты составят всего $N_0=58 \text{ Вт}$. Отметим, что в нашем случае речь идёт об едином аппарате для всех кабин и зон эксплуатации тракторов.

В заключение укажем следующее. Зарубежные исследования [12] показывают, что при объёмном кондиционировании помещений с помощью центральных систем качество внутреннего воздуха в них при наличии нескольких людей является неудовлетворительным даже при формальном соблюдении нормируемых параметров микроклимата. Прогрессивным направлением здесь в части удовлетворения каждого человека с учётом индивидуальных особенностей его организма (возраст, пол и т.д.) считается дополнительная подача охлаждённого воздуха из индивидуального аппарата в количестве не менее $110 \text{ м}^3/\text{ч}$ непосредственно в зону дыхания потребителя. Следовательно, это подтверждает, что в решении нашей специфической задачи нормализации теплового состояния тракториста в современных условиях локальное водоиспарительное охлаждение можно считать рациональным.

Литература

1. ГОСТ 12.2.120-88. ССБТ. Кабины и рабочие места операторов тракторов, самоходных строительно-дорожных машин, одноосных тягачей, карьерных самосвалов и самоходных сельскохозяйственных машин. Общие требования безопасности.
2. Строительные нормы и правила. Отопление, вентиляция и кондиционирование. СНиП 2.04.05-91. - М.: Минстрой России, ГЦ ЦПП, 1994. - 64 с.
3. Кошечев В.С., Кузнец Е.А. Физиология и гигиена индивидуальной защиты человека в условиях высоких температур. -М.: Медицина,1986. - 255 с.
4. Михайлов В.А., Шарипова Н.Н. Средства нормализации микроклимата и оздоровления воздушной среды в кабинах тракторов/ Под общ. ред. В.М. Шарипова. - М.: МГТУ «МАМИ», 2002. - 90 с.
5. Графкина М.В., Михайлов В.А., Нюнин Б.Н. Безопасность жизнедеятельности: учебник / Под общ. ред. Б.Н. Нюнина. - М.: ТК Велби, Изд-во «Проспект», 2007. - 608 с.
6. Отопление и вентиляция: Учеб. для вузов. В 2-х ч. Часть 2, Вентиляция/ В.Н. Богословский, В.И. Новожилов, В.Д. Симаков, В.П. Титов; Под общ ред. В.Н. Богословского. - М.: Стройиздат, 1976. - 439 с.
7. Михайлов В.А., Шарипова Н.Н. Инновация в конструкции хладонового кондиционера воздуха в тракторной кабине. // Тракторы и сельхозмашины, 2009, № 4. - с. 34-39.
8. ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования.
9. Михайлов В.А., Сотникова Е.В., Карев С.В. Нормализация теплового состояния оператора

транспортного средства локальным охлаждением. // Безопасность жизнедеятельности, 2008, № 9. - с. 2-9.

10. Михайлов В.А., Шарипова Н.Н. Оценка функциональных качеств локального воздухоохлаждителя в кабине трактора. // Тракторы и сельхозмашины, 2012, № 10. - с. 20-23.
11. Giacco M. Сравнительный анализ двух методик оценки климатического комфорта на примере систем климатизации морского круизного лайнера. // АВОК, 2005, № 3. www.abok.ru.
12. Fanger P.O. Качество внутреннего воздуха в XXI веке: влияние на комфорт, производительность и здоровье людей. // АВОК, 2003, № 4. www.abok.ru.

Разработка конструкции инновационного локального водоиспарительного воздухоохлаждителя для кабин тракторов

д.т.н. проф. Михайлов В.А., к.т.н. доц. Шарипова Н.Н., Климова Е.В.

Университет машиностроения
(495) 223-05-23, доб. 1587, avt@mami.ru

Аннотация. Предложена конструкция инновационного водоиспарительного воздухоохлаждителя для нормализации теплового состояния тракториста путём локальной подачи на него потока воздуха. Для расширения рынка сбыта аппарат имеет две модификации: питание от сети напряжением 12 В постоянного тока в расчете на использование в тёплый период года в кабинах машин любого объема; питание от сети напряжением 220 В переменного тока в расчете на использование в помещениях стационарных объектов. Применительно к тракторам аппарат может быть использован как на их новых моделях, так и на объектах, находящихся в эксплуатации, где отсутствуют воздухоохлаждители.

Ключевые слова: локальный водоиспарительный воздухоохлаждитель; нормализация теплового состояния оператора; унификация; комплектующие изделия; орошаемая водой насадка; осевой вентилятор; водяной насос

Как показывают исследования [1-4], в последнее время уделяется определенное внимание к использованию в помещениях стационарных и мобильных объектов воздухоохлаждителей локального действия как рационального решения задачи нормализации теплового состояния операторов с учётом особенностей их организма и специфики работы. Применительно к водителю самоходных машин (тракторов, строительно-дорожных машин, грузовых автомобилей, автобусов и др.) установлено [1, 2], что наиболее приемлемым здесь является водоиспарительный адиабатный воздухоохлаждитель с орошаемой насадкой с единой производительностью на уровне 110-130 м³/ч для всех кабин при степени снижения температуры воздуха за счет испарительного охлаждения воды, характеризующейся коэффициентом эффективности $E_a = 0,65-0,7$. Поскольку указанный тип аппарата представляет практический интерес для решения задачи по нормализации теплового состояния оператора трактора, встает вопрос о необходимости разработки его приемлемой конструкции.

При создании такого агрегата как технической системы важно выбрать наиболее подходящие составляющие элементы его подсистем (аппарата водоиспарительного действия, вентилятора, устройства контроля, водяного насоса, воздухораспределителя и т.п.). Отметим, что под рациональным (оптимальным) понимается такой вариант изделий, который при минимальных затратах в сфере его производства и эксплуатации полностью (или почти полностью) удовлетворяет потребности при выполнении им назначенной функции [5].

В машиностроении распространена унификация, служащая научно-обоснованным методом создания рациональной номенклатуры изделий многократного применения. Одним из основных направлений развития современной техники, использующим унификацию, является разработка технических систем, в основу конструирования которых положен принцип агрегатно-модульного построения изделий. Это позволяет обобщить ранее разработанные изолированные конструктивные и технологические решения и свести их в новую единую техни-