

## ГИБРИДНАЯ ДВУХКАСКАДНАЯ СХЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ СЖАТОГО ВОЗДУХА ДЛЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЯЮЩИХ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

© 2009 Н.В. Савченко

Самарский государственный аэрокосмический университет

Поступила в редакцию 06.04.2009

Приведены расчеты и анализ предельных характеристик гибридной двухкаскадной схемы охлаждения сжатого воздуха, предназначенного для использования в энергопотребляющих средствах индивидуальной защиты.

Полученные результаты позволяют конструировать кондиционируемую одежду для работы в условиях нагревающего производственного микроклимата с температурой до  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Ключевые слова: средства индивидуальной защиты; кондиционируемая одежда нагревающий производственный микроклимат; двухкаскадная схема охлаждения сжатого воздуха; вихревой эффект.

Вихревой эффект энергетического разделения газа [1] известен и нашел широкое применение в технике для охлаждения и нагрева газа. При этом используется потенциальная энергия давления самого рабочего тела. Простота конструкций и, вместе с тем, надежность стали основными аргументами в выборе вихревых охладителей для индивидуального кондиционирования работающих на производстве с нагревающим микроклиматом [3]. На сегодняшний день применение кондиционеров, использующих в своей конструкции вихревой эффект, позволяют проводить работу при температуре окружающей среды до  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Однако следует признать, что “простые” схемы кондиционирования на этом температурном уровне свои возможности исчерпали. Дальнейшее увеличение температурной эффективности в них возможно только за счет увеличения давления сжатого воздуха, а это не целесообразно.

Выходом из сложившегося положения на наш взгляд является более полное использование энергии, содержащейся в сжатом воздухе.

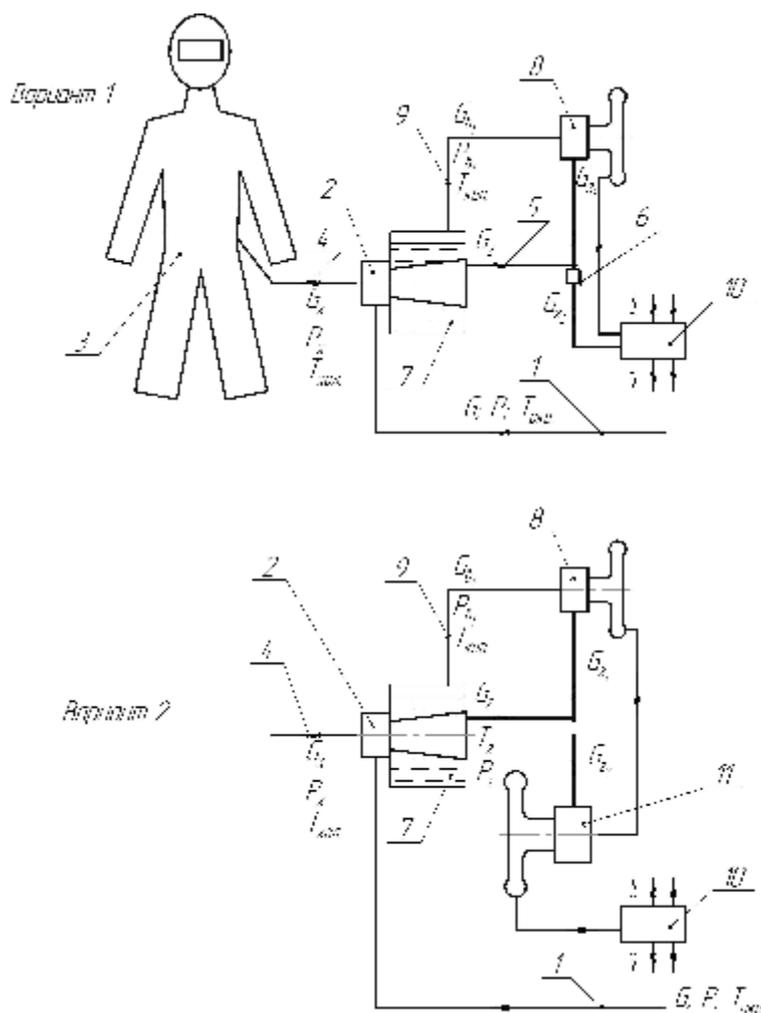
В “простых” схемах кондиционирования большая часть энергии в виде потенциальной (избыточное давление) и кинетической (повышенная температура позволяет получить большие скорости истечения), отводимая (сбрасываемая) из вихревой трубы с потоком горячего воздуха – не использовались. Нами ранее уже рассматривалась одноступенчатая гибридная схема кондиционирования, которая утилизировала до 20 % расхода горячего воздуха, отводимого из вихревого охладителя (вихревой трубы) [3]. Данная схема охлаждения воздуха позволяет создать кондиционируемую одежду для работы в произ-

водственной среде, имеющей температуру до  $+110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Более полная утилизация отводимой с горячим воздухом энергии, возможна при использовании несколько не принципиально усложненной конструкции кондиционера, имеющей двухкаскадное вакуумирование. Такая схема получения кондиционируемого воздуха позволяет еще несколько повысить температуру применимости кондиционируемой одежды. Эффект достигается за счет снижения температуры кипения воды. Это обусловлено более низким давлением откачиваемого пара, получаемым при двухкаскадном вакуумировании.

На рис 1 приведены два варианта гибридной схемы кондиционирования: однокаскадная схема – вариант 1, двухкаскадная схема – вариант 2 (на рис. использована общая для обоих вариантов нумерация элементов).

Работа однокаскадной гибридной схемы кондиционирования (вариант 1) происходит следующим образом. Сжатый воздух по гибкому шлангу 1 с расходом  $G$  поступает в вихревую трубу 2 индивидуального кондиционера, расположенного на внешней поверхности кондиционируемой одежды 3. Принимаем, что температура сжатого воздуха в подводимом шланге на входе в кондиционер равна температуре окружающей среды. Это становится возможным при нахождении работающего на достаточном расстоянии в зоне повышенной температуры. Часть подведенного к кондиционеру воздуха после охлаждения до температуры  $T_{хол} = 298\text{K}(25\text{ }^{\circ}\text{C})$  с расходом  $G_x$  по каналу 4 поступает в кондиционируемую одежду. Горячая составляющая воздуха, образующаяся в вихревой трубе, с расходом  $G_2$  по каналу 5 выводится из нее и делится на две составляющие с расходами  $G_{21}$  и  $G_{22}$ . Воздух с рас-

Савченко Нелли Вячеславовна, кандидат технических наук, доцент. E-mail: snellyv@mail.ru



**Рис. 1.** Однокаскадная (вариант 1) и двухкаскадная (вариант 2) гибридная схема индивидуального кондиционирования

ходом  $G_{2_1}$  поступает в вихревой вакуум-насос 8, а с расходом  $G_{2_2}$  через дроссель 6 в выпускное устройство 10. Это выпускное устройство введено в конструкцию для регламентированного сброса воздуха по направлению и скорости, т.к. хаотичный сброс из-за его высокой температуры мог бы создать определенные трудности при эксплуатации. Используемая в кондиционере вихревая труба охлаждается кипящей в камере 7 водой. За счет откачивания пара воды из камеры, в ней устанавливается давление ниже атмосферного и вода, при этом кипит при пониженной температуре. Образующийся пар с расходом  $G_6$  по каналу 9 поступает в вакуум-насос 8 и далее вместе с активным воздухом из вакуум-насоса сбрасывается в окружающую среду через выпускное устройство. Охлаждение в гибридной однокаскадной схеме обеспечивает необходимую температуру кондиционирующего воздуха при температуре окружающей среды до  $T_{окр} = 383K(110^{\circ}C)$ .

Мы поставили задачу, используя те же физические явления, получить несколько большее снижение температуры воздуха в кондиционере и за счет этого повысить температуру его применимости. В предыдущей схеме часть горячего воздуха просто сбрасывалась. Использовать его полностью, увеличив размеры вакуум-насоса, и перейти на большее разрежение за счет уменьшения коэффициента эжекции с сохранением абсолютного расхода эжектируемой среды мы полагаем будет менее целесообразным, чем использование двухкаскадного вакуумирования.

В схеме гибридного двухкаскадного кондиционирования (вариант 2) часть горячего воздуха с расходом  $G_{2_2}$  поступает в вакуум-насос 11 вихревого кондиционера. Вакуум-насос откачивает смесь водяного пара и воздуха из вакуум-насоса 8 первого каскада, что приводит к дополнительному понижению давления перед первым каскадом, в камере 7. Охлаждающая вихревую трубу вода кипит при более низкой температуре, температурная эффективность охлаждаемой

вихревой трубы увеличивается. Используемые в схеме вихревые вакуум-насосы обладают стабильными характеристиками в широком диапазоне параметров, у них нет необходимости перенастройки при их изменении. Однако они имеют более низкий, по сравнению со струйными эжекторами, коэффициент эжекции. При проектировании двухкаскадной схемы определяющими являются предельные располагаемые характеристики по утилизируемому горячему воздуху. Они определяют возможные режимы работы системы в целом. Расходные характеристики кондиционера описываются системой из шести алгебраических уравнений:

$$G = G_x + G_2$$

$$G_x = \mu G$$

$$G_2 = G_{2_1} + G_{2_2}$$

$$G_6 = \kappa G$$

$$G_6 = n_{э1} G_{2_2}$$

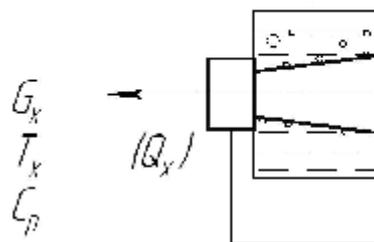
$$G_{2_1} = n_{э1} G_{2_2} - G_6$$

Систему уравнений необходимо решить относительно доли холодного потока  $\mu = f(n_{э1}, n_{э2}, \kappa)$ . Коэффициенты эжекции

$n_{э1}, n_{э2}$  являются характеристиками вихревых вакуум-насосов и выбираются по результатам эксперимента или из справочной литературы. Используемые вакуум-насосы обоих каскадов несколько отличаются по размерам и величине абсолютного создаваемого давления, но идентичны по конструкции.

Принимаем  $n_{э1} = 0,8n_{э2} = n_{э}$ . В конечном

виде 
$$\mu = 1 - \frac{1,8n_{э} + 1}{0,8n_{э}^2} \kappa$$



Относительный весовой расход воды  $\kappa$ , используемой в процессе охлаждения вихревой трубы, определяется на основе теплового баланса (рис. 2).

Тепловой баланс имеет вид:

$$Q = Q_x + Q_2 + Q_{кип}$$

где  $Q$  – тепло, поступающее со сжатым воздухом;  
 $Q_x$  – тепло, отводимое с холодной составляющей воздуха;

$Q_2$  – тепло, отводимое с горячей составляющей воздуха;

$Q_{кип}$  – тепло, затрачиваемое на кипение охлаждающей воды.

$$G \cdot C_p \cdot T_{окр} = G_x \cdot T_{хол} \cdot C_p + G_2 \cdot T_{кип} \cdot C_p + G_6 \cdot C$$

где  $C_p$  – теплоемкость воздуха,

$C$  – удельная теплота парообразования воды.

Принимаем в виде допущения, что температура отводимого на утилизацию горячего воздуха равна температуре кипения воды охлаждающей вихревую трубу  $T_2 = T_{кип}$ . В реальном процессе теплообмена это равенство можно рассматривать только как предельное. Температура отводимого горячего воздуха несколько выше. Принятое допущение позволяет определить предельное значение относительного весового расхода охлаждающей воды.

В конечном итоге относительный расход охлаждающей воды имеет вид

$$\kappa = \frac{C_p}{C} [T_{окр} - T_2 - \mu(T_x - T_2)].$$

На графике (рис. 3) приведены значения относительного весового расхода охлаждающей жидкости  $\kappa = f(t_{окр}; \mu)$ .

На рис. 4 приведены расходные характеристики двухкаскадной гибридной схемы кондиционирования. Эти характеристики являются предельными. Характеристики работы располагаются правее и ниже предельных.

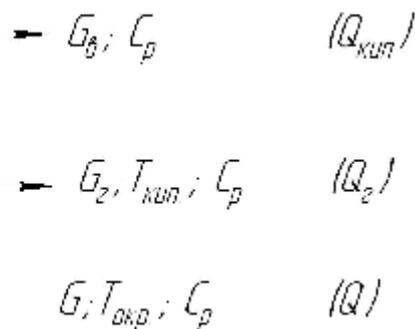
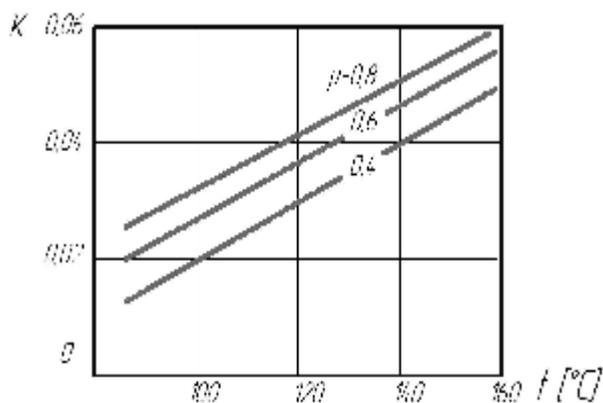
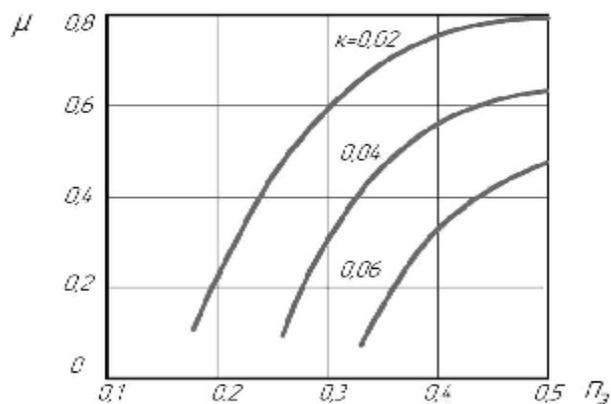


Рис. 2. Схема теплового баланса



**Рис. 3.** Зависимость относительного расхода охлаждающей воды  $K$  от температуры окружающей среды для различных режимов относительного расхода холодного воздуха  $\mu$



**Рис. 4.** Зависимость предельной располагаемой доли холодного потока  $\mu$  от коэффициента эжекции  $n_3$  и коэффициента относительного расхода охлаждающей воды  $K$

Экспериментальные исследования подтвердили работоспособность примененной схемы кондиционирования до температуры окружающей среды  $+136^{\circ}\text{C}$ . С коэффициентом весового расхода охлаждающей жидкости не выше предельного. Точную величину коэффициента установить не представилось возможным, т.к. в процессе охлаждения происходил механический унос незначительной части охлаждающей жидкости в виде капель.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение. Самара: Оптима, 1997, 346 с.
2. Савченко Н.В. Проектирование гибридной схемы кондиционирования. // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Архитектура: сб. науч. тр. Самара, 2002.
3. Савченко Н.В. Локальное обеспечение оптимальных температурных условий. // Экология и здоровье человека: Материалы VI Междун. конгр. Самара, 1999.

### HYBRID TWO-STAGE SCHEME OF COOLING THE COMPRESSED AIR FOR THE ENERGY-CONSUME INDIVIDUAL PROTECTION AGENTS

© 2009 N.V. Savchenko

Samara State Aerospace University

The paper is devoted to calculation and analysis of the maximum characteristics of the hybrid two-stage scheme of cooling the compressed air, intended for the energy-consume individual protection agents. The given results make it possible to construct the energy-consume individual protection agents for the work under the conditions of the production microclimate with the temperature to  $130^{\circ}\text{C}$ .

The keywords: individual protection agents, the conditioned clothes, production microclimate with elevated temperature, the two-stage scheme of cooling the compressed air, vortex effect.