

УДК 629.7.048(045).697

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ СИСТЕМ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ

Бирюк В.В., Леонович Г.И., Алексеенко В.П.

Самарский государственный аэрокосмический университет,

Ускорение научно-технического прогресса тесно связано с дальнейшим совершенствованием систем кондиционирования и термостатирования. На сегодняшний день остро стоит вопрос о распространении и применении вихревых холодильно-нагревательных устройств.

Наиболее важными показателями вихревых систем термостатирования являются надежность и ресурс, по которым они значительно превосходят другие типы систем.

При полете самолетов на сверхзвуковых скоростях значительно возрастает температура внутри их отсеков, поднимающаяся как за счет аэродинамического нагрева, так и тепла выделяемого аппаратурой, двигателем, гидросистемой и экипажем. Доля аэродинамического нагрева и тепловыделения в отсеках зависит от скорости, высоты полета, конструкции и типа летательного аппарата. Особенно большой нагрев внутри отсеков происходит при полете в нижних более плотных слоях атмосферы где аэродинамический нагрев достигает значительной величины уже при скоростях полета $M = 2,0$.

Максимально допустимая температура в отсеках зависит от предельных рабочих температур оборудования и аппаратуры. Повышение температуры в отсеках нарушает также работу гидросистем управления и топливной системы и требует для обеспечения их нормальной работы усложнения конструкций или даже замену этих систем другими типами.

Любая система охлаждения на летательном аппарате должна удовлетворять основным требованиям: обеспечивать нужный отвод тепла при небольшой массе и затрате мощности на работу самой системы, быть безопасной и надежной.

Так как разработка и экспериментальные исследования вихревых авиационных систем термостатирования на сегодняшний день связаны с большими финансовыми затруднениями, в качестве альтернативного

подхода предложено программное обеспечение Rank1 для разработки и исследований систем и математическая модель облика геометрии вихревой трубы.

За основу математической модели взята, предложенная профессором Меркуловым А.П., гипотеза взаимодействия вихрей [1,2], методика расчета геометрии вихревой трубы на расчетных режимах работы с учетом поправок на влажность воздуха и уровень давлений. Программа расчета приведена к удобному для пользователя виду, многофункциональна, позволяет сократить время при проектировании и доводке систем.

Цель математического моделирования – формирование облика вихревой системы термостатирования в расчетных условиях применения (полет летательного аппарата) на расчетных режимах работы.

Цель программного обеспечения для любой вихревой системы термостатирования является:

- обоснование возможности реализации предъявляемых к вихревым системам термостатирования требований;
- получение массовых и геометрических характеристик;
- определение выходных характеристик.

РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ

Исходными данными для расчета воздушной системы термостатирования являются: потребные температура T_x холодного потока, холодопроизводительность Q_x и давление p_x холодного потока.

Давление p_l , температура T_l и относительная влажность φ_l набегающего потока задаются. По условиям отвода тепла от охлаждаемого объекта задается допустимая величина изобарного подогрева ΔT_k холодного потока при теплообмене с охлаждаемым объектом.

По этим величинам и известной величине изобарной теплоемкости C_p газа определяется потребный массовый расход холодного потока:

$$G_x = \frac{W}{C_p \cdot \Delta T_k}, \quad (1)$$

где W – мощность тепловыделения, ΔT_k – допустимая величина изобарного подогрева.

Определяется располагаемая степень расширения газа:

$$\pi = \frac{P_l}{P_x} \quad (2)$$

и относительная температура холодного потока:

$$\Theta_x = \frac{T_x}{T_l} \quad (3)$$

Затем в первом приближении определяются размеры вихревой трубы, для чего по полученным значениям Θ_x и π из обобщенных характеристик [1,2] определяется потребное значение μ - большее для данного значения π , и подсчитывается потребный общий расход сжатого газа:

$$G = \frac{G_x}{\mu} \quad (4)$$

По общему расходу и параметрам входа определяется площадь проходного сечения сопла. Если располагаемая степень расширения $\pi > 4$ в сопловом сечении имеет место критическое истечение и площадь сопла подсчитывается по выражению:

$$F_{кр} = \frac{G \sqrt{R \cdot T_l}}{\alpha \cdot P_l} \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \quad (5)$$

Здесь α - коэффициент расхода сопла, согласно исследованиям [1,2] составляет величину 0,95 - 0,96.

При использовании в качестве рабочего тела воздуха ($k=1,4$, $R=287$ Дж/кг-К) подстановке p_l в 10^5 Па, выражение (5) приводится к виду:

$$F_{кр} = \frac{G \sqrt{T_l}}{0,38 P_l} \cdot 100, \text{ мм}^2 \quad (6)$$

При располагаемой степени расширения $\pi < 4$, скорость истечения из сопла докритическая, определяется по выражению:

$$v_l^2 = \frac{k \cdot R \cdot T_l}{k-1} \left[1 - \left(\frac{l}{\pi^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (7)$$

в котором вместо величины π^* подставляется величина π . Такая замена обоснована тем, что оптимальный режим работы вихревой трубы соответствует нулевой осевой скорости холодного потока на оси вихря соплового сечения, т. е. режиму, когда давления на оси вихря равно давлению холодного потока. Таким образом, подсчитываем скорость истечения по выражению:

$$v_I^2 = \frac{k \cdot R \cdot T_I}{k-1} \left[1 - \left(\frac{I}{\pi} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], \quad (8)$$

затем критическую $a_{кр}^2 = kR T_I$ и безразмерную $\lambda = \frac{v_I}{a_{кр}}$ скорости. Определение площади проходного сечения сопла при докритическом истечении удобно проводить по газодинамической функции - приведенному расходу $q(\lambda)$:

$$q(\lambda) = \lambda \cdot \left[\frac{k+1}{2} \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda \right) \right]^{\frac{1}{k-1}}. \quad (9)$$

По значению этой функции легко определяется площадь проходного сечения сопла при докритическом истечении:

$$F_c = \frac{F_{кр}}{q(\lambda)}. \quad (10)$$

Здесь $F_{кр}$ подсчитывается по выражению (6).

При использовании прямоугольных тангенциальных входных сопел рекомендуется принимать их осевую ширину b вдвое большей их высоты h [1,2] по выражениям:

$$h = \sqrt{\frac{F_c}{2 \cdot i}} \quad \text{и} \quad b = \frac{F_c}{i \cdot h} \quad (11)$$

Для определения диаметра D вихревой трубы необходимо задаться значением относительной площади сопла $F_{кр}$. Она не играет определяющей роли, но может быть оптимизирована из соображений, вытекающих из полученных ранее аналитических зависимостей.

Для авиационных систем термостатирования при умеренных степенях расширения и давления холодного потока близкого к атмосферному оптимальным значением относительной площади сопла следует считать $F_c = 0,2$. Увеличение F_c несколько увеличивает эффект охлаждения холодного потока на малых μ (снижает эффект подмешивания пограничного слоя), но уменьшает эффект охлаждения при больших μ (повышает осевые скорости и уровень давления в вихревой зоне). С ростом F_c уменьшаются габаритные размеры вихревой трубы.

Можно рекомендовать при умеренных давлениях на входе $2 < p_1 < 6 \cdot 10^5$ Па, степенях расширения $2 < \pi < 6$ массовых долях холодного потока $0,2 < \mu < 0,6$ принимать значения $0,09 < F_c < 0,10$. При высоких давлениях $6 < p_1 < 12 \cdot 10^5$ Па на входе, степенях расширения $\pi > 6$, массовых долях $0,5 < \mu < 1,0$ принимать $0,07 < F_c < 0,09$. При низком давлении $p_1 < 1$ бар на входе (например, высотные условия), умеренных μ и π принимать $0,1 < F_c < 0,2$. Близкие к рекомендуемым значениям дает соотношение [1,2]:

$$F_c = 0,327 \cdot \left(\frac{l}{\pi}\right)^{\frac{1}{k}}. \quad (12)$$

По расчетному значению F_c и принятой величине F_c определяется диаметр вихревой трубы:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot F_c}{3,14 \cdot F_c}} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{F_c}{F_c}} \quad (13)$$

Для более точного расчета необходимо ввести поправки на масштаб вихревой трубы, влажность поступающего сжатого газа и уровень давлений.

В экспериментах нами получена зависимость относительной температуры Θ_x от диаметра D вихревой трубы. Аналогичную зависимость можно использовать в диапазоне $5 < D < 50$ мм и, принимая за базовые обобщенные характеристики Θ_x , изображенные на Рис. 2.1 и построенные для вихревой трубы с $D = 24$ мм, представить ее в виде [1,3]:

$$\Delta = 0,005 \cdot (D_{\text{мм}} - 24) \quad (14)$$

По этой величине находим поправку $\Delta\Theta_x$ по выражению:

$$\Delta\Theta_x = \Delta \cdot \left[1 - \left(\frac{l}{\pi}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right]. \quad (15)$$

а затем и уточненное значение $\Theta_x' = \Theta_x + \Delta\Theta_x$, по которому из обобщенных характеристик определяем уточненное значение массовой доли μ .

Дальше расчет повторяется в описанном выше порядке. Диаметр отверстия диафрагмы подсчитывается по выражению из [2]:

$$d\delta = (0,350 + 0,313 \mu)D. \quad (16)$$

Длина вихревой зоны L принимается равной 9 диаметрам вихревой трубы:

$$L = 9 \cdot D \quad (17)$$

При таком выборе длины вихревая зона на горячем конце должна быть ограничена спрямляющей крестовиной.

В случае автономной работы вихревой трубы этих величин оказывается достаточно для полного расчета. Если же вихревая труба используется в какой-либо схеме, то часто появляется необходимость определить на выбранном режиме давление горячего потока перед дросселем.

Для определения этой зависимости удобно ввести безразмерную величину - степень недорасширения горячего потока:

$$\pi = \frac{P_r}{P_x}, \quad (18)$$

характеризующую энергетический уровень горячего потока по давлению.

Согласно экспериментам [3] при длине вихревой трубы в 9 калибров и оптимальных для выбранного μ диаметрах отверстия диафрагмы величина π_z является функцией только π и в диапазоне $2 < \pi < 6$ может быть связана с последней простым соотношением:

$$\pi_z = 0,33 \pi + 0,67 \quad (19).$$

Таким образом, при заданных параметрах p_1 и T_1 сжатого газа и давления p_x холодного потока обобщенные характеристики совместно с выражением (9) позволяют определить все требуемые параметры выходящих из вихревой трубы потоков.

ПОПРАВКА НА ВЛАЖНОСТЬ

При использовании вихревой трубы на влажном сжатом газе (воздухе) необходимо вводить поправку на влажность, т.к. она оказывает заметное влияние на получаемый эффект охлаждения. Эксперименты показывают, что в вихревой трубе не происходит заметной механической сепарации смеси газов и это вполне объясняется высокой турбулентностью вихря. Поэтому, если в процессе охлаждения в вихревой трубе температура холодного потока не снизится ниже точки росы

влажного газа, то при инженерных расчетах в большинстве случаев можно не вводить поправки в такие зависящие от состава газа постоянные, как показатель адиабаты, газовую постоянную и теплоемкость, т. к. эти поправки выходят за пределы точности расчета.

Если же температура холодного потока снизится ниже температуры точки росы влажного газа, то введение поправки оказывается обязательным, потому что поправка становится соизмеримой с получаемым эффектом охлаждения.

Ощутимость поправки в случаях конденсации и замерзания влаги объясняется высокими значениями теплоты фазовых превращений воды, что даже при небольшом влагосодержании приводит к заметным температурным эффектам.

Величину этой поправки можно определить, исходя из следующих соображений. Процесс наиболее интенсивного охлаждения центральных слоев вихря происходит в непосредственной близости от диафрагмы - в сопловом сечении, при этом успевают образоваться только очень мелкие частицы воды или льда. Дисперсность обеспечивает им высокое аэродинамическое сопротивление, что при значительной турбулентности ядра и малом пути движения образовавшихся частиц до отверстия диафрагмы предотвращает сепарацию их за счет архимедовых сил из кругового холодного потока.

Таким образом, влагосодержание холодного и горячего потоков оказывается практически одинаковым. Основываясь на этом, нетрудно рассчитать поправку на влажность газа.

С достаточной точностью будем считать водяной пар во влажном воздухе идеальным газом. Используя законы газовых смесей, можно получить зависимость между влагосодержанием d , относительной влажностью φ и давлением p_s насыщенного пара в сжатом газе:

$$d = \frac{R}{R_n} \cdot \frac{\varphi \cdot P_s}{P - \varphi \cdot P_s} \quad (20)$$

Здесь R , R_n - газовые постоянные сжатого газа и водяного пара соответственно. Давление p_s насыщенного пара в этом выражении соответствует полной температуре T_1 , сжатого газа.

В процессе конденсации и замерзания влаги, содержащейся в 1 кг влажного газа, выделяется тепло:

$$q = (d_l - d_x) \cdot (i_l - i_x) , \quad (21)$$

где: i_l, i_x - удельные энтальпии воды при температуре T_l и T_x соответственно; d_x - влагосодержание холодного потока.

После прохождения через температуру точки росы холодный поток всегда будет иметь влагосодержание d_x , соответствующее насыщенному влажному газу ($\varphi_x = 1$).

Используя две последних зависимости можно получить такое выражение для потери эффекта охлаждения холодного потока за счет влажности сжатого газа:

$$\delta = \frac{R \cdot (i_l - i_x)}{R_n \cdot C_p \cdot P_l} (\varphi_l \cdot P_{sl} - P_{sx}) . \quad (22)$$

Для случая работы вихревой трубы на влажном сжатом воздухе с начальной температурой порядка 300 К имеем $R = 287$ Дж/кг·К, $R_n = 462$ Дж/кг·К, $C_p = 1000$ Дж/кг·К.

Т. к. P_{sl} является функцией температуры T_l сжатого газа, то поправка δ заметно увеличивается с возрастанием температуры T_l и относительной влажности φ и уменьшается с ростом давления p_l .

Рассматривая процесс сжатия атмосферного воздуха в компрессоре (обычно имеющего $\varphi = 0,2 - 0,6$) с последующим охлаждением до первоначальной температуры, можно показать из уравнения (21), что при степени повышения давления в компрессоре в π раз относительная влажность также будет увеличиваться в π раз, т. е. за компрессором средних и высоких давлений почти всегда сжатый воздух имеет $\varphi_l = 1$. Использование такого влажного насыщенного сжатого воздуха в вихревой трубе приведет к максимальным потерям δ эффекта охлаждения.

Так как в нашем случае величина δ прямо пропорциональна относительной влажности φ_l , легко определить величину поправки для других ее значений.

Из представленных кривых видно, что влияние влажности особенно ощутимо при малых давлениях сжатого воздуха (малых располагаемых степенях расширения), когда создаваемый в вихревой трубе эффект охлаждения оказывается соизмеримым с его потерями за счет влажности.

Действительные потери эффекта охлаждения за счет влажности всегда меньше рассчитанных нами максимальных, причем, это различие

увеличивается с уменьшением давления сжатого газа p_1 (степени расширения π), т. к. процесс конденсации начинается внутри зоны и часть теплоты конденсации отводится от формирующегося там холодного потока в горячий периферийный поток.

ПОПРАВКА НА УРОВЕНЬ ДАВЛЕНИЙ

В теории вихревого эффекта уровень давлений не играет роли в работе вихревой трубы, но вязкость газа при снижении его плотности оказывает возрастающее влияние на удельные потери при истечении его из сопла и отверстие диафрагмы, трении о стенки и процесс взаимодействия вихрей.

Эксперименты показывают, что снижение общего уровня давлений при сохранении неизменной степени расширения π приводит к некоторому снижению эффекта охлаждения (и температурной эффективности) аналогично снижению коэффициента полезного действия авиационного компрессора с ростом высоты полета и составляет величину порядка 1 % на каждый километр "высоты".

Поправка была проведена до высоты 13 км по стандартной атмосфере, т. е. до давления холодного потока $p_x = 0,17$ бар. Потеря эффекта охлаждения при пониженном давлении рассчитывается:

$$\xi = \frac{\Delta T_x}{\Delta T_{x \text{ рас}}} \quad (23)$$

В процессе работы были разработаны: математическая модель и программное обеспечение Rank1 для разработки и исследований вихревых систем термостатирования рабочих отсеков летательных аппаратов.

Предложенная программа расчета Rank1 учитывает характер процессов, происходящих в ней (обмен работой и теплом между осевыми и периферийными слоями газа и падение полного давления газа из-за гидравлического сопротивления), и позволяет определить оптимальные размеры вихревой трубы и характеристики выходных потоков в неисследованных областях.

Помимо полученных геометрических параметров программа позволяет пользователю получить следующие зависимости: зависимости от относительной горячей и холодной температур от относительного весового расхода холодного потока, а также типичные характеристики вихревой

трубы при заданных размерах, параметрах температуры и давления за-
торможенного потока на входе в системы термостатирования и давления
холодного потока (атмосферы).

Одно из главных преимуществ данной программы – это получение
результатов проектирования вихревых систем термостатирования без
проведения многочисленных экспериментов, а следовательно без до-
полнительного финансирования исследований и разработок. Расчеты
проводятся многократно с заменой исходных данных, пока все парамет-
ры и характеристики не будут удовлетворять заказчика и изготовителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Бирюк В.В. Основы расчета авиационных вихревых систем охлаждения, г. Сама-
ра, 1997 г.
2. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике, г. Самара, 1997 г.
3. Бирюк В.В., Алексеенко В.П., Бронштейн В.М. Исследование работы
вихревых труб для систем термостатирования аэрокосмической техники.

УДК 621.43

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СООТНОШЕНИЯ БЕНЗИН-ВОДОРОД ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ ПОРШНЕВОГО ДВС НА БЕДНЫХ СМЕСЯХ

Бортников Л.Н., Русаков М.М., Афанасьев А.Н., Пелипенко В.Н.

Тольяттинский политехнический институт

Исследования по повышению эколого-экономических характери-
стик поршневых ДВС с искровым зажиганием ведутся в целом ряде на-
правлений. Суть большинства из них сводится к обеспечению устойчи-
вой работы двигателя на бедных топливовоздушных смесях (ТВС). В
частности разрабатываются двигатели, работающие на смесях с коэффи-
циентом избытка воздуха α до 1,5–2,0 [1,2]. При этом стабильность го-
рения достигается расслоением и специальной организацией движения
ТВС, впрыском бензина на такте сжатия и т.д. Вместе с тем известен
способ обеспечения стабильного горения бедных ТВС путем введения
водорода. В этом направлении проведены обширные исследования,
включая разработку способов получения и хранения водорода на борту