

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ СИСТЕМ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ АГРЕГАТОВ И БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

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

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Непрерывное совершенствование авиационной техники неразрывно связано с поиском новых подходов к вопросам создания систем, обеспечивающих качественное и надежное функционирование силовых агрегатов и бортового оборудования, при сокращении общих затрат на их проектирование, производство и эксплуатацию. Известно, что к числу перспективных систем термостабилизации и охлаждения относятся вихревые гидро- и пневматические холодильно-нагревательные устройства [1-4]. Одной из существенных проблем, ограничивающих комплексное решение задач конструирования таких устройств, является преимущественно эмпирический характер математического аппарата, дающего приблизительное описание физики процессов разделения потоков воздуха в закрученных струях в замкнутом регулируемом геометрическом пространстве. С другой стороны, традиционный подход к научным исследованиям, основанный на создании экспериментальных образцов и стендовых исследованиях вихревых систем термостатирования (ВСТ), связан с большими финансовыми затратами, что предопределяет необходимость переноса акцента исследований в область математического эксперимента. Вместе с тем, в настоящее время отсутствуют достаточно эффективные математические модели ВСТ, с помощью которых решаются задачи синтеза и анализа оптимальных конструкций ВСТ, предназначенных для обеспечения функционирования конкретных образцов техники и оборудования с учетом изменяющейся внешней обстановки. Поэтому направление исследований, связанных с математическим моделированием широкого спектра ВСТ для различных объектов, можно считать актуальным и перспективным.

В статье представлен один из вариантов математической модели ВСТ, предназначенной для обеспечения функционирования бортового оборудования, установленного в каabinном отсеке сверхзвукового самолета.

Известно, что наиболее показательными параметрами ВСТ являются простота, надежность и ресурс, по которым они значительно превосходят другие типы систем. При полете самолета на сверхзвуковых скоростях внутри бортовых отсеков значительно возрастает температура за счет аэродинамического нагрева 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 нарушает также работу гидросистем управления и топливной системы и требует для обеспечения их нормальной работы усложнения конструкций или даже замену этих систем другими типами. Поэтому ВСТ должна удовлетворять следующим основным требованиям: обеспечивать нужный отвод тепла при небольшой массе и затрате мощности на работу самой системы, быть безопасной и надежной.

За основу математической модели ВСТ взяты гипотеза взаимодействия вихрей [1,2] и методика расчета геометрии вихревой трубы на расчетных режимах работы с учетом поправок на влажность воздуха и уровень давлений. Цель - формирование облика вихревой системы термостатирования в расчетных условиях применения (полет летательного аппарата) на расчетных режимах работы. Основные требования: практическая реализуемость проектируемых ВСТ; возможность задания и последующей корректировки массовых и геометрических характеристик; вывод выходных характеристик в форме таблиц и графиков.

На рис.1 показана схема алгоритма построения математической модели вихревой трубы, в которой можно выделить следующие этапы: задание исходных данных, расчет геометрических размеров вихревой трубы, введение необходимых поправок.

1. Задание исходных данных

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_1 , температура T_1 и относительная влажность φ_1 набегающего потока задаются и корректируются, исходя из данных о внешней среде.

По условиям отвода тепла от охлаждаемого объекта задается допустимая величина изобарного подогрева ΔT_k холодного потока при теплообмене с охлаждаемым объектом.

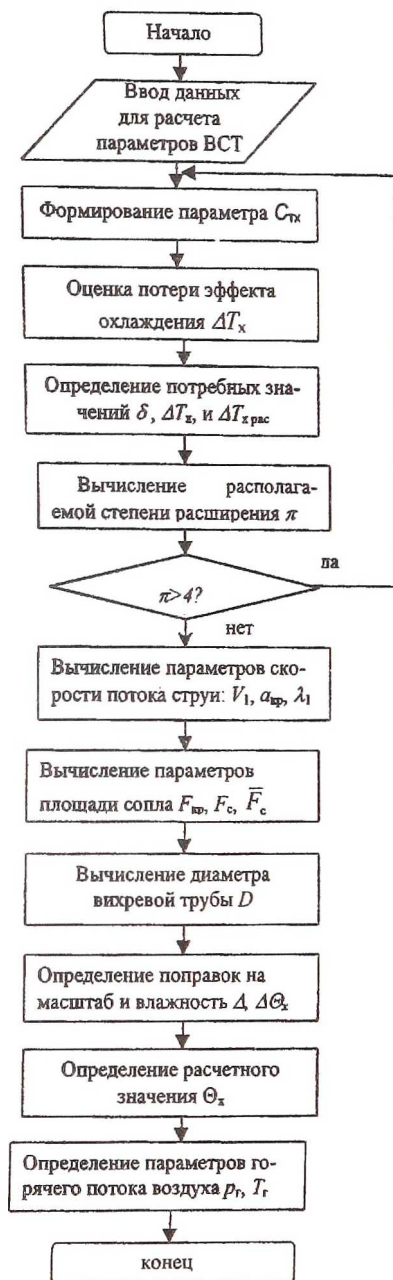


Рис. 1. Схема алгоритма построения математической модели вихревой трубы

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.

2. Расчет геометрических размеров

На этом этапе вначале определяются располагаемая степень расширения газа $\pi = p_1 / p_x$ и относительная температура холодного потока $\Theta_x = T_x / T_1$. Далее в первом приближении вычисляются размеры вихревой трубы, для чего по полученным значениям Θ_x и π из обобщенных характеристик [1, 2] определяется потребное значение доли μ холодного потока (наибольшее для данного значения π) и подсчитывается потребный общий расход сжатого газа $G = G_x / \mu$.

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

$$F_{кр} = \frac{G \sqrt{R \cdot T_1}}{\alpha \cdot p_1} \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}, \quad (2)$$

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

При использовании в качестве рабочего тела воздуха ($k=1,4$; $R=287$ дж/кг·К) и подстановке $p_1=10^5$ Па, выражение (2) приводится к виду:

$$F_{кр} = \frac{G \sqrt{T_1}}{0,38 p_1} \cdot 100 \quad [\text{мм}^2]. \quad (3)$$

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

$$v_1^2 = \frac{k \cdot R \cdot T_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{1}{\pi^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], \quad (4)$$

где $\pi^* = \frac{p_1^*}{p_{oc}}$ - полная степень расширения газа в вихре; p_1^* - полное

давление на входе ВСТ; p_{oc} - статическое давление на оси в сопловом сечении.

Замена в (4) π на π^* обусловлена тем, что оптимальный режим работы вихревой трубы соответствует нулевой осевой скорости холодного потока на оси вихря в сопловом сечении. При этой скорости давление на оси вихря равно давлению холодного потока. Далее определяются критическая $a_{кр} = \sqrt{kRT_1}$ и безразмерная $\lambda = v_1/a_{кр}$

скорости.

Вычисление относительной площади проходного сечения сопла F_c при докритическом истечении принято проводить по газодинамической функции - приведенному расходу $q(\lambda)$:

$$q(\lambda) = \lambda \cdot \left[\frac{k+1}{2} \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2 \right) \right]^{\frac{1}{k-1}}. \quad (5)$$

Отсюда:

$$F_c = \frac{F_{кр}}{q(\lambda)}. \quad (6)$$

Для определения диаметра трубы необходимо задаться значением относительной площадью сопла $\bar{F}_c = 0,327 \cdot \pi^{-1/k}$. Для авиационных систем термостатирования при умеренных степенях расширения и давлении холодного потока, близком к атмосферному, оптимальным значением относительной площади сопла следует считать $\bar{F}_c = 0,2$.

Увеличение \bar{F}_c несколько усиливает эффект охлаждения холодного потока при малых μ (снижает эффект подмешивания пограничного слоя), но снижает эффект охлаждения при больших μ (повышает осевые

скорости и уровень давления в вихревой зоне). Кроме того, с ростом \overline{F}_c уменьшаются габаритные размеры вихревой трубы.

По расчетному значению F_c и принятой величине \overline{F}_c определяется диаметр вихревой трубы:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot F_c}{3,14 \cdot \overline{F}_c}} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{F_c}{\overline{F}_c}}.$$

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

При проведении экспериментов была получена зависимость относительной температуры Θ_x от диаметра D вихревой трубы, которую можно использовать в диапазоне $5 < D < 50$ мм. Принимая обобщенные характеристики $\Theta_x(D)$, построенные для вихревой трубы с $D = 24$ мм, в качестве базовых, поправку можно представить ее в виде [1, 3]:

$$\Delta = 0,005 \cdot (D - 24). \quad (7)$$

По этой величине находится поправка $\Delta \Theta_x$:

$$\Delta \Theta_x = \Delta \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{\pi} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]. \quad (8)$$

Из уточненного значения температуры холодного потока $\Theta_x' = \Theta_x + \Delta \Theta_x$ определяется уточненное значение массовой доли μ [1, 2].

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

$$d_n = (0,350 + 0,313 \mu) D.$$

Длина вихревой зоны L обычно принимается равной девяти диаметрам D вихревой трубы. Тогда вихревая зона на горячем конце должна быть ограничена спрямляющей крестовиной [1].

Количество полученных данных достаточно для полного расчета в случае автономной работы вихревой трубы. Если вихревая труба используется в какой-либо схеме, то часто появляется необходимость в определении давления горячего потока перед дросселем на выбранном режиме. Для этого вводится безразмерная величина - степень недорасширения горячего потока $\pi_\Gamma = p_\Gamma / p_x$, характеризующая энергетический уровень горячего потока по давлению.

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

$$\pi_r = 0,33\pi + 0,67 .$$

Таким образом, при заданных параметрах p_1 и T_1 сжатого газа и давления p_x холодного потока, обобщенные характеристики с учетом выражения (5) позволяют определить все требуемые параметры выходящих из вихревой трубы потоков.

3. Поправка на влажность.

При использовании вихревой трубы на влажном сжатом газе (воздухе) необходимо вводить поправку на влажность, так как она оказывает заметное влияние на получаемый эффект охлаждения. Результаты экспериментов 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 будет выше точки росы влажного газа, то при расчетах можно пренебречь поправками, учитывающими показатели адиабаты, газовую постоянную и теплоемкость.

Если температура холодного потока ниже температуры точки росы влажного газа, то поправки соизмеримы с получаемым эффектом охлаждения и становятся обязательными. 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.

Величина поправки определяется, 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. Уровень дисперсности обеспечивает высокое аэродинамическое сопротивление, что при значительной турбулентности ядра и малом пути движения образовавшихся до отверстия диафрагмы частиц предотвращает их сепарацию из-за влияния архимедовых сил 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:

$$d = \frac{R}{R_n} \cdot \frac{\varphi \cdot p_s}{P - \varphi \cdot p_s}, \quad (9)$$

где 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:

$$q = (d_1 - d_x) \cdot (i_1 - i_x), \quad (10)$$

где i_1 , i_x - удельные энтальпии воды при температуре T_1 и T_x соответственно; d_x - влагосодержание холодного потока.

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

Из (9) и (10) получается следующее выражение для показателя потери эффекта охлаждения холодного потока за счет влажности сжатого газа:

$$\delta = \frac{R \cdot (i_1 - i_x)}{R_n \cdot C_p \cdot p_1} \left(\varphi_1 \cdot p_{s1} - p_{sx} \right). \quad (11)$$

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

Так как значение p_{s1} является функцией температуры T_1 сжатого газа, то поправка δ заметно увеличивается с возрастанием температуры T_1 и относительной влажности φ и уменьшается с ростом давления p_1 .

Из результатов анализа процесса сжатия атмосферного воздуха в компрессоре (обычно имеющего $\varphi = 0,2 - 0,6$) с последующим охлаждением до первоначальной температуры видно, что при степени повышения давления в компрессоре в π раз относительная влажность также будет увеличиваться в π раз. Таким образом, за компрессором средних и высоких давлений сжатый воздух имеет $\varphi_1 = 1$. Повышение влажности насыщенного сжатого воздуха в вихревой трубе ведет к

максимальным потерям эффекта охлаждения. Так как величина δ прямо пропорциональна относительной влажности φ_1 , легко определить величину поправки для других ее значений.

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 расчетных максимальных, причем, это различие увеличивается с уменьшением давления сжатого газа p_1 (степени расширения π), так как процесс конденсации начинается внутри зоны и часть теплоты конденсации отводится от формирующегося там холодного потока в горячий периферийный поток.

4. Поправка на уровень давлений.

Согласно теории вихревого эффекта работа вихревой трубы не зависит от уровня давлений, однако вязкость газа при снижении его плотности оказывает возрастающее влияние на удельные потери при истечении из сопла и через отверстие диафрагмы, при трении о стенки трубы и в процессе взаимодействия вихрей.

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

Моделирование поправки проводилось до высоты 13 км при стандартной атмосфере, т. е. до давления холодного потока $p_x = 0,17$ бар. Потеря эффекта охлаждения при пониженном давлении рассчитана по формуле [1]:

$$\xi = \frac{\Delta T_x}{\Delta T_{x \text{ рас}}}$$

где ΔT_x и $\Delta T_{x \text{ рас}}$ — потребный полученный (апостериорный) и потребный расчетный (априорный) эффекты охлаждения.

5. Описание программного обеспечения.

Разработанная математическая модель и программное обеспечение Rank1 учитывают характер процессов, происходящих в ВСТ (обмен

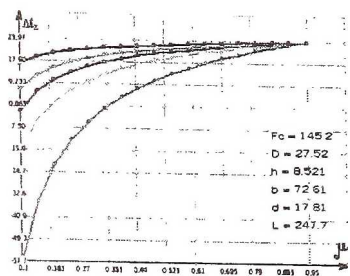
работой и теплом между осевыми и периферийными слоями газа и падение полного давления газа из-за гидравлического сопротивления), и позволяет определять оптимальные размеры вихревой трубы и характеристики выходных потоков в еще неисследованных областях.

На концептуальном уровне модель функционирования ВСТ представляет собой диалоговое взаимодействие с пользователем. Программное обеспечение ориентировано на использование персональных компьютеров типа IBM PC. В качестве платформы выбрана операционная система (ОС) *Microsoft® Windows 95*. В качестве системы программирования определена *Microsoft Visual C++ 5.0*, предоставляющая разработчику удобную среду для разработки, компилятор, отладчик. Стандартная библиотека компонент и поддержка технологии визуального программирования позволяет существенно упростить разработку интерфейса программного продукта, соответствующего стандартам *Windows*. Кроме того, *Visual C++* предоставляет разработчику широкий выбор классов и компонент, упрощающих работу с файлами, базами данных, динамическими структурами. Отладчик среды обеспечивает обнаружение многих ошибок, возникающих во время программирования, что повышает надежность разрабатываемой программы.

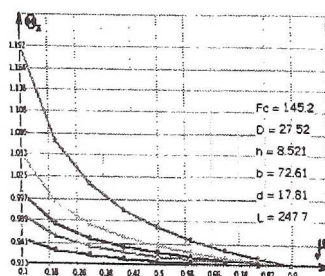
Вся работа происходит в окнах. Окна могут работать в полноэкранный и оконный режимах. Работа с результатами расчетов ведется с помощью пункта главного меню. Здесь выполняются такие важные функции, как сохранение рассчитанных данных на внешнем носителе, чтение ранее сохраненных данных для просмотра и редактирования, печать данных и результатов обработки на принтере.

Программа содержит справочную информацию, которая предназначена для ориентации пользователя и получения им необходимых сведений по ВСТ.

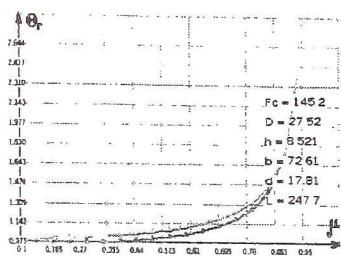
Помимо расчета геометрических параметров программа позволяет пользователю получить графики зависимости относительной горячей и холодной температур от относительного весового расхода холодного потока, а также типовые характеристики вихревой трубы при известном давлении холодного потока, заданных параметрах температуры и давления заторможенного потока на входе ВСТ. Примеры зависимостей показаны на рис. 2.



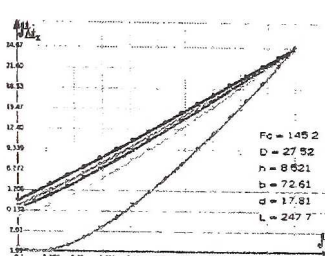
а



б



в



г

Рис.2. Типовые графики зависимостей параметров ВСТ от доли холодного потока μ .

а) рассчитанный эффект охлаждения; б) относительная температура холодного потока; в) относительная температура горячего потока; г) относительная холодопроизводительность

В таблицах 1 и 2 приведены данные по расчету типовой вихревой трубы с помощью разработанной программы.

Таблица 1. Исходные данные

Полная температура газа на входе в вихревую трубу	300
Давление питающего воздуха, бар	0,9
Давление холодного потока, бар	0.3
Холодопроизводительность	200
Допустимый подогрев, К	10
Относительная влажность	0,5
Температура холодного потока, К	275
Показатель адиабаты	1,4

Таблица 2. Результаты расчета

Потребный эффект охлаждения с учетом влажности	32,5
Расчетная относительная температура холодного воздуха	0,88
Относительный параметр	5
Расчетная площадь сопла, мм	145,2
Относительная площадь сопла, мм	0,245
Диаметр вихревой трубы, мм	27,525
Высота сопла вихревой трубы, мм	8,52
Ширина сопла вихревой трубы, мм	72,619
Диаметр отверстия диафрагмы, мм	17,819
Длина вихревой трубы, мм	247,73
Давление горячего потока, мм	0,349
Температура горячего потока, мм	366,1

Одним из главных достоинств разработанного программного обеспечения является получение достоверных результатов, удовлетворяющих проектировщиков без проведения многочисленных промежуточных экспериментов, что существенно облегчает задачу и сокращает время проектирования и доводки ВСТ.

Список литературы

1. Бирюк В.В. Основы расчета авиационных вихревых систем охлаждения. Самара: СГАУ 1997.- 255 с.
2. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. Изд. 2-е переработанное. – Самара, Оптима, 1997.- 297 с.
3. Бирюк В.В., Алексеенко В.П., Бронштейн В.М. Исследование работы вихревых труб для систем термостатирования аэрокосмической техники // Ракетно-космическая техника: Сб. науч. тр. / СГАУ.- Самара, 1998, №1. - С. 44-53.
4. Алексеенко В.П., Бирюк В.В., Бронштейн В.М., Лукачев С.В., Петренко С.А., Толстоногов А.П. Использование вихревого эффекта энергетического разделения потоков в аэрокосмической технике и технологии // Вестник Российской академии космонавтики: Научно.-техн. сб./ Самара, 1999. – С. 23-27.