

ВИХРЕВЫЕ ЭФФЕКТЫ В ВИХРЕВЫХ ТРУБАХ РАНКА—ХИЛША

Кочетков Ю.М.^{1*}, Боровик И.Н.^{2**}, Подымова О.А.^{1***},
Мавров В.А.^{1****}, Ишаев Р.О.^{1*****}

¹ Исследовательский центр им. М.В. Келдыша,
Онежская ул., 8, Москва, 125438, Россия

² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

* e-mail: swgeorgy@gmail.ru

** e-mail: borra2000@mail.ru

*** e-mail: toolgapodymova@yandex.ru

**** e-mail: boxes132@yandex.ru

***** e-mail: rin9244@yandex.ru

Представлены результаты исследований газодинамических процессов в вихревых трубах Ранка—Хилша. Экспериментальным путем определены численные значения, которые позволяют найти оптимальные характеристики труб Ранка—Хилша. Получено несколько фундаментальных эффектов. Предложены новые дифференциальные уравнения для расчетов параметров в этих трубах. Показано направление, в котором стоит продолжить расчетно-экспериментальные исследования в части поиска оптимальных конструктивных решений при проектировании устройств, использующих эффект Ранка—Хилша.

Ключевые слова: SolidWorks, пневмогидравлическая схема, эффект стратификации, труба Ранка—Хилша, энтальпийный дефект.

Введение

Течение в трубе Ранка—Хилша до сих пор является предметом исследования многих ученых и инженеров [1—4]. Простая в исполнении и незамысловатая по конфигурации конструкция трубы таит в себе множество великолепных возможностей ее применения практически во всех отраслях промышленности. Основное её свойство — это генерация стратифицированных течений с разделением первоначального, исходного с нормальной температурой на очень холодное и достаточно горячее. В трубе происходит тепловая стратификация. Основная причина, вызывающая такое расслоение, — центробежная подача основного потока через тангенциальные каналы в устройство импеллерного типа с последующим вихревым движением в противоположные стороны по левую и правую границу трубы в атмосферу. Первоначальная закрутка создает условия появления устойчивого вихря в зоне подачи, который в дальнейшем разделяется на периферийный и центральный.

При этом периферийная часть вихря согласно геометрии отсекается коаксиальным телом, а цен-

тральная собирается в трубе меньшего размера и выводится наружу. Обычно при проектировании таких конструкций внешний диаметр коаксиального контура делают соизмеримым с диаметром вихря, а внутренний — соизмеримым с диаметром трубки для этого центрального потока, сформированного вихрем. За счет центробежных сил в вихре понижается давление, которое пропорционально, прежде всего, центробежной силе и зависит от давления на входе в канал. При этом центральная часть вихря начинает уходить из центра, и давление в центре падает. Происходит адиабатическое расширение газа, и температура в центре вихря резко падает. Одновременно температура на периферии растет в соответствии с ростом давления: $T = p/(\rho R)$.

Понятно, что в вихре одновременно возникает вторичный конвективный эффект. Охлажденные частицы имеют большую плотность, чем горячие, и по законам гидродинамики менее плотные должны всплывать, т. е. двигаться совершенно в противоположную сторону, чем под действием центробежных сил.

Но этот эффект при больших скоростях весьма слаб по сравнению с основным центробежным и может не учитываться в практических расчетах. Тем не менее учет этого эффекта, безусловно, необходим при подробных теоретических обоснованиях.

После разделения вихря на условно левую и правую части, потоки движутся по каналам, совершая винтовое движение, поскольку за счет закрутки им было передано угловое перемещение, а за счет перепада давления на входе в установку, потоки получили осевое направление. Естественно, производство холода и тепла будет существенно зависеть от конструкции трубы, так как она (конструкция) определяет соотношение массовых расходов в одну и другую сторону. Более того, на тепловую стратификацию будут существенно влиять форма каналов и собственно профиль температуры на входе. Поэтому основной задачей инженеров и исследователей процессов, происходящих в трубах Ранка—Хилша, является оптимизация конструкции в части получения как максимальной стратификации, так и максимальной производительности холода либо тепла (в зависимости от целей использования данного устройства). Различными авторами было разработано множество в основном инженерных методов расчета процессов, происходящих в трубах Ранка—Хилша, получено много экспериментальных результатов на различных рабочих телах и различных конструкциях, показана возможность получения эффекта не только на газообразных, но и на жидких рабочих телах.

Но! Как отметил Анатолий Вильич Хаит в своей содержательной кандидатской диссертации [4], «... несмотря на все усилия, на текущий момент времени общепризнанная физико-математическая модель феномена энергоразделения отсутствует». Поэтому целью своей работы авторы обозначают желание создать на базе предварительных приближенных расчетных исследований процессов с использованием известных электронных продуктов на различных вариантах труб, экспериментальных параметрических исследований основных эффектов и учета опыта, полученного предшественниками, некоторую обобщенную теорию течений газа и жидкостей, объясняющую описанный выше эффект тепловой стратификации.

Применение вихревых труб Ранка—Хилша в авиационной и космической технике

В настоящее время вихревые трубы Ранка—Хилша нашли широкое применение в системах и агрегатах аэрокосмической техники. Помимо традиционного использования их в системах термоста-

тирования [6,7], вихревые трубы нашли применение в двигателях летательных аппаратов.

В воздушно реактивных двигателях эффект Ранка—Хилша применяется при организации рабочего процесса в камерах сгорания. При этом реализуется смесеобразование горючего и окислителя, благоприятное с точки зрения уменьшения выбросов NO_x , обеспечения теплового режима и высокой полноты сгорания топлива [8].

В ракетных двигателях применение вихревого эффекта позволило создать камеры сгорания, работающие на газообразных горючем и окислителе [9, 10]. Эффект температурного разделения закрученного потока, возникающий при тангенциальном подводе одного из компонентов, сыграл роль завесы и существенно снизил тепловой поток в стенку камеры сгорания и смесительной головки. При этом повышенная степень турбулентности обеспечила высокую полноту сгорания за счет хорошего перемешивания горючего и окислителя.

Одной из важных проблем, ограничивающих эффективное применение вихревых труб, является то, что существующие расчетные методики основаны на фиксированных значениях геометрических параметров вихревой трубы, что значительно ограничивает диапазон режимов ее работы, при которых достигается необходимый уровень теплового разделения.

Поэтому создание вихревых труб с регулируемыми геометрическими параметрами и разработка методик расчета их характеристик являются актуальными задачами.

Параметрические расчетные исследования газодинамических течений в трубах Ранка—Хилша. Конструкция и расчетный метод исследования

На рис. 1 представлена 3D-модель-сборка, смоделированная в программе SolidWorks, в строгом соответствии с конструкторской документацией. На этой конструкции в дальнейшем будет проведена серия экспериментов. Кроме этого, были проведены численные эксперименты на другом варианте конструкции, с иной геометрией входа и горячего выхода.

Конструкция состоит из входного штуцера 1 соединенного с корпусом 2, соплового блока 3 с четырьмя соплами для закрутки потока, сопла 4 холодного и сопла 5 горячего потока, а также развихрителя горячего потока 6 с дросселем 7. Дроссель позволяет менять площадь выходного сечения за счет изменения длины $L_{\text{вых}}$.

Модель была исследована на предмет анализа траекторий движения воздуха в трубе и выявления

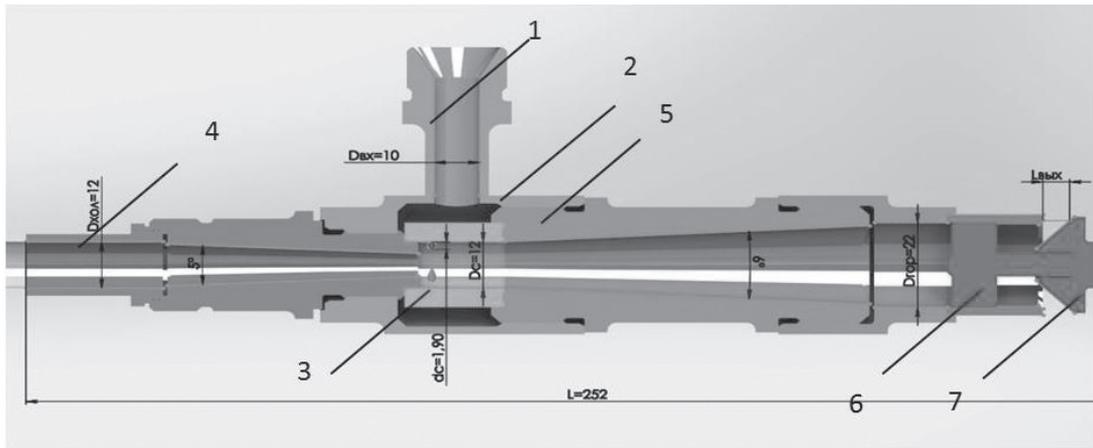


Рис. 1. Основные элементы конструкции

эффектов, происходящих в первую очередь в ядре потока.

Применен метод вычислительной газодинамики. Осуществляется решение уравнений Рейнольдса (RANS), с использованием двухпараметрической модели турбулентности $k-\epsilon$, на основе модуля FloEFD, интегрированного в SolidWorks (FlowSimulation). Выбор FlowSimulation обоснован особенностями программного продукта: хорошее моделирование ядра потока, понятный графический интерфейс, автоматический генератор прямоугольной декартовой вычислительной сети. Для соответствия математической модели условиям физического эксперимента решается внутренняя задача, рабочее тело — сжатый воздух с начальной температурой $T_{вх} = 293$ К, с давлением на входе $p_{вх} = 500000$ Па, на выходе $p_{вых} = 101325$ Па, стенка считается адиабатической и гидродинамически гладкой. Перед расчетом выполняется дискретизация области течения прямоугольной сеткой, на гранях которой рассчитываются потоки энергии массы и импульса.

Результаты расчетов экспериментального варианта конструкции

Предварительные приближенные исследования процессов в трубе Ранка—Хилша как технической системы и их анализ позволили выявить эффекты и визуализировать их с помощью графических возможностей FlowSimulation.

Эффект тепловой стратификации. Течение в трубе Ранка—Хилша, разделяющееся на холодное и горячее, показано на рис. 2. Здесь можно наблюдать разделение вихревого потока на горячее течение в направлении правого выхода и холодное в направлении левого выхода. Такая картина течения наблюдается до величины выдвижения дросселя $L_{вых} = 0,8$ мм, после чего наступает эффект инжек-

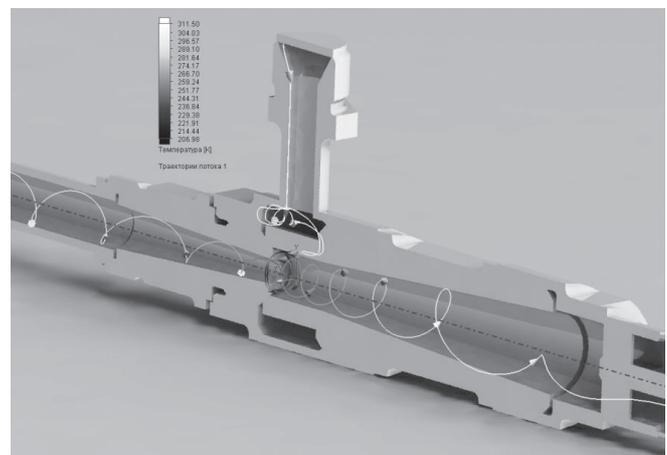


Рис. 2. Эффект тепловой стратификации

ции. При этом минимальная температура на холодного выхода $T_{хол} = 266$ К соответствует отношению массового расхода холодного потока G_x к массовому расходу $G_{вх}$ на входе в вихревую трубу:

$$\mu = \frac{G_x}{G_{вх}} = 0,3, \text{ а максимальная температура горяче-$$

$$\text{го выхода } T_{гор} = 311\text{К соответствует } \mu = \frac{G_x}{G_{вх}} = 1.$$

Максимальная холодопроизводительность $q_x = C_p \mu \Delta T_x = 16917,6$ Дж/кг и теплопроизводительность $q_r = C_p (1-\mu) \Delta T_r = 3987$ Дж/кг соответствует $\mu = 0,56$.

Эффект вихревой инверсии. Результат проведенного численного эксперимента №2, в котором на входе задано давление $p_{вх} = 500000$ Па, выход горячего потока перекрыт, а открыт только выход холодного воздуха с давлением $p_{вых} = 101325$ Па,

показал расчетную линию тока движения воздуха (рис. 3).

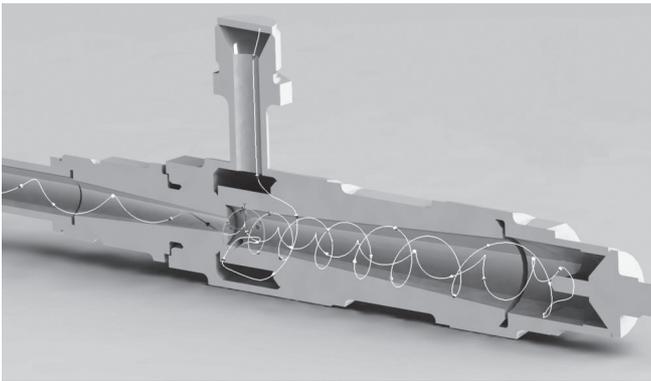


Рис. 3. Эффект вихревой инверсии

На этом рисунке со стороны горячего выхода можно наблюдать наличие двух движущихся в противоположных направлениях винтовых течений, сформированных в результате отражения первоначального от торцевой стенки. При этом периферийный поток движется по направлению к горячему выходу, а центральный — к холодному. Внутреннее движение относительно внешнего направлено в противоположную сторону и обеспечивает устойчивость турбулентной конфигурации. В этой комбинации винтовых течений касательные скорости каждого из них одинаковые на линии соприкосновения, а осевые скорости направлены в противоположные стороны. Другими словами, если проводить аналогию с буровчиком, то внешнее течение соответствует вкручиванию, а внутреннее — выкручиванию.

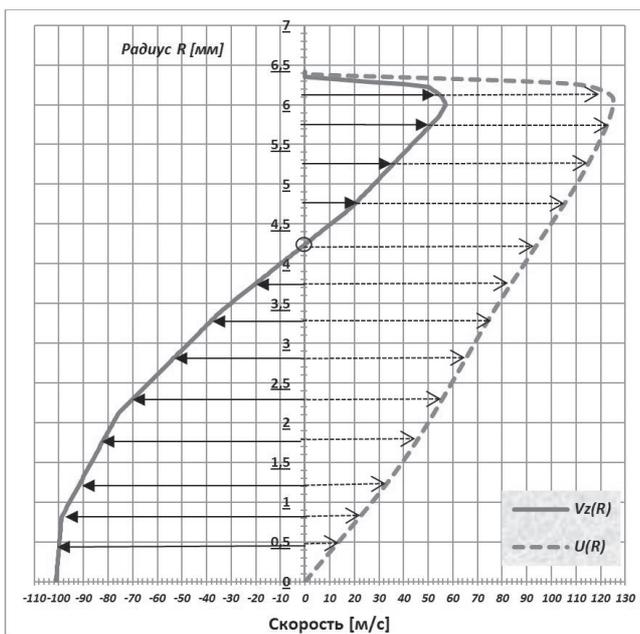


Рис. 4. Осевая скорость в горячей части трубы

Зависимость осевой скорости V_z и окружной U от радиуса R горячего выхода показана на графике (рис. 4).

Таким образом, с увеличением радиуса осевая скорость падает до нулевого значения, затем начинает возрастать со знаком минус, т.е. вектор скорости меняет направление на противоположное.

Эффект инжекции. В случае открытого дросселя для горячего потока, получен эффект подсоса воздуха из атмосферы со стороны холодного выхода, т. е. поток газа после соплового блока, получая закрутку, направляется к дросселю совместно с потоком с холодной стороны (рис. 5). Таким образом, труба Ранка—Хилша работает в качестве инжектора насоса. Этот эффект наступает в результате вытеснения $L_{\text{вых}}$ более чем на 0,8 мм.

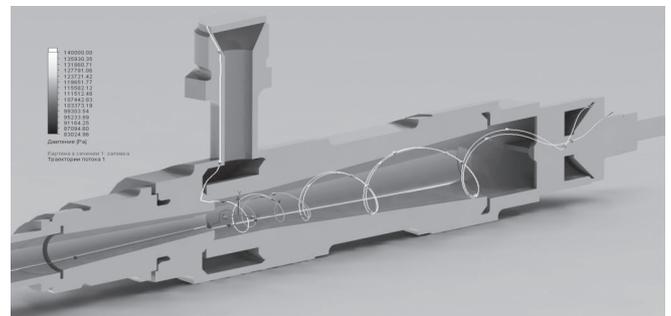


Рис. 5. Эффект инжекции

Результаты расчетов трубы Ранка—Хилша после внесения дополнительных изменений

Выполненные расчеты другого варианта трубы Ранка—Хилша, имеющего прямоугольные сопла и центральное тело с холодом выходом в виде коаксиального цилиндра, позволили установить еще несколько эффектов.

Конструкция второго варианта отличается от конструкции экспериментального прямоугольным тангенциальным входом и цилиндрическим выходом холодного газа. Кроме того, в нескольких расчетах горячий выход загроможден цилиндрическим стержнем с целью локализации внутреннего вихря. Расчет был проведен при закрытом горячем выходе. При этом был зафиксирован еще один газодинамический эффект. Как видно из рис. 6, периферийный вихрь переходит в центральный приблизительно на двух третях длины горячего сопла, а в области глухого торца образуется застойная зона, которая отходит от основного винтового потока и представляет собой замкнутый пространственный вихрь. Результаты расчета показали, что минимальная температура находится на выходе из холодного канала и она составляет $T_{\text{мин } 2} = -39 \text{ }^\circ\text{C}$.

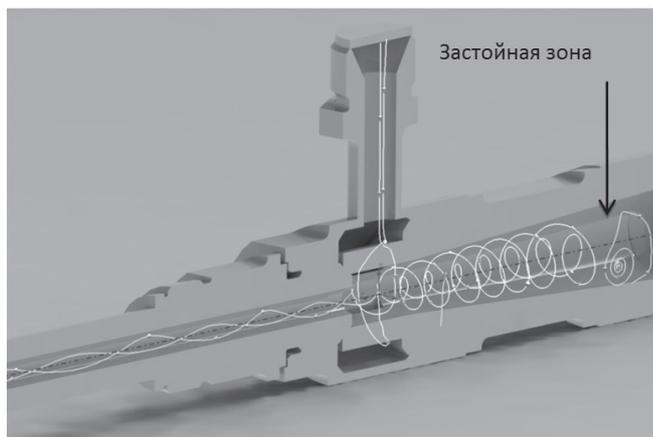


Рис. 6. Застойная зона

Расчет той же самой трубы с центральным цилиндрическим телом показал наличие центрального инверсионного потока, который представляет собой коаксиальный цилиндр, вращающийся в одном направлении с периферийным (рис. 7).

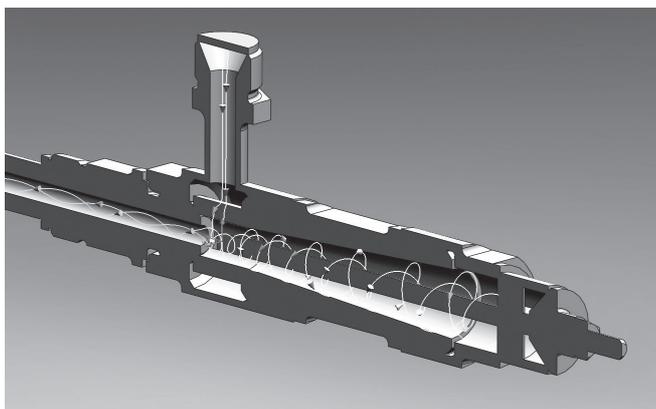


Рис. 7. Течение с центральным телом

Полученные расчетным способом вихревые эффекты позволяют в дальнейшем объяснить экспериментальные результаты.

Экспериментальные исследования

В целях изучения вихревых эффектов в трубах Ранка—Хилша параллельно с расчетными исследованиями была изготовлена экспериментальная установка, пневмогидравлическая схема которой представлена на рис. 8.

Установка функционировала следующим образом. Воздух через редуктор РД1 поступал в линию подачи с избыточным давлением 0,1—1,5 МПа. Точная регулировка подачи обеспечивалась вентилем ВН1. Предохранительный клапан ПСК1 ограничивал давление в контуре подачи исходного воздуха. Расход воздуха на входе контролировался расходомером (счетчиком сжатого воздуха) РМ1, тем-

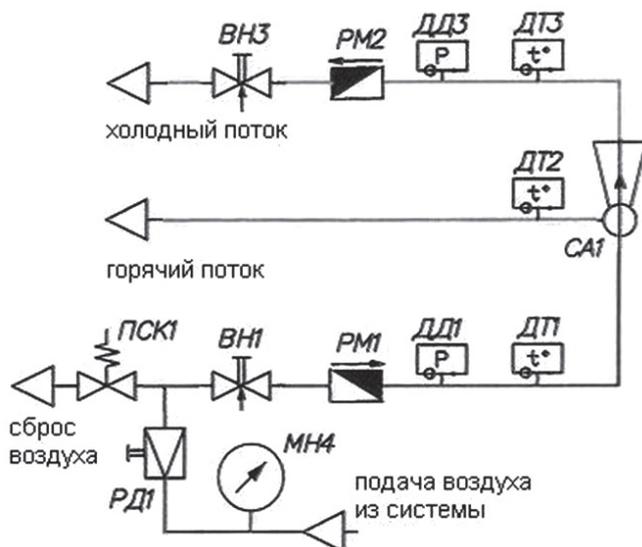


Рис. 8. Пневмогидравлическая схема установки

пература — датчиком (термопарой) ДТ1 с соответствующим приборным сопровождением. Воздух подавался в камеру вихревой трубы СА1 тангенциально через сопловой вход, где разделялся на два разнонаправленных потока. Один, горячий (справа) сбрасывался в атмосферу через регулирующий конус на торце трубы; другой, холодный (слева) через диафрагму выходил в магистраль вентилей ВН3. Расход сбрасываемого холодного воздуха контролировался расходомером (счетчиком сжатого воздуха) РМ2, а расход горячего определялся по разнице показаний РМ1 и РМ2. Соотношение потоков изменялось при движении регулирующего конуса. Уровень давления в выходной магистрали холодного потока регулировался вентилем ВН3. Температура горячего потока регистрировалась датчиком (термопарой) ДТ2, установленным на металлическом корпусе вихревой трубы в зоне регулирующего конуса; температура холодного потока — датчиком (термопарой) ДТ3, размещенным на расстоянии 150 мм от диафрагмы.

Вихревая труба (см. рис. 1) имела следующие основные геометрические размеры: диаметр вихревой камеры $D_c = 12$ мм, ширина камеры $b = 22$ мм, диаметр холодного выхода $D_{хол} = 6$ мм, диаметр горячего выхода $D_{гор} = 20$ мм. Внешняя поверхность с датчиками температуры была теплоизолирована.

Серия экспериментов позволила наблюдать и регистрировать следующие эффекты, предварительно полученные расчетным путем в вихревой трубе.

Первый эффект — **эффект тепловой стратификации**. Был зарегистрирован эффект понижения температуры потока, выходящего через левую сторону, и одновременно — повышения температуры потока, выходящего через регулирующий конус

справа. Давление на входе в вихревую трубу отслеживалось по параметру π как отношение давления на входе $p_{вх}$ к давлению холодного выхода p_x ; температура ΔT_r отслеживалась как разница между температурой горячего выхода T_r и температурой входа $T_{вх}$; температура ΔT_x — как разница между температурой холодного выхода T_x и температурой входа $T_{вх}$; доля холодного потока в общем расходе воздуха $\mu = \frac{G_x}{G_{вх}}$ — как отношение массового расхода

холодного потока G_x к массовому расходу на входе $G_{вх}$ в вихревую трубу.

На рис. 9 построены зависимости, демонстрирующие температурное разделение горячего и холодного потоков в вихревой трубе. Данные были получены для нескольких степеней понижения давления, соответствующих $p_{вх}$. Для всех рассмотренных безразмерных величин π эффект охлаждения ΔT_x имел максимум в области определения параметра μ от 0,2 до 0,4. Температура горячего потока монотонно возрастала с увеличением доли холодного выхода μ и достигала своего максимального значения при $\mu = 1$. Степень понижения давления влияла на температурную стратификацию в вихревой трубе. Температура холодного выхода снижалась с увеличением давления подачи. Температуры горячего выхода для значений π , равных 4, 6, 8, оказались практически одинаковыми, но для π , равного 2, было заметно снижение температурной разницы ΔT_r . Для сравнения были проведены расчеты для случая прироста (падения) температуры ΔT . Очевидно, что расчетные и экспериментальные кривые качественно согласуются.

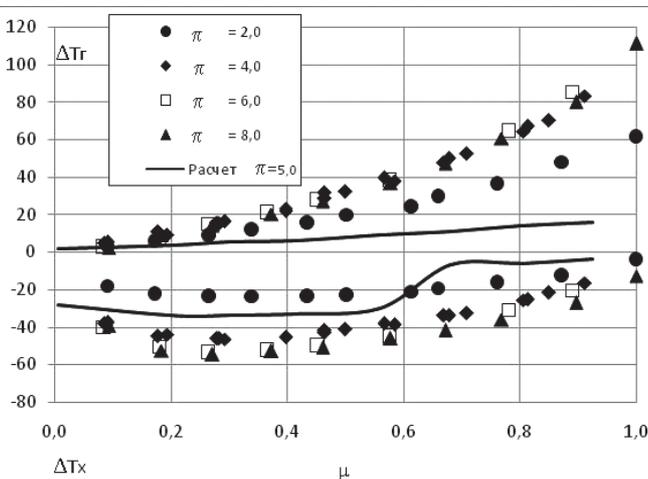


Рис. 9. Температурная стратификация при различных степенях падения давления π

При реализации эффекта тепловой стратификации для данной конструкции вихревой трубы было интересно проследить за ее тепло- и холодопроизводительностью (q_r и q_x). Удельная теплопроизводительность была рассчитана по формуле $q_r = c_p(1 - \mu)\Delta T_r$, аналогично рассчитывалась и холодопроизводительность $q_x = c_p(1 - \mu)\Delta T_x$.

Из рис. 10 видно, что максимальный эффект по производительности в том и в другом случае был реализован при $\mu = 0.6 \div 0.7$. При этом рост обеих функций в интервале μ от 0 до 0.5 был практически линейным.

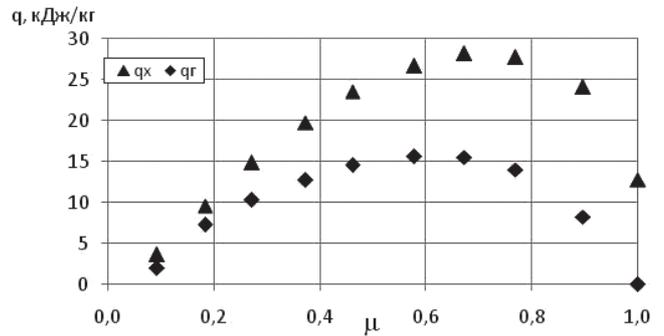


Рис. 10. Удельная производительность при степени повышения давления $\pi = 8$

Температурный КПД η_r (рис. 11) вихревой трубы рассчитывался как отношение температурной разницы ΔT_x , полученной в эксперименте, к температурной разнице при изоэнтропном расширении потока от состояния с параметрами входа $p_{вх}$, $T_{вх}$ до состояния с параметрами выхода p_x , T_x . Максимальное значение температурного КПД находилось на уровне 50% при $\mu = 0.3$ и $\pi = 4$.

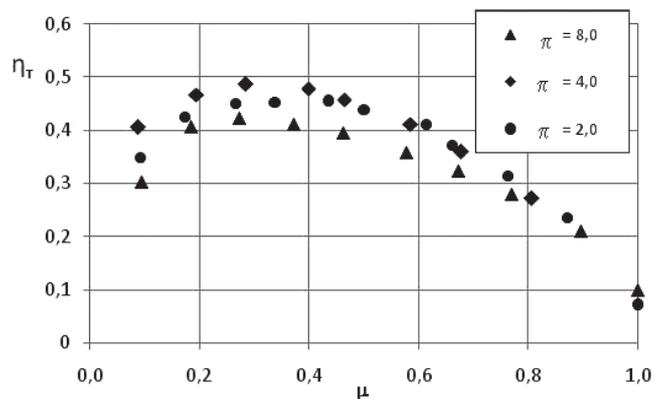


Рис. 11. Температурный КПД при различных степенях понижения давления π

Адиабатный КПД $\eta_{ад}$ (рис. 12) вихревой трубы рассчитывался как отношение холодопроизво-

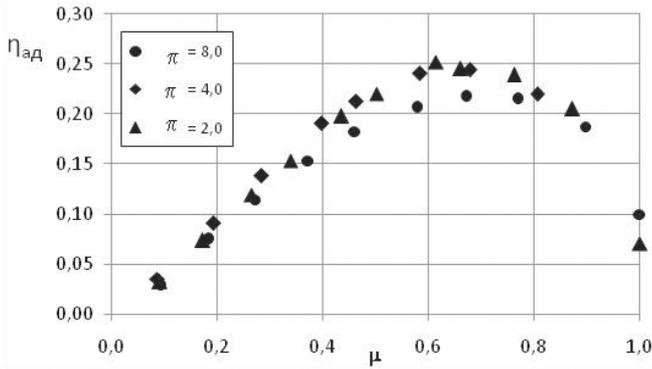


Рис. 12. Адиабатный КПД при различных степенях понижения давления π

дительности q_x , полученной в эксперименте, к максимально возможной при изоэнтропном расширении потока от состояния с параметрами входа $p_{вх}$, $T_{вх}$ до состояния с параметрами выхода p_x , T_x . Максимум адиабатного КПД оказался в районе координаты $\mu = 0.6 \div 0.8$, что соответствовало координате μ при максимальной производительности.

Вторым наблюдаемым эффектом был эффект вихревой инверсии. Экспериментально был зарегистрирован температурный максимум для горячего потока при его нулевом расходе. Полностью закрытое положение регулирующего конуса со стороны горячего потока позволяло по-прежнему наблюдать эффект понижения температуры слева, причем горячий поток после разворота выходил вместе с холодным, разбавляя его (рис. 13).

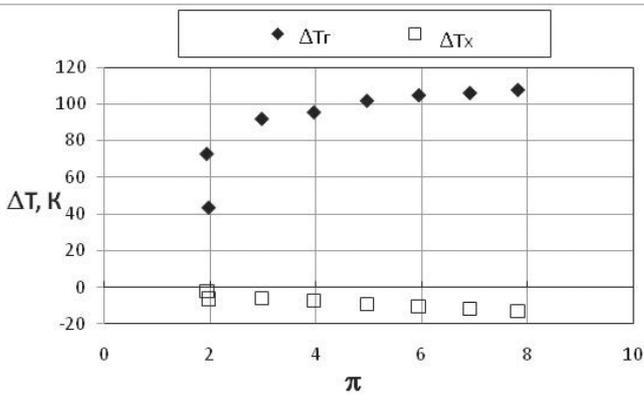


Рис. 13. Температурная стратификация в зависимости от степени понижения давления π при μ = 1

Третий эффект, который был экспериментально зафиксирован в вихревой трубе, — эффект инжекции, заключающийся в том, что при увеличении площади выходного сечения горячего потока (справа) с некоторого положения регулирующего конуса поток слева останавливался ($\mu = 0$) и затем менял направление на противоположное. Вихревая труба начинала работать как инжектор, всасывая

воздух из внешней среды с левой стороны. Точно измерить площадь проходного сечения, при которой наступала инжекция, не удалось из-за особенностей конструкции трубы. (В предыдущем разделе эта величина была получена расчетным путем.) Для того чтобы сравнить экспериментальные данные с расчетными, инжекцию регистрировали другим способом (рис. 14).

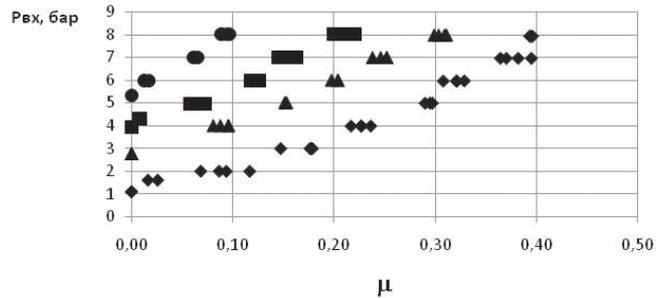


Рис. 14. Момент начала инжекции при различных положениях регулирующего конуса, соответствующих разным значениям μ

Первоначально при максимальном давлении на входе с помощью регулирующего конуса устанавливали соотношение расходов μ , равное приблизительно 0.1, 0.2, 0.3; 0.4, затем давление на входе $p_{вх}$ понижали. Это влекло за собой уменьшение доли холодного потока, выходящего из трубы. В момент, когда поток слева падал до нуля, регистрировали давление подачи $p_{вх}$. Таким образом, косвенным путем были зафиксированы положение регулирующего конуса и соответствующие ему значения $p_{вх}$, а следовательно, π , при которых наступала инжекция в вихревой трубе. Полученные данные позволили оценить площадь проходного сечения и сравнить момент наступления инжекции с результатами расчетов.

На рис. 15 представлена характеристика трубы, работающей в режиме инжекции при полностью открытых правом и левом выходах. Параметр

$$\mu = \frac{G_x}{G_{вх}}$$

в данном случае становился коэффициентом инжекции и косвенно характеризовал мощность процесса. Следует отметить, что в режиме инжекции температура смешанного потока незначительно повышалась (на 1.5—2°C) по отношению к ожидаемому значению, что может быть объяснено небольшим поджатием за счет центробежных сил.

Эксперименты с вихревой трубой позволили наблюдать и регистрировать при определенных условиях эффекты повышения и понижения температуры, наличие температурных максимумов,

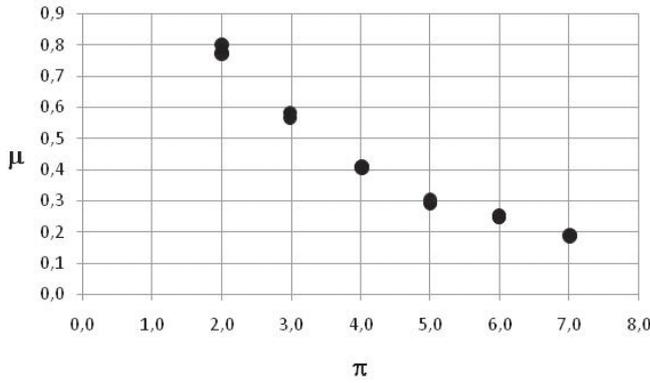


Рис. 15. Коэффициент инжекции вихревой трубы в зависимости от π в условиях максимально открытых горячего и холодного выходов

максимумов производительности и КПД, подтвердить наличие эффектов инверсии и инжекции. Результаты проведенных экспериментов качественно соответствовали результатам расчетных исследований, представленным в предыдущем разделе. Это дало основание считать правильным выбранное расчетно-экспериментальное направление для исследования сложнейших газодинамических процессов в вихревых трубах Ранка—Хилша.

Теоретический аспект в задаче Ранка—Хилша

Для расчетов использовался продукт FlowSimulation, разработанный на базе уравнений Рейнольдса, которые, как известно, являются весьма приближенными и решения с помощью которых во многом зависят от произвольно выбранных моделей турбулентности. Строго говоря, достаточно смелый отход от первоначальных уравнений Навье—Стокса может оказаться не всегда оправданным. Но! Историческая популярность этих уравнений на сегодняшний день достаточно велика в силу практического отсутствия методов и программ, использующих строгую математическую постановку газодинамической задачи Навье—Стокса.

Попытки получения понятных для дальнейшей разработки расчетных методов в задаче Ранка—Хилша на базе векторного уравнения Навье—Стокса приводят к следующей его записи: уравнение Навье—Стокса можно записать в виде [10]

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial \tau} + \text{grad} \frac{\vec{V}^2}{2} + \frac{1}{\rho} \text{grad} p - \frac{4}{3} \nu \text{grad} \text{div} \vec{V} + [\text{rot} \vec{V} \cdot \vec{V}] + \nu \text{rot rot} \vec{V} = 0.$$

Третий член этого уравнения с учетом первого и второго начал термодинамики для обратимых процессов (замкнутая термодинамическая система)

можно выразить через энтропию S, причем необходимо иметь в виду, что $S = k_B \cdot \sigma$, где k_B — константа Больцмана:

$$\frac{1}{\rho} \text{grad} p = \text{grad} h - T \text{grad} S = \text{grad} h - \text{grad} Q.$$

Здесь h и Q — статическая энтальпия и тепло.

Тогда уравнение может быть записано с учетом вязкости и сжимаемости:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial \tau} + \text{grad} \left(h_0 - Q - \frac{4}{3} \nu \text{div} \vec{V} \right) + [\text{rot} \vec{V} \cdot \vec{V}] + \nu \text{rot rot} \vec{V} = 0.$$

Это уравнение устанавливает связь энтропии с параметрами вращения и кручения потока. Она учитывает сжимаемость и вязкость. Если на это уравнение воздействовать векторным оператором дивергенции, то можно получить соотношение для энергии:

$$\Delta \left(h_0 - \int T dS - \frac{4}{3} \frac{\nu}{\rho \alpha^2} \frac{dp}{d\tau} \right) + \vec{V} \cdot \text{rot rot} \vec{V} - \text{rot} \cdot \vec{V} \cdot \text{rot} \cdot \vec{V} = 0.$$

Для стационарных ламинарных течений уравнение энергии вдоль линий тока может быть записано в виде:

$$h_0 - \int T dS - \frac{4}{3} \frac{\nu}{\rho \alpha^2} \text{grad} p = \text{const};$$

$$h_0 - \int T dS - \frac{4}{3} \frac{\nu \vec{V}}{\alpha^2} (\text{grad} h - T \text{grad} S) = \text{const};$$

$$(h_0 - Q) - \frac{4}{3} \frac{\nu \vec{V}}{\alpha^2} \text{grad}(h - Q) = \text{const}.$$

Последнее уравнение можно считать рабочим при расчетах балансов на входе и выходах из трубы Ранка—Хилша. Другими словами, энтальпийный дефект, появляющийся в экспериментах [1], может быть объяснен именно энтропийным и диссипативным членами.

Выводы

На основании проведенных расчетных и экспериментальных исследований можно констатировать следующее:

1. Установлен ряд вихревых эффектов, реализующихся в трубах Ранка—Хилша:

- стратификации;
- вихревой инверсии;
- инъекции,

а также газодинамического расположения вихрей в торцевой области при закрытом горячем выходе и коаксиального сопряжения вихревых инверсионных течений при наличии центрального тела.

2. Предложены новые газодинамические и энергетические уравнения для расчета течений в вихревых трубах и других каналах.

3. Экспериментальным и расчетным путем получены некоторые численные значения, позволяющие оценить оптимальные характеристики труб Ранка—Хилша.

4. Следует продолжать работу в части строгой математической постановки задачи о течениях в трубах Ранка—Хилша.

Библиографический список

1. Жидков М.А., Девисилов В.А., Жидков Д.А., Кирикова О.В., Спиридонов В.С. Термодинамические эффекты Ранка—Хилша в трехпоточных вихревых трубах // Химическая технология. 2014. Т. 15. № 1. С. 25-33.
2. Жидков М.А., Бунятов К.Г., Иванов Р.Н., Габдулхаков А.Х., Спиридонов В.С., Кирикова О.В., Жидков Д.А. Температурная эффективность высокорасходных ТВТ на установке подготовки нефтяного газа Комсомольского месторождения (опыт пусконаладки) // Нефть. Газ. Новации. 2012. № 5(160). С. 46-52.
3. Бобровников Г.Н., Поляков А.А., Леньяко А.П., Ильина Н.И. Современное состояние и возможность применения вихревых труб в холодильной технике и в системах кондиционирования. — М.: ЦИНТИ-химнефтемаш, 1978. — 51 с.
4. Хаит А.В. Исследование эффекта энергоразделения с целью улучшения характеристик вихревой трубы: Дис. ... канд. техн. наук. — Екатеринбург, 2012. — 199 с.
5. Серебряков Р.А., Бирюк В.В. Вихревой эффект энергетического разделения газов в системах охлаждения и кондиционирования // Вестник Московского авиационного института. 1994. Т. 1. №1. С. 33-34.
6. Копьев П.Г. Вихревая труба и турбохолодильник: описание, области применения // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т.20. №4. С. 47-54.
7. Новиков И.Н., Абросимова Е.А. Разработка обобщенной математической модели расчета и проектирования камер сгорания вихревого противоточного типа // Труды МАИ. 2014. № 78. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=53709>
8. Козлов А.А., Богачева Д.Ю., Боровик И.Н. Исследование тепловой эффективности завесного охлаждения стенки камеры сгорания ракетного двигателя малых тяг // Вестник Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2014. № 1 (94). С. 80-91.
9. Chiaverini M.J., Sauer J.A., Munson S.M. Laboratory Characterization of Vortex-Cooled Thrust Chambers for Methane/O₂ and H₂/O₂ // AIAA. 2005. P. 4131.
10. Кочетков Ю.М. Турбулентность. Фундаментальное граничное условие сопровождения и новая постановка краевой задачи вязкой газовой динамики // Двигатель. 2015. №5 (101). С. 30-32.

VORTEX EFFECTS IN RANQUE-HILSH VORTEX PIPES

Kochetkov Yu.M.^{1*}, Borovik I.N.^{2**}, Podymova O.A.^{1***},
Mavrov V.A.^{1****}, Ishaev R.O.^{1*****}

¹ Research center named after M.V. Keldysh,
8, Onezhskaya str., Moscow, 125438, Russia

² Moscow Aviation Institute (National Research University),
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia

* e-mail: swgeorgy@gmail.ru

** e-mail: borra2000@mail.ru

*** e-mail: toolgapodymova@yandex.ru

**** e-mail: boxs132@yandex.ru

***** e-mail: rin9244@yandex.ru

Abstract

The paper presents the results of computational, experimental and analytical studies of gas-dynamic processes in Ranque-Hilsch vortex tubes. The presented review considers the relevance and need for employing

vortex effect for aerospace engineering. It reveals the necessity for vortex tubes with varying geometrical dimensions design for the purpose of operation range enhancement. The authors developed vortex pipe 3D model in SolidWorks system. They realized a viscous gas

in vortex tube computation engineering method, and demonstrated its implementation results in gas-dynamics computing FlowSimulation pack. To solve this problem Reynolds averaged Navier-Stokes system (RANS) of equations was used in this work. All computations were performed with orthogonal computing net using finite volume method. Two-parameter model of κ - ϵ type allowing sufficient flow core resolution was used as turbulence model. Several basic vortex effects, such as injection, heat stratification and vortex inversion, were obtained by computation. All calculation were performed for various structural versions. A series of experiments was conducted with custom-made experimental setup. Processing of the obtained results lead to obtaining hot and cold flows productivity optimums, injection ratio, temperature stratification, as well as adiabatic and temperature efficiency.

The experimental results fully confirmed the vortex effects of obtained by engineering computational method. The authors suggest new differential equations for parameters computation in these tubes. The obtained equations establish relation with flow rotation and whirling, as well as explain the enthalpy effect. Computational and experimental as well as analytical studies should continue with regard to optimal structural concept.

Keywords: SolidWorks, pneumatic-hydraulic circuit, stratification effect, Ranque-Hilsch tube, enthalpy defect.

References

1. Zhidkov M.A., Devisilov V.A., Zhidkov D.A., Kirikova O.V., Spiridonov V.S. *Khimicheskaya tekhnologiya*, 2014, vol. 15, no. 1, pp. 25-33.
2. Zhidkov M.A., Bunyatov K.G., Ivanov R.N., Gabdulkhakov A.Kh., Spiridonov V.S., Kirikova O.V., Zhidkov D.A. *Neft' Gaz. Novatsii*, 2012, no. 5 (160), pp. 46-52.
3. Bobrovnikov G.N., Polyakov A.A., Lenyavko A.P., Il'ina N.I. *Sovremennoe sostoyanie i vozmozhnost' primeneniya vikhrevykh trub v kholodil'noi tekhnike i v sistemakh konditsionirovaniya* (Current state and possibility of vortex tubes application in refrigeration and air conditioning systems), Moscow, TsINTIkhimneftemash, 1978, 51 p.
4. Khait A.V. *Issledovanie effekta energorazdeleniya s tsel'yu uluchsheniya kharakteristik vikhrevoi trubyy* (Study of energy separation effect to improve vortex tube characteristics), Doctor's thesis, Ekaterinburg, Ural'skii federal'nyi universitet imeni pervogo prezidenta Rossii B.N. El'tsina, 2012, 199 p.
5. Serebryakov R.A., Biryuk V.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 1994, vol. 1, no. 1, pp. 33-34.
6. Kop'ev R.G. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2013, vol. 20, no. 4, pp. 47-54.
7. Novikov I.N., Abrosimova E.A. *Trudy MAI*, 2014, no. 78, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/eng/published.php?ID=53709>
8. Kozlov A.A., Bogacheva D.Yu., Borovik I.N. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baumana. Seriya "Mashinostroenie"*, 2014, no. 1 (94), pp. 80-91.
9. Chiaverini M.J., Sauer J.A., Munson S.M. Laboratory Characterization of Vortex-Cooled Thrust Chambers for Methane/O₂ and H₂/O₂. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA)*, 2005, p. 4131.
10. Kochetkov Yu.M. *Dvigatel'*, 2015, no. 5 (101), pp. 30-32.