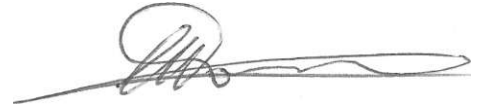


На правах рукописи



ТОЛМАЧЕВ Валерий Вячеславович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВОГО
ЗАПАЛЬНО-СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО МОДУЛЯ КАМЕР СГОРАНИЯ
ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК**

Специальность 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский институт машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ)» на кафедре «Турбиностроение и средства автоматики»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
БОГОВ Игорь Александрович

Официальные оппоненты: ЛАПШИН Кирилл Леонидович
доктор технических наук, профессор
кафедры «Турбинные установки и двигатели», Санкт-Петербургский
государственный политехнический
университет (СПбГПУ)

АКУЛОВ Владимир Алексеевич
кандидат технических наук, генеральный
директор ООО «Тепловые двигатели»
г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: ОАО «Научно-производственное объединение
по исследованию и проектированию
энергетического оборудования
им. И.И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»)
г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «23» октября 2012 г. в 16 ч на заседании диссертационного совета Д212.229.06 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29, Гл. корп., ауд. 130.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат диссертации доступен на официальном сайте СПбГПУ (<http://www.spbstu.ru/>).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29, Ученый Совет Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Автореферат разослан «___» _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Талалов Виктор Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Режимы запусков газотурбинных (ГТУ) и паротурбинных установок (ПТУ) являются важнейшими динамическими характеристиками их маневренных свойств. При пуске энергетических турбоустановок широко используются факельно-искровые системы розжига камер сгорания (КС) и топков котлов, в которых используются газовые запальные устройства (ЗУ). Одним из основных требований, предъявляемых к этим системам розжига, является обеспечение высокой эксплуатационной надежности их элементов и, в частности, запально-горелочных устройств. Отказы запальных устройств приводят к отсрочке запуска турбоустановок и, следовательно, несвоевременному вводу их в электросеть, недовыработке электроэнергии, потере топлива, снижению ресурсных показателей, а в ПТУ – к нарушению взрывопожаробезопасности котельных агрегатов.

Надежность розжига КС зависит как от ее конструктивного исполнения и оптимальной компоновки системы розжига с горелочным устройством, так и от тепловых и рабочих характеристик запального факела. В КС и котлах для расширения режимов горения применяются «дежурные» горелочные устройства. Повысить температуру факела запально-стабилизирующего горелочного устройства, его устойчивость к внешним потокам различной пространственной ориентации и расширить пределы горения позволяет реализация в их конструкции вихревого способа передачи пламени (ВСПП) в объем КС за счет предварительной закрутки горючей смеси на входе в вихревую трубу и полного предварительного смешения горючего газа с воздухом. В соответствии с принципом работы эти системы получили название вихревых запально-горелочных устройств (ВЗГУ) [4, 8]. Рассматривая КС ГТУ с позиций системного анализа, можно выделить в качестве самостоятельного системообразующего модуля запально-стабилизирующее горелочное устройство.

Широкое внедрение перспективных вихревых запально-стабилизирующих модулей (ВЗСМ) до недавнего времени сдерживалось отсутствием данных о влиянии геометрических параметров конструкции на их тепловые и рабочие характеристики, а также отсутствием методики их инженерно-проектировочного расчета. Поэтому исследование тепловых и рабочих характеристик ВЗСМ на физических моделях и разработка методики проектировочного расчета конструкции ВЗСМ является весьма актуальной задачей.

Цель настоящей работы заключается в совершенствовании системы розжига камер сгорания и топков котлов турбоустановок на основе теоретических и экспериментальных исследований аэродинамических, тепловых и рабочих характеристик вихревого запально-стабилизирующего модуля (ВЗСМ), а также разработке инженерно-проектировочного расчета его конструкции.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

– разработать лабораторный стенд для экспериментального исследования ВЗСМ, схемы измерений, оснастить его необходимыми датчиками и измерительной аппаратурой, а также разработать научно обоснованные физические модели ВЗСМ;

- выполнить экспериментальное исследование влияния геометрических параметров моделей ВЗСМ на аэродинамические характеристики потока в условиях продувки этих моделей потоком воздуха (без горения);
- выполнить экспериментальное исследование влияния геометрических параметров моделей ВЗСМ, коэффициента избытка воздуха на изменение температуры и длины факела;
- определить диапазон рабочего регулирования и характеристику устойчивости горения ВЗСМ;
- выполнить сравнительный анализ пределов рабочего регулирования, температур и длин запального факела ВЗСМ и запально-защитного устройства (ЗЗУ);
- разработать математическую модель работоспособной длины трубы ВЗСМ на основе аналитического обобщения результатов комплексных исследований его аэродинамических и тепловых характеристик;
- разработать методику инженерно-проектировочного расчета конструкции вихревого запально-стабилизирующего модуля с тепловой мощностью 0,5...150 кВт;
- разработать практические рекомендации по использованию ВЗСМ в камерах сгорания и топках котлов турбоустановок.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработан уникальный лабораторный стенд для экспериментального исследования рабочих характеристик ВЗСМ на физических моделях с длиной трубы от 0,15 до 3 м;
- разработаны научно-обоснованные физические модели ВЗСМ, применение которых в экспериментальных исследованиях позволяет осуществлять необходимый спектр экспериментальных исследований, с варьированием геометрических параметров этих моделей в достаточно широком диапазоне;
- теоретически обоснован и экспериментально подтвержден вихревой способ передачи пламени (ВСПП) в ВЗСМ, использование которого позволяет улучшить рабочие характеристики запальных и дежурных горелочных устройств КС и котлов турбоустановок;
- получено аналитическое выражение зависимости интенсивности закрутки потока от конструктивного параметра закручивающего устройства (завихрителя) и разработана математическая модель изменения интенсивности закрутки потока вдоль трубы с учетом ее длины, шероховатости внутренней стенки и начальной интенсивности закрутки;
- впервые определены тепловые характеристики ВЗСМ на основных режимах горения и аналитическая зависимость длины факела от коэффициента избытка воздуха $\alpha = 0,7 \dots 1,5$ и интенсивности закрутки потока на выходе из трубы $\Phi_{*_{вых}} = 2,2 \dots 3,5$;
- впервые получена характеристика устойчивости факела ВЗСМ и определен диапазон его рабочего регулирования по расходу газа;
- определены оптимальные параметры начальной интенсивности закрутки потока с учетом шероховатости внутренней стенки вихревой трубы, коэффициента избытка воздуха, величины относительного конфузорного сужения, давлений воздуха и газа, обеспечивающие высокую эксплуатационную надежность ВЗСМ;

– впервые разработана методика проектировочного расчета ВЗСМ и осуществлена ее компьютерная реализация, позволяющая оперативно осуществлять оптимизацию конструкции модуля с требуемой длиной свободного факела для заданных условий эксплуатации.

Достоверность полученных результатов обеспечивается выполненным значительным объемом научно обоснованных экспериментальных исследований, корректностью методики обработки опытных данных, применением апробированных методов теории подобия, удовлетворительным совпадением экспериментальных данных и расчетных величин, полученных в программном комплексе «Fluent», а также удовлетворительным совпадением геометрических и режимных параметров конструкций ВЗСМ, выполненных по разработанной автором методике проектировочного расчета, с соответствующими параметрами конструкций ВЗГУ, созданных путем длительной их экспериментальной отработки.

Практическая значимость и внедрение:

– созданный при участии автора уникальный лабораторный стенд позволяет осуществлять экспериментальные исследования рабочих процессов и режимов горения факела в ВЗСМ, различающихся тепловой мощностью;

– теоретически обоснованный и экспериментально подтвержденный автором вихревой способ передачи пламени (ВСПП) в трубах ВЗСМ может быть реализован в различных технических устройствах, функционирование которых предполагает транспортировку пламени внутри трубы на значительное расстояние: запально-горелочных устройствах КС и котлов, вихревых пламеперебрасывающих патрубках (ВПП) камер сгорания, микрофакельных КС, а также в вихревых горелках нагрева (ВГН), используемых в технологических операциях при производстве монтажных и демонтажных работ турбомашин [4, 11];

– полученные тепловые характеристики ВЗСМ на основных режимах горения и аналитическая зависимость длины факела от коэффициента избытка воздуха α и интенсивности закрутки потока на выходе из трубы $\Phi_{*_{в\text{лх}}}$ позволяют осуществлять оптимальную компоновку вихревого модуля с горелочными устройствами КС и топок котлов;

– полученные характеристики устойчивости факела и рабочего регулирования по расходу газа ВЗСМ позволяют в эксплуатационных условиях осуществлять выбор оптимального режима горения;

– определены оптимальные параметры следующих величин, учет которых позволяет обеспечить высокую эксплуатационную надежность ВЗСМ: начальной интенсивности закрутки потока с учетом шероховатости внутренней стенки вихревой трубы, коэффициента избытка воздуха, величины относительного конфузورного сужения, давлений воздуха и газа;

– разработанная методика инженерно-проектировочного расчета ВЗСМ и ее компьютерная реализация, позволяют сократить затраты времени и материальные средства на разработку эффективных вихревых модулей различных мощностей и назначения для заданных условий эксплуатации и длины свободного факела $L_{\text{ф}}/d_{\text{тр}}=0,5\dots 10$;

– полученные результаты исследования могут быть использованы при проектировании новых и модернизации, находящихся в эксплуатации, конструкций ВЗГУ;

– ВЗГУ внедрены в КС ГТУ типа ГТ-100, ГТЭ-65 и ГТЭ-150, ЛМЗ, а также в котлах типа ТГМ и ПТВМ. Методика проектировочного расчета ВЗСМ принята к внедрению в ОАО «Силовые машины».

Автор защищает:

1. Методику инженерно-проектировочного расчета вихревых запально-стабилизирующих горелочных модулей.

2. Аналитические зависимости:

– интенсивности закрутки потока на входе в трубу от конструктивного параметра закручивающего устройства тангенциального типа, реализующего две зоны рециркуляции;

– диаметра приосевого обратного тока на входе в трубу от интенсивности закрутки с учетом конфузорного сужения выходного сечения камеры закручивающего устройства.

3. Математическую модель ВЗСМ, определяющую интенсивность закрутки потока в произвольном поперечном сечении вихревой трубы и ее рабочую длину в зависимости от относительной шероховатости внутренней стенки и начальной интенсивности закрутки.

4. Тепловые характеристики ВЗСМ, полученные в стендовых условиях на физических моделях и, содержащие, следующие зависимости:

– температуры факела от коэффициента избытка воздуха на режимах горения;

– длины свободного факела от коэффициента избытка воздуха и интенсивности закрутки на выходе из трубы.

5. Характеристики устойчивости факела и пределов рабочего регулирования по расходу газа вихревых запально-стабилизирующих модулей различной тепловой мощности.

Апробация работы. Основные материалы работы докладывались на X Всероссийской научно-технической конференции «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели» (Москва, 1996г.); на XLIV научно-технической сессии по проблемам газовых турбин (Москва, 1997г.); на НТС ПИМаш с участием представителей базовых предприятий и организаций (Санкт-Петербург, 1997, 1998, 1999 и 2000г.); Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника и высокие технологии» (Пермь, 2002г.) и на Международной научной конференции «Современное турбостроение» (Санкт-Петербург, 2004г.); НТС кафедры «Турбиностроение и средства автоматизации» ПИМаш (Март 2012г.); НТС кафедры «Турбинные установки и двигатели» СПбГПУ (май 2012г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, в том числе 2 статьи — в рецензируемых изданиях по списку ВАК.

Личный вклад автора заключается: в разработке экспериментального стенда и физических моделей ВЗСМ, схемы измерений и оснастки стенда; подготовке и проведении экспериментальных исследований; обработке и анализе экспериментальных данных, разработке аналитических зависимостей и математической модели ВЗСМ; разработке методики проектировочного расчета ВЗСМ и ее компьютерной реализации; выполнении комплекса проектировочных расчетов ВЗСМ и сравнение их харак-

теристик с опытно-промышленными образцами ВЗГУ; разработке рекомендаций по применению ВЗСМ в КС ГТУ и котлах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения, списка литературы, иллюстраций и 13 приложений. Работа изложена на 170 листах машинописного текста, содержит 6 таблиц и 35 рисунков. Общий объем диссертации составляет 216 листов формата А4. Список литературы включает 96 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель диссертационной работы, определен предмет исследований и представлена общая характеристика работы.

В первой главе приведен анализ способов зажигания топливоздушнoй смеси в КС ГТУ, топках котлов и обзор публикаций, посвященных разработке конструктивных схем запальных устройств (ЗУ), расчетным методикам и методам исследования внутренних закрученных потоков.

Исследования и разработка конструкций ЗУ проводились во Всесоюзном теплотехническом институте (ВТИ), в Центральном котлотурбинном институте (ЦКТИ), на Невском заводе (НЗЛ), Ленинградском металлическом заводе (ЛМЗ), в Санкт-Петербургском институте машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ), Николаевском кораблестроительном институте (НКИ), на заводе «Ильмарине» (Эстония) и других.

Выбор рациональной конструктивной схемы ЗУ для разработки методики проектного расчета производится с учетом различных факторов: надежности запуска ГТУ, тепловых характеристик и устойчивости факела к внешним возмущениям, конструктивной надежности элементов и систем, технологичности, условий эксплуатации и других. Указанным системным принципам в значительной мере удовлетворяет конструкция ВЗГУ, разработанного в Санкт-Петербургском институте машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ) и ОАО «ЛМЗ».

Проведенный анализ конструктивной схемы ВЗГУ и публикаций, посвященных исследованию внутренних закрученных потоков, позволяет установить, что устойчивость и длина факела при фиксированных расходах воздуха и газа зависят от относительной длины трубы $L_{тр}/d_{тр}$, при которой сохраняется приосевой возвратный ток в вязком газе, интенсивности закрутки потока на выходе трубы $\Phi_{*_{вых}}$, коэффициента избытка воздуха α и конфузoрного сужения выходного сечения камеры закручивающего устройства $\bar{F}_{кон} = F_{тр}/F_k$. В свою очередь величина $\Phi_{*_{вых}}$ зависит от геометрических параметров завихрителя, которые определяют интенсивность закрутки на входе в нее $\Phi_{*_{вх}}$, а также от относительной длины трубы $L_{тр}/d_{тр}$ и гидравлической шероховатости ее внутренней стенки $\bar{\Delta} = 2\Delta/d_{тр}$.

Для физического моделирования процессов в ВЗГУ принимается системный вихревой запально-стабилизирующий модуль (ВЗСМ), на котором проводится весь

комплекс исследований. В качестве критерия, связывающего геометрические параметры закручивающего устройства на входе в трубу ВЗСМ, принимается следующий комплекс, называемый конструктивным параметром завихрителя:

$$\Phi_{*_{вх.к}} = \frac{F_k}{F_c} \frac{L_{вх}}{R_k} \sin \beta_k, \quad (1)$$

где F_k – площадь поперечного сечения камеры завихрителя; F_c – площадь поперечного сечения тангенциального входа; $L_{вх}$ – плечо закрутки; R_k – радиус камеры; β_k – конструктивный угол закрутки, принятый равным 90^0 .

Во второй главе приведено описание экспериментального стенда, схем измерения, измерительной аппаратуры и приборов, конструкций ВЗСМ и геометрические характеристики исследуемых моделей.

Структура и аэродинамические характеристики закрученного потока в проточной части изучались на препарированных физических моделях ВЗСМ, которые представлены на рис.1. Указанные модели продувались воздухом, подаваемым в тангенциальный вход 5. Конструкции закручивающего устройства в моделях отличались от типовых схем расположением тангенциального подвода воздуха (смеси) 5 на расстоянии $L_{м.к.}/D_k=0,75\dots1,5$ от герметичной торцевой стенки 3 камеры закручивающего устройства 7 (см. рис.1).

В соответствии с конструктивным параметром (1) закручивающего устройства ВЗСМ в качестве варьирующих параметров принимались следующие безразмерные комплексы: $F_k/F_c=6,8\dots18,4$ – отношение площади сечения вихревой камеры закручивающего устройства к площади наименьшего сечения тангенциального входа и $L_{вх}/R_k=0,62\dots0,87$ – отношение плеча закрутки потока к внутреннему радиусу вихревой камеры. В зависимости от задачи исследований в качестве варьирующих параметров моделей принимались: длина трубы $L_{мп}/d_{мп}=10\dots70$, шероховатость ее внутренней стенки $\bar{\Delta}=2\Delta/d_{мп}=0,0012\dots0,0044$ и величина конфузورного сужения выходного сечения камеры закручивающего устройства $\bar{F}_{кон}=F_{мп}/F_k=0,25\dots1,0$.

Для исследования влияния относительной величины конфузорного сужения $\bar{F}_{кон}$ (угла сужения конфузора 2γ) выходного поперечного сечения камеры закручивающего устройства на кинематику потока и его аэродинамические характеристики, а также работоспособность модуля в условиях с горением разработаны геометрически подобные модели ВЗСМ, конструктивная схема которого представлена на рис.1, б.

На моделях ВЗСМ определяется зависимость относительного диаметра приосевого возвратного тока $\bar{d}_{o.m}=d_{o.m}/d_{мп}$ от интегрального параметра закрутки потока на входе в трубу $\Phi_{*_{вх}}$ и величины относительного конфузорного сужения $\bar{F}_{кон}$.

Одна из физических моделей ВЗСМ используется для проведения расчетно-теоретических исследований параметров потока в газодинамическом программном комплексе «Fluent» для количественного сравнения экспериментальных данных составляющих скорости в периферийной и осевой области трубы с результатами расчета и подтверждения результатов измерений в приосевой области с малыми скоростями.

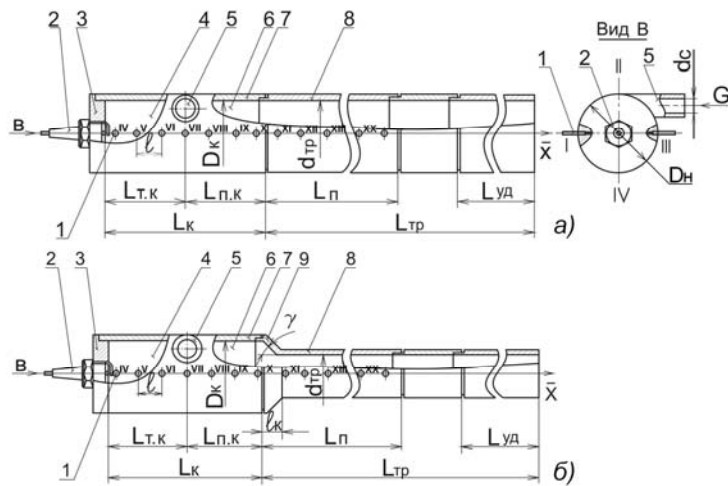


Рис.1. Конструктивные схемы физических моделей вихревого запально-стабилизирующего модуля (ВЗСМ): а – без конфузора в выходном сечении закручивающего устройства (завихрителя, $\bar{F}_{кон} = F_{тр} / F_k = 1$); б – с конфузуром в выходном сечении камеры завихрителя ($\bar{F}_{кон} < 1$): 1 – направляющие трубки для радиального ввода датчика измерения давлений и зонда угломера; 2 – свеча зажигания; 3 – торцевая стенка камеры завихрителя; 4 – полузамкнутая часть камеры завихрителя; 5 – тангенциальный вход для подвода воздуха (газовоздушной смеси); 6 – проточная часть камеры завихрителя; 7 – камера завихрителя; 8 – вихревая труба; 9 – конфузор в выходном сечении камеры завихрителя; IV...XXI – номера контрольных сечений

Наиболее важной задачей исследований является определение совместного количественного влияния интегрального параметра закрутки на входе $\Phi_{*вх}$ в трубу, ее длины $L_{тр} / d_{тр}$ и шероховатости внутренней стенки $\bar{\Delta} = 2\Delta / d_{тр}$ на интенсивность снижения закрутки потока вдоль трубы $\bar{\Phi}_{*i} = \Phi_{*i} / \Phi_{*вх}$. Для решения данной задачи принимались модели, различающиеся конструктивным параметром завихрителя $\Phi_{*вх.к}$ и соответственно начальной интенсивностью закрутки потока на входе в трубу, длиной трубы и шероховатостью ее внутренней стенки, формой поперечного сечения тангенциального входа и величиной конфузорного сужения.

Для экспериментального определения предела реализации ВСПП, минимального значения интенсивности закрутки факела $\Phi_{*вых \min}$ на выходе из вихревой трубы ВЗСМ, при котором обеспечивается устойчивое его горение, а также рабочей длины трубы для данных условий, в конструкции вихревой трубы предусмотрена возможность изменения ее длины (рис.1, поз.8) посредством изменения числа цилиндрических колец, соединяющихся по проточке. Экспериментальные исследования на моделях ВЗСМ проводились при числах Маха $M < 0,3$ и критерии подобия Рейнольдса $Re_{дтр} = (1,5 \dots 7,5) \cdot 10^4$.

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований и анализа структуры закрученного потока в изотермических условиях, а также тепловых и рабочих характеристик ВЗСМ. По результатам измерений угла подъема потока по спирали β_n , полного и статического давлений на моделях получены градиенты составляющих скорости – осевой и вращательной, которые представлены на рис.2. Из анализа градиентов осевой

скорости в поперечных сечениях моделей следует, что в приосевой области по обе стороны от тангенциального входа (см. рис.1, сеч. №VII) располагаются зоны обратных токов.

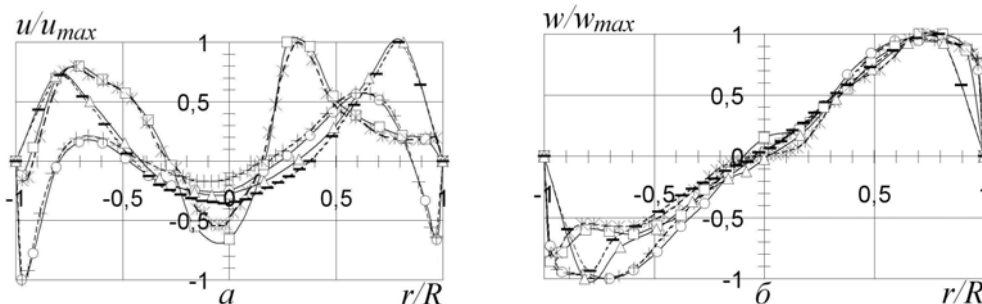


Рис.2. Результаты сравнения экспериментальных значений скорости с расчетными значениями, полученными в стандартном газодинамическом программном комплексе «Fluent»: а – осевой скорости u ; б – окружной скорости w :

- — эксперимент ($\bar{x}=0,4$; сечение №5); - + - + - — расчет;
- — эксперимент ($\bar{x}=2,3$; сечение №7); - * - * - — расчет;
- △—△— — эксперимент ($\bar{x}=6,0$; сечение №13); - ■ - ■ - — расчет

В приосевой области, в которой имеют место относительно малые скорости потока, чувствительность зондов, используемых для измерения давления, снижается. Поэтому наряду с указанными экспериментальными исследованиями проводились расчетно-теоретические исследования структуры закрученного потока в ВЗСМ посредством газодинамического программного комплекса «Fluent» с использованием усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса численным моделированием сжимаемого, вязкого и турбулентного потока. Расчеты выполнялись с использованием граничных условий, разработанных на основе полученных экспериментальных данных.

Вопрос об адекватности моделирования решался сопоставлением экспериментальных данных с результатами тестовых расчетов (см. рис.2), полученных на типовой модели ВЗСМ. Проведенные вычисления подтвердили общую структуру закрученного потока и уровень скорости в приосевой области. Наиболее высокая сходимость имеет место в пристеночной области, где разница расчетных и экспериментальных величин не превышала 2% и несколько хуже в приосевой области – 5%.

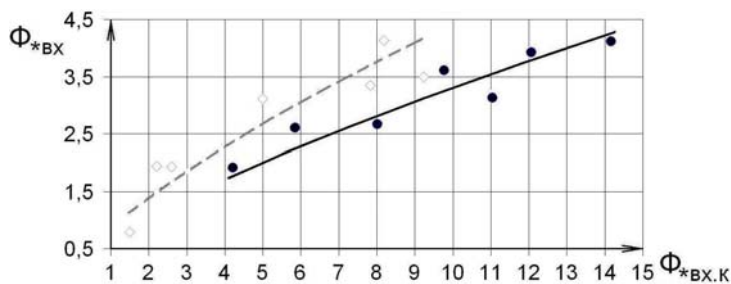


Рис.3. Зависимость интегрального параметра закрутки потока Φ_{*vx} на входе в трубу от конструктивного параметра завихрителя $\Phi_{*vx,k}$: ● – по экспериментальным данным для завихрителей ВЗСМ с одним тангенциальным входом, расположенным посередине вихревой камеры при $L_{m.k.}/D_k=1,5$; ◇ – по данным других авторов для типовых тангенциальных завихрителей с различным числом входов расположенных вплотную к торцу камеры; — — — — аппроксимация экспериментальных данных:

$$\Phi_{*vx}^* = 0,63 \Phi_{*vx,k}^{*0,72}; \text{ --- по данным Щукина В.К. и Халатова А.А.: } \Phi_{*vx}^* = 0,84 \Phi_{*vx,k}^{*0,72}$$

По экспериментальным данным, путем усреднения значений скорости и угла подъема потока, получена графическая зависимость интегрального параметра закрутки $\Phi_{*_{\text{вх}}}$ на входе в трубу (при $\bar{x}=3$) от конструктивного параметра закручивающего устройства $\Phi_{*_{\text{вх.к}}}$, представленная на рис.3. На графике пунктирной линией нанесена аналогичная зависимость для типовой конструкции завихрителя, в которой тангенциальный вход расположен вплотную к торцевой стенке камеры. Сравнение этих зависимостей показывает, что при одном и том же значении конструктивного параметра завихрителя $\Phi_{*_{\text{вх.к}}}$ величина интегрального параметра закрутки в модельном завихрителе в среднем меньше на 25%, чем в геометрически подобном типовом завихрителе. Следовательно, известные эмпирические зависимости не могут использоваться для построения математической модели ВЗСМ и соответствующей методики проектировочного расчета модуля.

Для модельного завихрителя ВЗСМ путем аппроксимации получена эмпирическая зависимость интегрального параметра закрутки от конструктивного параметра:

$$\Phi_{*_{\text{вх}}} = 0,63 \Phi_{*_{\text{вх.к}}}^{0,72}. \quad (2)$$

Полученная степенная зависимость, как одна из основополагающих, используется в методике проектирования ВЗСМ для расчета интенсивности закрутки потока на входе в трубу. По результатам воздушных продувок моделей для методики проектировочного расчета ВЗСМ разработана математическая модель изменения интенсивности закрутки потока вдоль оси трубы:

$$\Phi_{*i} = \frac{\Phi_{*_{\text{вх}}}}{-k_0^2 \cdot \frac{\bar{M}_{\text{вх}}}{\bar{K}_{\text{вх}}} \cdot \bar{L}_i^2 - k_0 \cdot (\bar{K}_{\text{вх}}^{-1} - \bar{M}_{\text{вх}}) \cdot \bar{L}_i + 1}, \quad (3)$$

где $\Phi_{*_{\text{вх}}}$ – интенсивность закрутки потока на входе в трубу, $\bar{M}_{\text{вх}}$ – усредненный относительный момент количества движения (МКД) на входе в трубу, $\bar{K}_{\text{вх}}$ – усредненное относительное количество движения (КД) на входе в трубу, \bar{L}_i – текущая относительная длина трубы, $k_0 = 2\Delta/d_{\text{мр}}$ – коэффициент пропорциональности, равный относительной гидравлической шероховатости внутренней стенки трубы.

Адекватность математической модели (3) с удовлетворительной степенью достоверности подтверждается результатами экспериментальных данных, представленными на рис.4а, по снижению интегрального параметра закрутки потока вдоль трубы под действием сил вязкого трения, а также характеристикой интенсивности снижения закрутки потока вдоль трубы $\Phi_{*i}/\Phi_{*_{\text{вх}}}$, представленной на рис.4,б. Анализ интенсивности изменения начальной закрутки потока вдоль трубы (см. рис.4,б) показывает, что затухание закрутки потока происходит тем интенсивнее, чем больше величины относительной шероховатости $2\Delta/d_{\text{мр}}$ и интенсивности закрутки потока $\Phi_{*_{\text{вх}}}$ на входе в вихревую трубу.

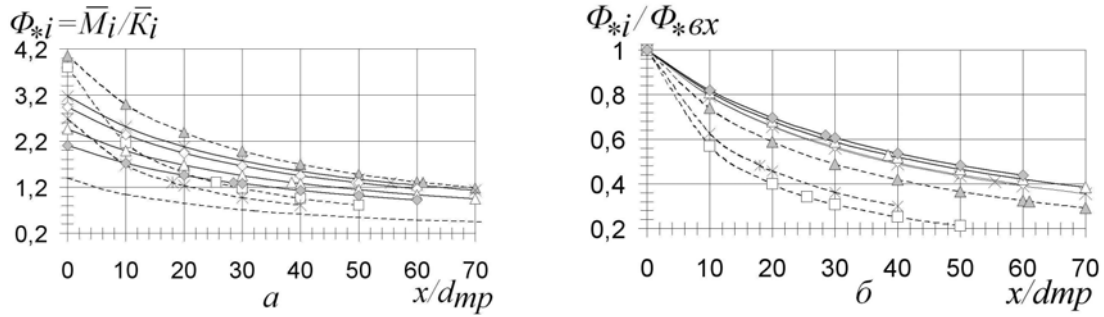


Рис.4. Изменение параметров закрутки потока воздуха вдоль трубы моделей ВЗСМ: *a* – интегрального параметра закрутки Φ_{*i} ; *б* – интенсивности снижения закрутки Φ_{*i} / Φ_{*ex} :

- ▲-▲- - $\Phi_{*ex}=4,1$, $\bar{F}_{кон}=0,59$, $\Delta=0,035$ мм, $\bar{\Delta}=0,0012$, $N_{VZSM}=70$ кВт, $L_{TP}/d_{mp}=70$;
- - $\Phi_{*ex}=3,8$, $\bar{F}_{кон}=0,44$, $\Delta=0,035$ мм, $\bar{\Delta}=0,0029$, $N_{VZSM}=10$ кВт, $L_{TP}/d_{mp}=50$;
- ×-×- - $\Phi_{*ex}=3,2$, $\bar{F}_{кон}=0,69$, $\Delta=0,035$ мм, $\bar{\Delta}=0,0014$, $N_{VZSM}=50$ кВт, $L_{TP}/d_{mp}=70$;
- ◇-◇- - $\Phi_{*ex}=2,9$, $\bar{F}_{кон}=0,54$, $\Delta=0,063$ мм, $\bar{\Delta}=0,0016$, $N_{VZSM}=100$ кВт, $L_{TP}/d_{mp}=60$;
- *-*- - $\Phi_{*ex}=2,7$, $\bar{F}_{кон}=1,00$, $\Delta=0,100$ мм, $\bar{\Delta}=0,0044$, $N_{VZSM}=30$ кВт, $L_{TP}/d_{mp}=40$;
- △-△- - $\Phi_{*ex}=2,5$, $\bar{F}_{кон}=1,00$, $\Delta=0,050$ мм, $\bar{\Delta}=0,0020$, $N_{VZSM}=40$ кВт, $L_{TP}/d_{mp}=70$;
- ◆-◆- - $\Phi_{*ex}=2,1$, $\bar{F}_{кон}=0,81$, $\Delta=0,040$ мм, $\bar{\Delta}=0,0025$, $N_{VZSM}=25$ кВт, $L_{TP}/d_{mp}=60$;
- - по данным работы Щукина В.К. и Халатова А.А. ($\Phi_{*ex.к}=2,034$, $\Phi_{*ex}=1,4$, $\bar{F}_{кон}=1$)

На физических моделях ВЗСМ определялись максимальные рабочие длины труб, обеспечивающие устойчивое развитие факела. При этом варьировались геометрические параметры моделей ВЗСМ, а также длины вихревых труб с заданной шероховатостью, которые изменялись посредством последовательного снятия колец с трубы ВЗСМ специальной наборной конструкции. Указанные рабочие длины труб ВЗСМ, обеспечивающие устойчивое развитие факела, определялись с учетом минимального значения интенсивности закрутки потока на выходе из трубы $\Phi_{*вых \min} = 1,3$ полученного с помощью математической модели (3). При значениях $\Phi_{*вых \min} < 1,3$ не обеспечивается устойчивое горение в ВЗСМ при любых рабочих параметрах. Под действием сил трения происходит снижение закрутки потока и вырождение в приосевой области возвратного тока, что приводит к ухудшению устойчивости горения и ограничению рабочей длины трубы ВЗСМ, максимальное значение которой для данных условий определяется следующей математической моделью, полученной на основе модели (3):

$$-k_0^2 \cdot \frac{\bar{M}_{ex}}{\bar{K}_{ex}} \cdot \bar{L}_{TP \max}^2 + k_0 \cdot (\bar{M}_{ex} - \bar{K}_{ex}^{-1}) \cdot \bar{L}_{TP \max} + 1 - \frac{\Phi_{*ex}}{\Phi_{*вых \min}} = 0. \quad (4)$$

При определении на моделях ВЗСМ рабочих режимов горения установлено, что местное конфузорное сужение выходного сечения камеры завихрителя оказывает в определенных пределах положительное влияние на устойчивость горения. На рис.5 показано влияние величины относительного конфузорного сужения камеры на градиенты основных

составляющих скорости потока воздуха. Из анализа этих графиков (см. рис.5) следует, что несимметричность потока относительно оси, вызванная одним тангенциальным входом закручивающего устройства, практически исчезает за конфуззором. Максимумы осевой и окружной составляющих скорости на входе в конфуззор находятся соответственно на среднем радиусе и в периферийной области, а на выходе из него смещаются в приосевую область при всех значениях $\bar{F}_{\text{кон}} < 1$. Диаметр возвратного приосевого тока в моделях ВЗСМ с конфуззорным сужением $\bar{F}_{\text{кон}} < 1$ уменьшается. При этом, чем меньше величина сужения $\bar{F}_{\text{кон}}$, тем значительней уменьшается диаметр возвратного тока. В результате обобщения экспериментальных данных приведенных на рис.5, получено следующее эмпирическое выражение зависимости относительного диаметра приосевого возвратного тока от интегрального параметра закрутки потока на входе в трубу $\Phi_{*_{\text{вх}}}$ и сужения выходного сечения камеры завихрителя ($\bar{F}_{\text{кон}} \leq 1$):

$$\bar{d}_{o.m} = 0,2 (\Phi_{*_{\text{вх}}} \cdot \bar{F}_{\text{кон}} - 0,6)^{0,72}. \quad (5)$$

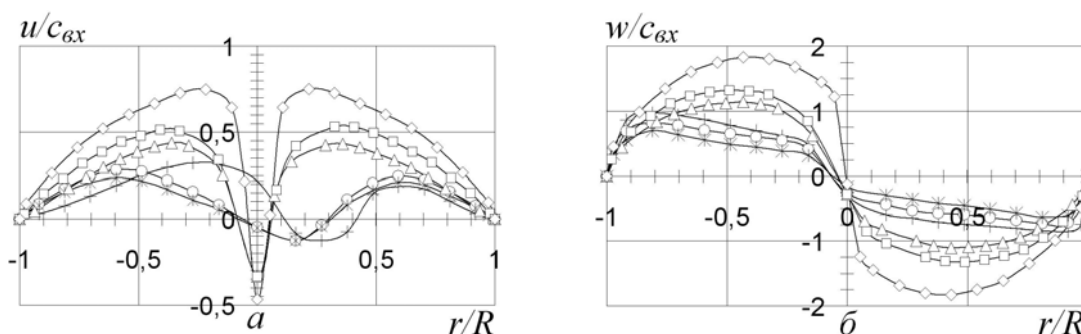


Рис.5. Влияние конфуззорного сужения $\bar{F}_{\text{кон}}$ выходного сечения завихрителя моделей ВЗСМ на распределение по радиусу: *a* – осевой, *б* – окружной скорости: —+— — $\bar{x}=1,5$ сечение №7 камеры завихрителя, проходящее через ось тангенциального входа; -○-○- $\bar{x}=2,3$ сечение №9 на входе в конфуззор; *-* $\bar{x}=3,1$ сечение №11 без конфуззора ($\bar{F}_{\text{кон}}=1$); -△-△- $\bar{x}=3,1$ сечение №11 на выходе из конфуззора при $\bar{F}_{\text{кон}}=0,563$; —□— $\bar{x}=3,1$ сечение №11 на выходе конфуззора при $\bar{F}_{\text{кон}}=0,439$; -◇-◇- $\bar{x}=3,1$ сечение №11 на выходе конфуззора при $\bar{F}_{\text{кон}}=0,25$

Эмпирическая зависимость (5) используется в методике расчета ВЗСМ для ограничения минимального параметра закрутки на входе и величины местного сужения камеры закручивающего устройства, а также при расчете длины факела в трубе.

Из анализа результатов экспериментальных исследований на физических моделях ВЗСМ в условиях с горением следует, что при значениях относительного конфуззорного сужения $\bar{F}_{\text{кон}} < 0,44$ режимы горения неустойчивые и характеризуются низкочастотными пульсациями факела при любых рабочих параметрах. В случае, если относительная величина сужения $\bar{F}_{\text{кон}} \geq 0,44$ обеспечивается высокая устойчивость факела с выходом его из вихревой трубы ВЗСМ без задержек и срывов. Использование конфуззорного сужения выходного сечения камеры закручивающего устройства позволяет не только увеличить длину факела в со-

ответствии с теоретическим обоснованием ВСПП, но и уменьшить разность температур на входе и выходе трубы ВЗСМ и, тем самым, уменьшить вероятность возбуждения неустойчивости горения, обусловленного термическим механизмом.

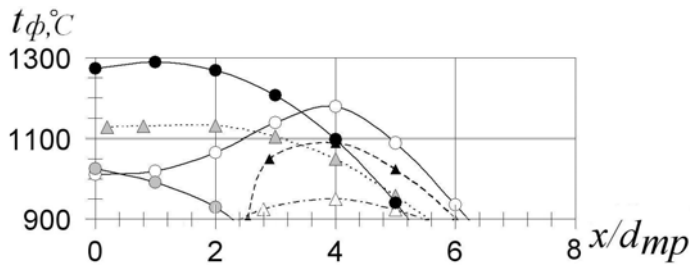


Рис.6. Изменение среднего значения температуры вдоль оси факела ВЗСМ: —○—○— $\alpha=0,7$; —●—●— $\alpha=1,0$; —●—●— $\alpha=1,5$ и 33У: ---△--- $\alpha=0,7$; ---▲--- $\alpha=1,0$; ---▲--- $\alpha=1,5$

По результатам измерений массового расхода воздуха и газа в ВЗСМ на основных режимах горения, а также длины запального факела и температуры вдоль него, определены основные тепловые характеристики вихревого модуля. На рис.6 приведены для сравнения характеристики изменения температуры факела вдоль оси ВЗСМ и запально-защитного устройства (ЗЗУ) в зависимости от коэффициента избытка воздуха. Температура факела ВЗСМ в сходственных точках выше, чем в ЗЗУ. Наибольшие, средние по поперечному сечению, значения температуры факела ВЗСМ составляют $1200...1300^{\circ}\text{C}$ и соответствуют режимам горения при коэффициентах избытка воздуха $\alpha=0,7...1,05$. При разработке методики расчета ВЗСМ этот диапазон изменения α принят в качестве рабочего.

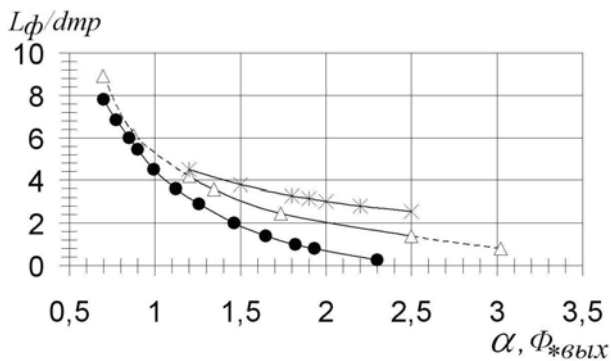


Рис.7. Изменение длины факела при увеличении расхода природного газа и постоянном расходе воздуха: —△—△— 33У; —●—●— модель ВЗСМ ($\Phi^*_{вблх}=1,3$); * * — модель ВЗСМ при постоянном $\alpha=1$ и изменении интенсивности закрутки на выходе из трубы $\Phi^*_{вблх}$

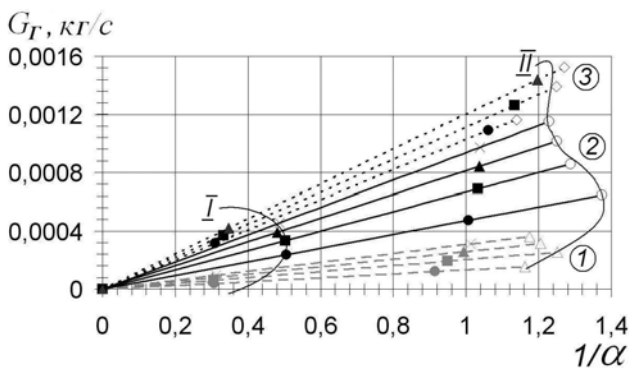


Рис.8. Характеристика устойчивости факела моделей ВЗСМ: 1 – модели с тепловой мощностью до 20 кВт; 2 – модели с мощностью от 20 до 60 кВт; 3 – модели с мощностью свыше 60 кВт; \bar{I} – выход факела из трубы; \bar{II} – частичный отрыв факела от устья трубы

Полученные значения рабочей длины запального факела ВЗСМ и характеристика рабочего регулирования по расходу газа позволяют определять устойчивые режимы горения при компоновке ВЗСМ с различными горелочными устройствами. Влияние коэффициента избытка воздуха и интенсивности закрутки потока на длину свободного факела ВЗСМ представлено на рис.7. С помощью аппроксимации данной характеристики получена эмпирическая за-

зависимость длины факела ВЗСМ от интенсивности закрутки потока на выходе трубы и коэффициента избытка воздуха:

$$\bar{L}_{ф.св} = \frac{5,2 \cdot \Phi_{*вых}^{-0,78}}{0,1367 \cdot e^{1,99 \cdot \alpha}}, \quad (6)$$

Из анализа результатов экспериментальных исследований следует, что длина запального факела ВЗСМ составляет $\bar{L}_{ф} = 2 \dots 7$ при обогащенном составе смеси и коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 0,7 \dots 1,05$. Обоеднение смеси до $\alpha \cong 2$ существенно сокращает длину факела в моделях ВЗСМ. Экспериментальным путем получена характеристика диапазона регулирования ВЗСМ по расходу газа, который составляет 1:5. Характеристики устойчивости факела для моделей ВЗСМ, полученные автором впервые, представлены на рис.8.

В четвертой главе приводится разработанная автором методика проекторочного расчета ВЗСМ на основе проведенных исследований, а также результаты сравнения геометрических параметров конструкций ВЗГУ, находящихся в эксплуатации, с геометрическими параметрами этих ВЗГУ, полученных расчетом по предлагаемой методике. Для применения ВЗСМ в КС и котлах разработаны рекомендации по выбору геометрических параметров и режимных характеристик.

Алгоритмы методики расчета позволяют проводить проекторочный расчет ВЗСМ с учетом конкретных эксплуатационных условий. Предлагаемый проекторочный алгоритм включает тепловой и конструктивный расчеты ВЗСМ основанные на известных методиках проектирования вихревых горелочных устройств, а также расчет длины и температуры факела на основных режимах горения с учетом представленных выше зависимостей (1)...(6).

В отличие от традиционных методик, разработанный алгоритм позволяет последовательными приближениями определять оптимальные геометрические параметры ВЗСМ, относительную длину факела и его среднюю температуру для обеспечения надежного розжига горелочного устройства заданной тепловой мощности. В методике предусмотрена, при необходимости, возможность изменения относительной длины факела ВЗСМ как в сторону ее увеличения, так и уменьшения, за счет внесения соответствующих корректировок начальной интенсивности закрутки и коэффициента избытка воздуха.

В методике проекторочного расчета ВЗСМ заложены значения предельной тепловой мощности и длины вихревой трубы, ограниченные диапазоном экспериментальных исследований, а также предельный диаметр трубы с учетом максимальной среднemasсовой скорости горючей смеси и условий компоновки вихревого модуля с основной горелкой. Оптимальные длины труб ВЗСМ при шероховатости $\bar{\Delta} = 0,12 \dots 0,44\%$ и конструктивном параметре закручивающего устройства $\Phi_{*вх.к} = 4,2 \dots 14,2$ составляют $L_{mp} / d_{mp} = 10 \dots 50$.

При проведении общего теплового расчета определяются основные технические характеристики и физико-химические свойства топлива, смеси топлива с воздухом

заданного состава и продуктов сгорания, а также средняя температура факела в зависимости от принятого коэффициента избытка воздуха. В соответствии с тепловой теорией зажигания мощность ВЗСМ принимается: для розжига равной 1%, от мощности основной горелки, а для стабилизации – 3...10%. Для заданных величин тепловой мощности ВЗСМ и теплоты сгорания горючего газа определяется требуемый его массовый расход. Для принятого коэффициента избытка воздуха $\alpha=1$ рассчитывается массовый расход воздуха. Среднее значение эффективной температуры факела уточняется последовательными приближениями. Геометрические параметры ВЗСМ определяются по найденным расходным и тепловым характеристикам. Достоверность разработанной методики подтверждается удовлетворительным согласованием расчетных геометрических параметров и средней температуры в факеле с экспериментальными характеристиками моделей ВЗСМ, а также действующими конструкциями ВЗГУ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Создан уникальный лабораторный стенд для экспериментального исследования рабочих характеристик ВЗСМ, оснащенный необходимыми датчиками и измерительной аппаратурой, позволяющий осуществлять отработку новых перспективных конструкций вихревых модулей различного назначения с длиной трубы от 0,15 до 3 м.

2. Разработаны научно-обоснованные физические модели ВЗСМ, применение которых позволяет осуществлять необходимый спектр экспериментальных исследований с варьированием геометрических параметров этих моделей в достаточно широком диапазоне, что важно для инженерной практики ($\Phi_{*_{вх.к}}=4,2...14,2$; $L_{mp}/d_{mp}=10...50$).

3. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден вихревой способ передачи пламени (ВСПП) в трубах ВЗСМ, использование которого не только позволяет улучшить рабочие характеристики запальных и дежурных горелочных устройств камер сгорания (КС) и топок котлов турбоустановок, но также открывает широкие возможности использования его в практической инженерной деятельности при создании высокоэффективных технических устройств различного назначения.

4. Получено аналитическое выражение зависимости интенсивности закрутки потока $\Phi_{*_{вх}}=1,6...3,8$ от конструктивного параметра закручивающего устройства $\Phi_{*_{вх.к}}$ с расположением тангенциального входа посередине его вихревой камеры, которое является важным не только для создания методики расчета ВЗСМ, но и для решения практически важной задачи разработки пламеперебрасывающих патрубков КС.

5. На основании обобщения экспериментальных данных получена важная для практики аналитическая зависимость, позволяющая определять относительный диаметр приосевого возвратного тока $\bar{d}_{o.m}=0,15...0,5$ в трубе ВЗСМ, с учетом местного сужения выходного сечения завихрителя $\bar{F}_{кон}=0,25...1$ и начальной интенсивности закрутки потока $\Phi_{*_{вх}}$.

6. Разработанная математическая модель изменения интенсивности закрутки потока вдоль трубы с учетом ее длины, шероховатости внутренней стенки и начальной

интенсивности закрутки позволяет определять расчетным путем в инженерной практике интегральные характеристики закрученного потока в произвольных сечениях вихревых модулей, используемых в различных теплообменных устройствах.

7. Определены, важные для практического использования, тепловые характеристики ВЗСМ на основных режимах горения: аналитическая зависимость длины факела от коэффициента избытка воздуха $\alpha = 0,7 \dots 1,05$ и интенсивности закрутки потока на выходе из вихревой трубы $\Phi_{*вых} = 1,3 \dots 3,8$; характеристика устойчивости факела ВЗСМ и диапазон его рабочего регулирования по расходу газа, составляющий 1:5.

8. Определены оптимальные параметры начальной интенсивности закрутки потока с учетом шероховатости внутренней стенки вихревой трубы, коэффициента избытка воздуха, величины относительного конфузорного сужения, давлений воздуха и газа, обеспечивающие высокую надежность ВЗСМ, которая подтверждена длительной их эксплуатацией в составе газотурбинных установок типа ГТ-100, ГТЭ-150 и ГТЭ-65, а также на котлах типа ТГМ и ПТВМ.

9. Разработана математическая модель работоспособной длины трубы ВЗСМ на основе аналитического обобщения результатов комплексных исследований его аэродинамических и тепловых характеристик, что является важным для выполнения проектировочных расчетов ВЗСМ.

10. Впервые разработана методика инженерно-проектировочного расчета ВЗСМ и осуществлена ее компьютерная реализация, позволяющая оперативно осуществлять оптимизацию конструкции вихревого модуля с требуемой длиной свободного факела для заданных условий эксплуатации на этапе проектирования турбоустановок.

11. Разработаны рекомендации по использованию ВЗСМ в камерах сгорания и топках котлов турбоустановок для инженерной практики.

**Основные положения исследований отражены в следующих публикациях:
в рецензируемых журналах, входящих в реестр ВАК РФ:**

1. *Толмачев В.В., Богов И.А.* Экспериментальные исследования вихревого запально-стабилизирующего горелочного модуля для турбоустановок//Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2012. – Т.1. – №2. – с.85-94.

2. *Толмачев В.В., Богов И.А., Вохмянин С.М.* Методика проектировочного расчета вихревого запально-стабилизирующего модуля турбоустановок//Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2012. – Т.2. – №2. – с.176-180.

в других изданиях:

3. *Толмачев В.В., Смирнов А.А., Безухов А.П.* Совершенствование устройств воспламенения топлива в энергоустановках//Тезисы докладов X Всероссийской межвузовской научно-технической конференции. Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели. – М.: Изд-во ГПНТБ. – 1996. – с.135-136.

4. *Щенников К.А., Толмачев В.В., Глушанов В.К.* Вихревая горелка для технологического нагрева (ВГН) крепежных элементов и ступиц муфт при ремонте и модер-

низации энергетического оборудования//Современное энергомашиностроение. Респ. межвед. науч.-техн. сб. – СПб.: Изд-во «Инструмент». – 1997. – с.51-54.

5. *Асосков В.А., Денежкин Л.М., Смирнов А.А., Толмачев В.В.* Разработка конструкций малотоксичных камер сгорания для энергетических ГТУ//Тезисы докладов XLIV научно-технической сессии по проблемам газовых турбин.–М.: Изд-во РАН.–1997. – с.43-45.

6. *Толмачев В.В.* Сравнительный анализ газовых запальных устройств конструкции ЛМЗ и ПИМаш. Современное машиностроение: Сб. тр. мол. учен. – Вып.1 (Под общ. ред. М.А. Мартынова). – Санкт-Петербургский институт машиностроения. – 1999. – с.189-195.

7. *Елизаров В.С., Толмачев В.В.* Тарировочные характеристики пневмометрического датчика измерения полного и статического давления закрученного потока воздуха в физической модели вихревого запально-горелочного устройства (ВЗГУ)/Современное машиностроение: Сб. науч. тр. – Вып. 1. – СПб.: Изд. Санкт-Петербургского института машиностроения. – 2000. – с.42-51.

8. *Щенников К.А., Богов И.А., Толмачев В.В.* Электроискровые газовые запальные устройства. Современное турбостроение: Сб. науч. тр. Вып.3/ Под общ. ред. И.А. Богова – СПб.: МАН ВШ Санкт-Петербургское отделение. Санкт-Петербургский институт машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ). – 2000. – с.68-85.

9. *Смирнов А.А., Толмачев В.В.* Способы стабилизации процесса горения предварительно подготовленной обедненной топливовоздушной смеси в КС ГТУ. Современное турбостроение: Сб. науч. тр. Вып.3/ Под общ. ред. И.А. Богова. – СПб.: МАН ВШ Санкт-Петербургское отделение. Санкт-Петербургский институт машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ). – 2000. – с.68-85.

10. *Толмачев В.В.* Вихревой способ передачи и стабилизации фронта пламени для совершенствования электроискровых запальных устройств энергетических установок/Аэрокосмическая техника и высокие технологии. Материалы Всероссийской научно-технической конференции/Под ред. Ю.В. Соколкина и др. – Пермь: ПГТУ, 2002, с. 263.

11. *Толмачев В.В., Бодров И.С.* Кинематика потока в газовых запальных устройствах вихревого типа с тангенциальным генератором закрутки/Современное турбостроение: Материалы международной науч.-практ. конф./Под общ. ред. И.А. Богова. – СПб.: МАН ВШ Санкт-Петербургское отд-ние. Санкт-Петербургский институт машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ). – 2004. – с.74-76.

12. *Толмачев В.В., Смирнов А.А., Бодров И.С.* Влияние сужения выходного сечения вихревой камеры тангенциального генератора закрутки на кинематику потока в запальных устройствах вихревого типа / Современное турбостроение: Материалы международной науч. - практ. конф./Под общ. редак. И.А. Богова. – СПб.: МАН ВШ. Санкт-Петербургское отд-ние. Санкт-Петербургский институт машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ). – 2004. – с.77-79.

13. *Богов И.А., Бодров И.С., Толмачев В.В., Щенников К.А.* Экспериментальное исследование влияния системных факторов на надежность воспламенения факела электроискровых газовых запальных устройств энергетических турбоустановок//Энергетические машины и установки. – 2008. – №4. – с.15-22.