

УДК 536.24

## ТЕПЛОМАССОБМЕН И ГИДРОДИНАМИКА В ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКАХ

© 2021 г. А. И. Леонтьев<sup>1</sup>, \*, Ю. А. Кузма-Кичта<sup>2</sup>, \*\*,  
С. В. Веретенников<sup>3</sup>, \*\*\*, О. А. Евдокимов<sup>3</sup>, \*\*\*\*

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский энергетический институт, Москва, Россия

<sup>3</sup>Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева, г. Рыбинск, Россия

\*E-mail: nchmt@iht.mpei.ac.ru

\*\*E-mail: kuzma@itf.mpei.ac.ru

\*\*\*E-mail: serveret@yandex.ru

\*\*\*\*E-mail: yevdokimov\_oleg@mail.ru

Поступил в редакцию 13.11.2020 г.

После доработки 05.03.2021 г.

Принят к публикации 19.05.2021 г.

Представлен краткий обзор исследований российских и зарубежных ученых в области теплообмена в закрученных потоках, вихревого эффекта, закрученных и вихревых течений в элементах газотурбинной, аэрокосмической и энергетической техники, горения при закрутке потока, современных методов численного и экспериментального изучения закрученных потоков, поверхностных вихрегенераторов, теплообмена и гидродинамики на макро-, микро- и наномасштабах, результаты которых обсуждались в ходе седьмой конференции “Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках”.

DOI: 10.31857/S0040364421050124

### ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

1. Предыстория конференции
  2. Пленарные доклады
  3. Гидродинамика и теплоперенос в закрученных потоках
  4. Горение при закрутке потока
  5. Закрученные и вихревые течения в элементах газотурбинной, аэрокосмической и энергетической техники
  6. Вихревой эффект. Технологии и аппараты с использованием закрутки потока
  7. Современные методы численного и экспериментального изучения закрученных потоков
  8. Теплообмен и гидродинамика на макро-, микро- и наномасштабах
- Заключение  
Список литературы

### ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные практические приложения закрученных течений используются в различных отраслях энергетики, аэрокосмической, машиностроительной и нефтегазовой промышленности. Данный вид течения представляет собой весьма важный раздел современной теплофизики, гид-

ро- и аэродинамики, механики жидкости и газа, а также природных явлений, наблюдаемых в атмосфере и водных просторах океанов и морей. Они выполняют чрезвычайно важную роль в процессах горения, интенсифицируя их и увеличивая полноту сгорания с соответствующим снижением загрязняющих окружающую среду выбросов. Сложность структуры закрученных течений и протекающих в них процессов требует использования самых разнообразных способов постановки научного исследования: от визуализации явлений до проведения подробных экспериментов; от простейших теоретических расчетов до детального численного моделирования турбулентности, многофазности и химической кинетики. Результаты таких исследований не должны быть достоянием отдельных научных школ и исследовательских лабораторий, а оценка достоверности и практической полезности нуждается в обсуждении на различных симпозиумах и конференциях с привлечением как известных ученых, так и ведущих специалистов промышленных предприятий. Ценность публичной дискуссии и обмена мнениями состоит в том, что достигнутые результаты становятся достоянием широкого круга ученых и специалистов, позволяя реализовать заметный прогресс в изучении и объяснении сложных теплофизических

и гидрогазодинамических процессов в течениях с закруткой потока.

Отмеченные факторы определяют целесообразность проведения периодических научных мероприятий, одним из главных среди которых является отечественная конференция “Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках”. Проведение данной конференции позволяет вести непрерывный научный диалог относительно современных эмпирических и теоретических вызовов, основанных на интенсивном развитии материально-технической базы и вычислительных возможностей, появлении новых экспериментальных и расчетных подходов. Существенным моментом является и необходимость обсуждения принципиально новых задач теплофизики, в частности применения вихреразрешающих методов, бесконтактных экспериментальных измерений, а также верификации полученных результатов.

## 1. ПРЕДЫСТОРИЯ КОНФЕРЕНЦИИ

История отечественных конференций, связанных с закруткой потока, ведет свое начало с цикла Всесоюзных научно-технических конференций “Вихревой эффект и его применение в технике”, проводившихся в Куйбышеве (Самаре) с 1971 по 1993 г. Идея обмена мнениями и контактов специалистов, занимающихся исследованием закрученных потоков, была с энтузиазмом встречена научной общественностью постсоветской России и подхвачена членом-корреспондентом РАН Ю.В. Полежаевым, предложившим организовать первую Российскую конференцию “Закрутка потока для повышения эффективности теплообменников” в Москве в Институте высоких температур РАН с 9 по 11 апреля 2002 г. Всего на конференции ведущими российскими коллективами было представлено 23 доклада.

На второй Российской конференции “Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках”, которая проходила 15–17 марта 2005 г. в Московском энергетическом институте (технический университет) и была посвящена его 75-летию, представлено уже около 100 докладов. На третьей и четвертой международных конференциях, проведенных в МЭИ в 2008 и 2011 гг., работало шесть секций и было представлено 120 и 150 докладов соответственно. С лекциями выступили ведущие мировые ученые: А.Е. Bergles (США), John R. Lloyd (США), В.И. Терехов (Россия), D.V. Spalding (Великобритания), N. Syred (Великобритания), А.А. Халатов (Украина), Е.Д. Федорович (Россия) и др.

Конференции 2015 и 2017 г. прошли в Казани (КНИТУ-КАИ) и Новосибирске (ИТ СО РАН). Наряду с известными российскими и зарубежными учеными свои доклады представили многие молодые специалисты. Седьмая конференция “Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках” проведена с 16 по 18 октября 2019 г. в г. Ры-

бинске на базе РГАТУ им. П.А. Соловьева. В рамках мероприятия обсуждался ряд фундаментальных научных проблем, включающих:

- теоретическое и экспериментальное исследование закономерностей протекания процессов тепло- и массопереноса в закрученных и вихревых потоках однофазных и многофазных сред, в том числе при наличии химических реакций и фазовых превращений;

- теоретическое, численное и экспериментальное исследование вихревого эффекта и возможности его применения для создания эффективных технических устройств;

- интенсификацию процессов смесеобразования, повышение устойчивости и экологических характеристик процессов сжигания различных видов топлива в закрученных потоках;

- разработку новых и совершенствование существующих методов экспериментального исследования и численного моделирования закрученных и вихревых течений различной природы;

- изучение динамики и свойств крупномасштабных вихревых структур в ограниченных и струйных закрученных потоках;

- исследование характеристик закрученных и вихревых течений на микро- и наномасштабах;

- применение характерных особенностей закрученных течений для интенсификации процессов теплообмена и горения в высокоэффективных технических устройствах различных отраслей: двигателестроительной, аэрокосмической, энергетической, нефтегазовой, химической и др.

Столь разнообразная тематика исследований закрученных течений дала возможность сформировать в процессе проведения конференции шесть отдельных научных секций. Формат конференции исключал стендовые демонстрации работ, что позволило дать возможность устного выступления всем заявленным участникам. Всего в конференции приняло участие порядка 250 ученых и специалистов, сделавших более 100 устных докладов (рис. 1).



Рис. 1. Участники Седьмой конференции “Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках”, г. Рыбинск.

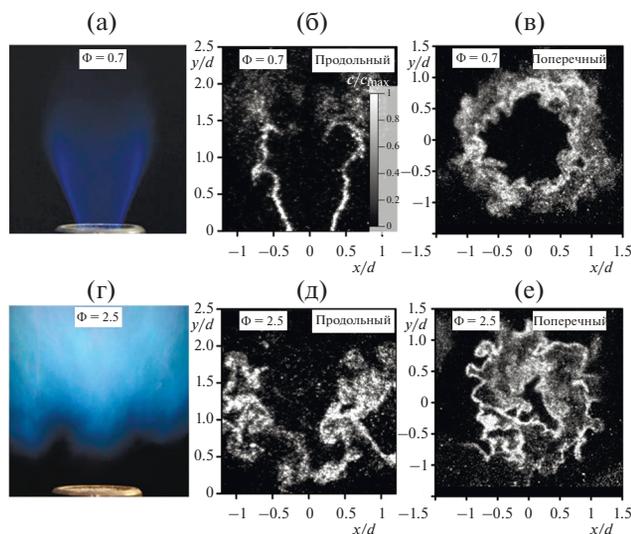


Рис. 2. Фотографии пламени (а), (г) и примеры изображений НСНО PLIF для продольной (б), (д) и поперечной ( $y/d = 1.5$ ) (в), (е) плоскостей для  $\Phi = 0.7$  (а)–(в) и  $\Phi = 2.5$  (г)–(е).

## 2. ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

С приветственным словом на открытии конференции выступил академик РАН А.И. Леонтьев, высказавший оригинальную и точную мысль: “Мы — ученые, словно бурлаки на Волге, все вместе тащим баржу науки к новым достижениям и открытиям”. Эта метафора одновременно отдает дань как истории Рыбинска, ставшего в XIX в. столицей бурлачества, так и его современной жизни в качестве одного из признанных центров российской и мирового газотурбостроения и изучения закрученных потоков. Настоящая конференция объединяет ученых самой различной специализации — начиная с изучающих вихревой эффект и его приложения, исследователей высокоэффективных интенсификаторов теплообмена различного назначения и масштаба и заканчивая созданием самого современного расчетного и экспериментального инструментария.

Нельзя не отметить, что проводимые в настоящее время в России исследования закрученных течений имеют достаточно широкую проблематику: от классических задач теоретического описания и экспериментального исследования теплообмена и гидродинамики в ограниченных, струйных, двухфазных закрученных потоках до проблем интенсификации процессов, протекающих в сложных технических устройствах и энергетических установках. Перспективным направлением является исследование процессов горения газового топлива в закрученных потоках с высоким пространственным и временным разрешением, результаты которых важны для более глубокого понимания условий возникновения термо-

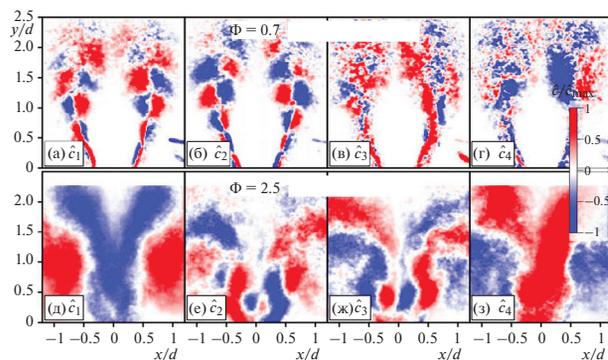


Рис. 3. Осредненные по фазе данные PLIF основаны на временных коэффициентах режимов PIV-данных POD: (а)–(г) —  $\Phi = 0.7$ , (д)–(з) —  $\Phi = 2.5$  [1].

акустических пульсаций в камерах сгорания газотурбинных установок.

Результаты оптических измерений когерентных структур в закрученной струе с распадом вихря и горением были представлены на пленарных докладах [1, 2]. Рассмотрены две конфигурации горения закрученной пропано-воздушной смеси: бедной предварительно перемешанной смеси и богатой предварительно частично перемешанной смеси. Деформации фронта пламени визуализируются с помощью лазерно-индуцированной флуоресценции (PLIF) НСНО. Мгновенные поля скоростей измеряются с помощью метода PIV. Для извлечения когерентных структур из наборов данных они обрабатываются методом proper orthogonal decomposition (POD). Мгновенные снимки PLIF (рис. 2) показали, что фронты пламени сильно искривлены турбулентными флуктуациями. Анализ POD наборов как PIV-, так и PLIF-данных выявил режимы крупномасштабных деформаций зоны реакции (рис. 3). Установлено, что эти режимы обусловлены двумя различными типами гидродинамической неустойчивости течения. Одним из них является центробежная неустойчивость закрученной струи, приводящая к разрушению вихревого ядра и образованию вторичных крупномасштабных спиральных вихревых структур. Другой режим соответствует крупномасштабным продольным флуктуациям скорости, вызванным колебаниями восходящих потоков продуктов сгорания вследствие естественной конвекции.

На пленарной секции рассматривались вопросы вычислительной гидродинамики (CFD). Профессор К. Hanjalic анализировал проблему выбора оптимального вычислительного подхода, рассматривая прямое численное моделирование (DNS) и вихреразрешающие методы (DES, LES), а также осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS) и смешанные (гибридные) методы [3]. При анализе отрывных, закрученных и вращающихся потоков при высоких числах Рейнольдса и в каналах сложной геометрии хорошо

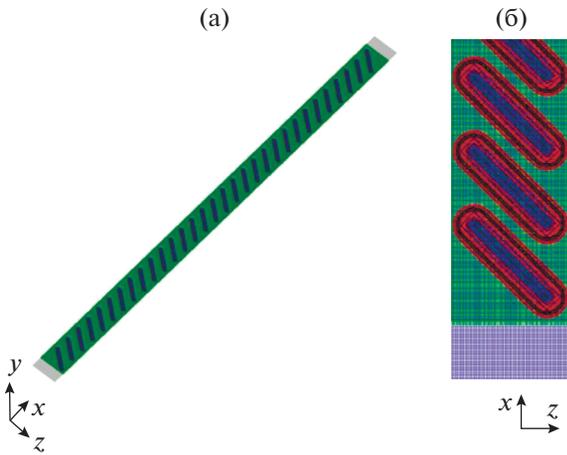


Рис. 4. Сегмент канала с углублениями: вид без верхней стенки (а), многоблочная расчетная сетка (б).

разрешающие структуру течения DNS/LES-методы практически неосуществимы или являются слишком затратными. В таких случаях RANS и гибридные методы RANS/LES, несмотря на их все еще спорное физическое обоснование, часто остаются единственным выбором исследователей, позволяющим использовать доступную вычислительную сетку. Такие потоки встречаются во множестве технических приложений, например в камерах сгорания и горелках, турбомашин, циклонных сепараторах, крупных трубопроводных системах.

Поскольку ключевым вопросом в таких случаях является выбор оптимальной RANS-модели, в ходе доклада при рассмотрении ряда примеров показано, что наиболее широко распространенные линейные модели с вихревой вязкостью (LEVM,  $k-e$ ,  $k-w$  и их производные), независимо от различных специальных средств, адаптированных для конкретных потоков, обычно не отражают характерных особенностей таких потоков и их динамики. Напротив, нелинейные модели второго порядка (дифференциальные модели напряжений Рейнольдса, RSM) или основанные на них алгебраические вариации в большинстве случаев превосходят более простые модели. Хотя в вычислительном отношении модели более высокого порядка более требовательны, их более высокая чувствительность оказалась особенно полезной при вычислении потоков, в которых доминируют крупномасштабные нестационарные вихревые системы.

Один из пленарных докладов [4, 5] был посвящен исследованиям, связанным с характеристиками теплообмена в радиальном зазоре лопаток турбины. Особый интерес представляет влияние трансзвуковых течений на теплоотдачу у торцевой поверхности лопатки и аэродинамические потери в зазоре, в том числе развитие и влияние вихрей в зоне радиального зазора. Сопут-

ствующие исследования показывают, что при различной геометрии концевых частей лопаток и различных методах охлаждения наблюдается совершенно разное поведение потока. Образовавшийся в перетекающем через радиальный зазор потоке вихрь увеличивается с ростом величины зазора, при этом более крупные вихри в области концевой части лопатки приводят к большим потерям полного давления.

Профессор Н.В. Корнев [6] в рамках своего доклада рассмотрел новый численный метод моделирования турбулентных потоков, основанный на комбинации сеточного и бессеточного метода вихревых частиц. Предложено расщепление уравнений Навье–Стокса по масштабам, описывающих движение крупномасштабных и мелкомасштабных структур с учетом их взаимодействия. Выполнена верификация и валидация для ряда тестовых примеров турбулентных течений, включая свободную затухающую турбулентность в периодическом кубе, свободную струю и течение в канале.

Еще одним направлением исследований являются поверхностные вихрегенераторы, которые зарекомендовали себя как эффективные инструменты интенсификации теплообмена. Среди них особый интерес вызывают пакеты лунок-ямов, для которых характерно превышение темпа роста теплоотдачи над увеличением гидравлических потерь. В работах [7–9] численно моделируется усиление теплопередачи в пространстве воздушного конденсатора за счет использования пакета встроенных овально-траншейных углублений, наклоненных под углом  $45^\circ$  к набегающему потоку при  $Re = 6000$ . Рассматривается узкий участок канала с 31 однорядной овально-траншейной лункой (рис. 4). Глубина лунок изменяется от 0 до 0.2. Гидравлические потери не превышают 70% при увеличении теплопередачи в 2.4 раза по сравнению с плоскопараллельным каналом.

Несмотря на бурное развитие центров по исследованию вихревого эффекта, широкого внедрения в технику и производство он не получил, но, тем не менее, продолжает интересовать ученых всего мира с позиций его применения для интенсификации теплофизических процессов. Области его практического применения достаточно обширны: от проблем криогеники до интенсификации теплофизических процессов термостатирования, осушки, горения и др. Если в вопросах технического применения наблюдаются успешно развиваемые инновационные наработки, то в проблеме теоретического описания можно отметить лишь застой с попытками реанимации давно апробированных и относительно некорректных подходов, предложением гипотетических объяснений явлений при отсутствии их обоснования с позиций философии научного подхода. Один из пленарных докладов конференции [10, 11] содержал краткий исторический обзор развития вихревого эффекта в Советском Союзе и в современной России. Изложены фунда-

ментальные проблемы теоретического описания физической сути явления энергоразделения с историческим анализом от Ранка до настоящего времени. Подтверждена целесообразность подхода на основе гипотезы взаимодействия вихрей с генерацией вторичных вихревых структур.

Исследования закрученных потоков с фазовыми превращениями сфокусированы на применении интенсификаторов теплообмена на макро-, микро- и наномасштабах для повышения критических тепловых нагрузок и увеличения теплосъема с поверхности. В докладе [12] представлены экспериментальные данные для критической тепловой нагрузки при кипении воды в трубе со скрученной лентой, рассмотрен кризис теплообмена при кипении водных растворов и наножидкостей, предложен способ формирования спиральных траншей в слое наночастиц.

Несмотря на то, что проблема тепломассопереноса в отрывных течениях за обратным уступом к настоящему времени стала классической, интерес к ней не ослабевает в силу недостаточно полной изученности трехмерного поля течения и сложного теплообмена. Важной причиной, стимулирующей развитие данного направления науки, является поиск методов управления теплообменом в отрывных потоках. Профессором В.И. Тереховым [13, 14] представлены краткий обзор современного состояния исследований по данной тематике в РФ и в мире и результаты численного моделирования газокапельных отрывных течений за обратным расширением трубы, полученные в ИТ СО РАН за последние 10 лет. Рассмотрена задача о динамике двухфазного газокапельного отрывного турбулентного потока при наличии теплообмена со стенками канала. При решении используются RANS-уравнения, записанные с учетом обратного влияния частиц на процессы переноса в газе. Показана применимость использования эйлерова подхода для описания динамики и тепломассопереноса в газокапельных течениях за обратным уступом и после внезапного расширения трубы при наличии испарения дисперсной фазы. Исследовано влияние изменения основных параметров двухфазного потока, таких как концентрация капель, их начальный размер, скорость газокапельного течения и плотность теплового потока на стенке трубы, на структуру течения турбулентность и теплоперенос.

Одним из перспективных направлений развития энергетических установок является применение микроструктурных аппаратов с рекордной удельной поверхностью, позволяющих значительно интенсифицировать процессы тепломассообмена. Отсутствие надежных методов расчета структурных насадок с закруткой потока и микроструктурированных рабочих поверхностей в значительной степени сдерживает разработку энергетических установок для водородной и малой распределенной энергетики и обусловлено слабо изученной взаи-

мосвязью процессов на микро- и макромасштабах. Профессором В.В. Кузнецовым представлены результаты физического и математического моделирования многомасштабной структуры течений и тепломассообмена при фазовых и химических превращениях в микроструктурных аппаратах различного применения, высокоинтенсивных системах охлаждения на основе микроканалов, реакторов-теплообменников водородной энергетики и аппаратов получения синтетического жидкого топлива [15].

Отдельно следует выделить несколько направлений теплофизических исследований в области повышения эффективности и надежности судовых ядерных энергетических установок. Среди них особую актуальность имеют работы О.В. Митрофановой [16]: влияние закрутки потока и вихревой структуризации течений в сложных каналах многоконтурной циркуляции теплоносителя и рабочих сред на безопасность и надежность работы транспортных ядерных энергетических установок (ЯЭУ); устранение эффекта снижения теплогидравлической эффективности ЯЭУ при повышении мощности ядерного реактора; исследование механизмов генерации акустических колебаний в теплогидравлическом контуре и других системах ЯЭУ, что, в частности, связано с необходимостью разработки конструкторских решений, направленных на подавление виброшумовых эффектов.

### 3. ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОС В ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКАХ

Представлены результаты численного и экспериментального исследования трехмерного течения в модели трансплантата бедренной артерии со спиральным гребнем на стенке [17]. Интенсивность закрутки потока, образующегося в трансплантате, соответствует типичному значению, имеющему место в здоровых артериях. Модели течения, полученные для спирально-гребневого трансплантата, сравниваются со случаем течения в трансплантате без гребня (рис. 5). Выявлено, что в случае закрученного течения сдвиговые напряжения в зоне шва значительно выше, а колебательный сдвиг ниже, чем в стандартном трансплантате без спирального гребня. Обнаруженные вихревые изменения характеристик потока могут привести к значительному снижению скорости окклюзии трансплантата.

С точки зрения управления параметрами струйных течений в различных технических устройствах перспективными объектами исследований являются когерентные структуры, формирующиеся в закрученных турбулентных струях. С этим связан большой интерес к проблемам теоретического и экспериментального изучения таких явлений, как распад вихря в закрученной кольцевой струе, неустойчивость, прецессия вихревого ядра, переза-

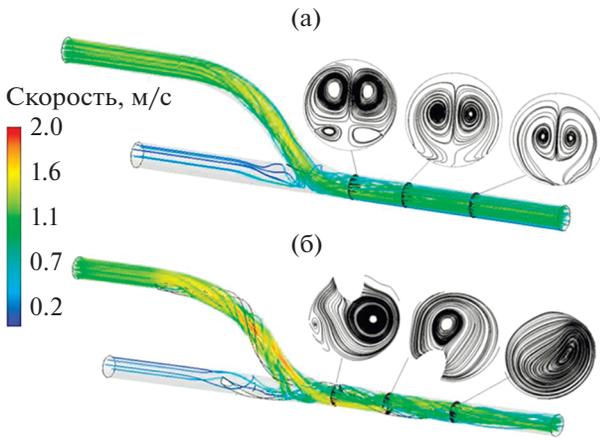


Рис. 5. Линии тока, вычисленные для трансплантата без спирального гребня (а), и (б) для трансплантата со спиральным гребнем [17].

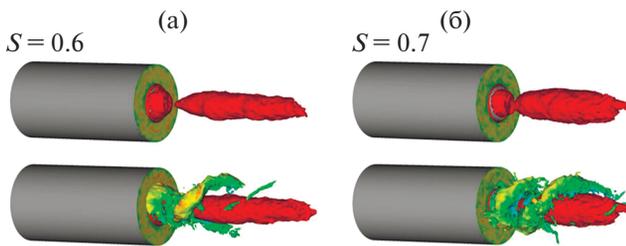


Рис. 6. Вид в ближнем поле для  $S = 0.6$  (а) и  $S = 0.7$  (б); красная изоповерхность — нулевые значения осевой скорости, осредненной по времени; спиральная когерентная структура идентифицируется изоповерхности мгновенного давления [18].

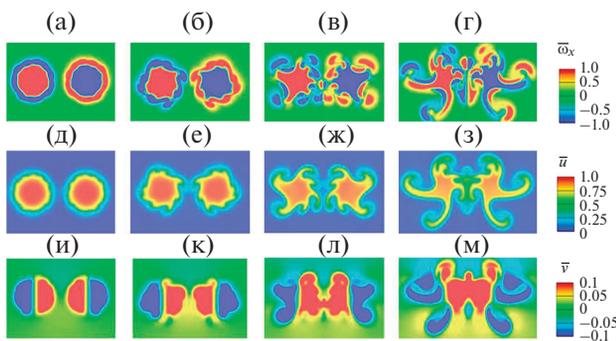


Рис. 7. Осредненные по времени поля продольной завихренности (а)–(г), продольной скорости (д)–(з) и вертикальной скорости (и)–(м) в различных сечениях области ламинарного течения: (а), (д), (и) —  $x = 1$ ; (б), (е), (к) —  $x = 2$ ; (в), (ж), (л) —  $x = 3$ ; (г), (з), (м) —  $x = 4$  [19].

мыкание и отрыв вихревых колец, формирование концентрированных воздушных вихрей в потоках с винтовой спиральностью.

В [18] выполнено LES моделирование кольцевой закрученной турбулентной струи с высокими зна-

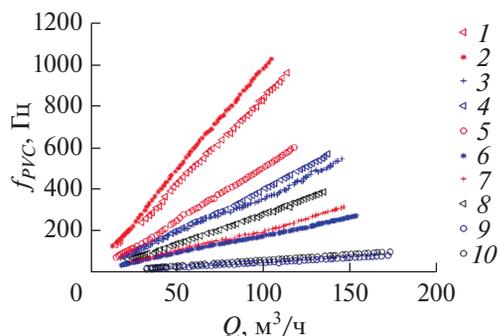
чениями параметра закрутки  $S = 0.6$  и  $0.7$ , соответствующими конечной стадии распада вихря, т.е. когда две рециркуляционные зоны разделяются и окончательно сливаются. Число Рейнольдса, основанное на среднерасходной скорости и наружном диаметре трубы, равно 8900, а отношение наружного диаметра к внутреннему равно 2. Наблюдаются интенсивные спиральные когерентные вихревые структуры, сопровождающие этот процесс (рис. 6).

В [19, 20] исследовано поле завихренности в двух параллельных встречно закрученных затопленных струях вязкой несжимаемой жидкости в ламинарном и турбулентном режимах (рис. 7). В [19] показаны различные механизмы взаимодействия продольных вихрей в ламинарном и турбулентном потоках. Такими механизмами являются диффузия и аннигиляция завихренности в ламинарных струях и неустойчивость Кельвина–Гельмгольца в турбулентных. Дальнее поле продольной завихренности — это квадруполь в ламинарных струях, в турбулентном потоке оно не имеет четкой структуры (рис. 7). Описан механизм генерации квадрупольного продольного поля завихренности при слиянии двух ламинарных струй в одну. Получено аналитическое выражение для дальнего поля продольной завихренности. Проведено прямое численное моделирование взаимодействия двух турбулентных струй.

Влияние вязкости на распространение волн в закрученных струях описано в [21]. Закрученная струя моделируется цилиндрическим профилем осевой скорости с постоянной осевой завихренностью в невозмущенном состоянии. Струя окружена вращающейся без завихрений невязкой несжимаемой жидкостью (т.е. потенциальным потоком). Асимптотическое решение задачи об осесимметричном вихре, порождаемом вращающимся бесконечно протяженным круговым цилиндром, в вязком теплопроводном идеальном газе для случая больших чисел Рейнольдса приведено в [22, 23]. Объясняется немонотонное поведение циркуляции по расстоянию от центра вихря. Выявлен ряд условий, гарантирующих, что циркуляция выше, чем в случае несжимаемой жидкости. Изучено влияние числа Маха на решение задачи.

В [24] представлено полуаналитическое решение задачи о затухании закрутки ламинарного потока в кольцевом канале с постоянным значением радиальной скорости на входе. Установлено, что наиболее медленные процессы распада вихревых структур при ламинарном вязком течении описываются экспоненциальной функцией.

Частотная характеристика закрученного потока за осевым завихрителем изучена в [25, 26]. Рассматривается распад вихря, приводящий к образованию прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ). Исследовано влияние интенсивности закрутки и степени сужения сопла на частотную характеристику ПВЯ (рис. 8). Режимы с ПВЯ определялись с по-

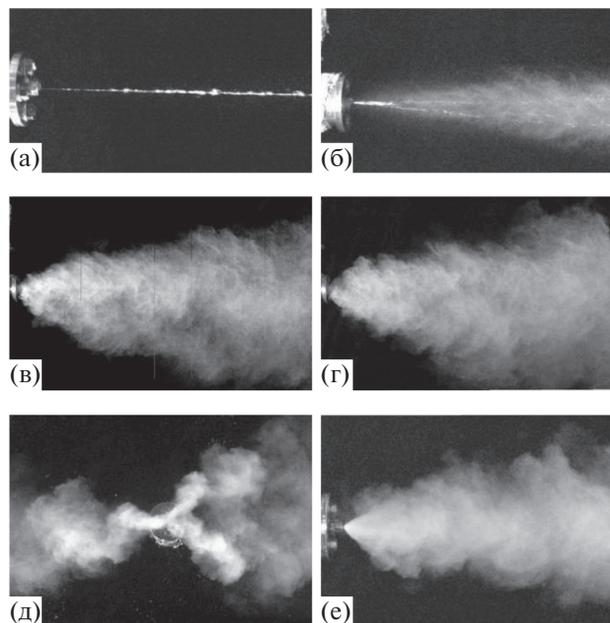


**Рис. 8.** Зависимость частоты ПВЯ от расхода: 1 —  $D_c = 30$  мм,  $S_g = 0.9$ ; 2 — 30, 1.2; 3 — 40, 0.6; 4 — 40, 0.9; 5 — 40, 1.2; 6 — 52, 0.6; 7 — 52, 0.9; 8 — 30, 1.2; 9 — 76, 0.3; 10 — 76, 0.6.

мощью двух микрофонов. Число Струхали линейно зависит от параметра закрутки и слабо от числа Рейнольдса. Частотные характеристики закрученных потоков с ПВЯ обобщены эмпирической зависимостью числа Струхала от модифицированного геометрического параметра закрутки для класса осевых лопастных завихрителей, которые наиболее широко применяются в машиностроении.

В работе [27] предлагается использовать винтовую систему координат для численного моделирования вязкого течения в канале со спиральными ребрами. Проанализировано влияние четырех видов ребер на структуру течения. Численные результаты течения жидкости в канале со спиральными ребрами показали, что наибольшая интенсивность перемешивания слоев жидкости наблюдается при попарно различающихся по высоте ребрах. Зависимости коэффициента трения Дарси от числа Рейнольдса для высоты ребер в диапазоне от  $0.2R$  до  $0.6R$  показали, что наибольшее увеличение гидравлического сопротивления происходит в диапазоне чисел Рейнольдса до 400. Чем выше высота ребер, тем больше разница между значениями гидравлического сопротивления для  $S/D = 3$ ,  $S/D = 4$ ,  $S/D = 5$ .

Исследования критических режимов истечения и взрывного вскипания в закрученных потоках перегретой жидкости [28, 29] связаны как с проблемой безопасности элементов энергетического оборудования, так и с широкой сферой применения закрутки потока в различных технологических процессах, в частности в процессах с горением. В [28] проведено экспериментальное исследование эволюции струи вскипающей воды и этанола с увеличением уровня перегрева в потоке для нескольких окружных скоростей потока (рис. 9). Выявлена степень влияния скорости вращения при различных степенях перегрева (низкой, высокой и достижимой) на распыл. Установлена решающая роль закрутки потока в условиях низких перегревов. При высоких и достижимых перегревах влияние интенсивного кипения на распыливание становится решающим.



**Рис. 9.** Сравнение форм горячих струй этанола при различных температурах в отсутствие (а), (в), (д) и при наличии предварительной частоты вращения 1800 об./мин (б), (г), (е): (а), (б) —  $T = 400$  К; (в), (г) — 440 К; (д), (е) — 470 К [28].

Полного разрушения струи, которое наблюдается при отсутствии или при малых скоростях вращения, не происходит в условиях высокоинтенсивной закрутки. Флуктуации обнаружены в прецессирующей струе при малых перегревах жидкостей.

#### 4. ГОРЕНИЕ ПРИ ЗАКРУТКЕ ПОТОКА

Применение отрывных и закрученных течений для интенсификации процессов переноса в различных областях техники, например при стабилизации процесса горения в топках, для сепарации частиц в циклонных аппаратах, в пылеугольных горелках, системы распыла жидкого топлива и др., стимулировало накопление обширного научного материала по различным аспектам однофазных отрывных и закрученных потоков.

В докладе [30] представлены основные закономерности физико-химических процессов при сжигании природного газа, сырой нефти и дизельного топлива в стесненных условиях мало-мощного жаротрубного котла и определено влияние нагрузки котла на эксплуатационные характеристики. По результатам расчетных исследований предложена новая конструкция комбинированных низкоэмиссионных горелок ступенчатого горения. Определены их оптимальные геометрические характеристики, обеспечивающие наилучшие условия протекания процессов горения и снижающие выход  $\text{NO}_x$  на 10–15%.

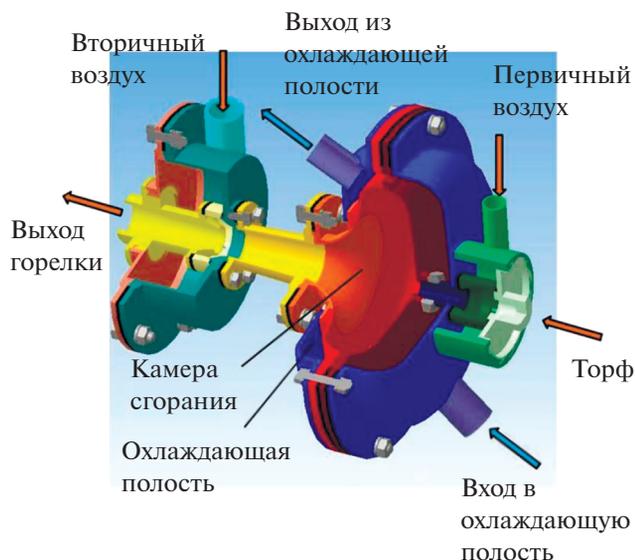


Рис. 10. Противоточное горелочное устройство [34, 35].

Представлены результаты [31, 32] промышленных испытаний котлов с использованием вихревой технологии сжигания твердого топлива, которые показали снижение выбросов оксидов азота в 3.5–4 раза, существенное уменьшение разрушения поверхности нагрева, повышение КПД котлов. Наличие двух смещенных противоположно направленных потоков создает крутящий момент, обеспечивающий многократную принудительную циркуляцию крупных и средних частиц топлива в нижней части топки. Нижняя вихревая зона увеличивает КПД объема сгорания и время пребывания топлива в камере сгорания, что позволяет более эффективно сжигать грубое топливо, вплоть до дробленого. Показано, что при использовании вихревой технологии сжигания зола имеет более мелкодисперсную зернистую текстуру, меньшую степень плавления, что обусловлено большим временем пребывания топлива в топках модернизированных котлов и эффективностью их выгорания. Получен более низкий уровень максимальной температуры в камерах сгорания и более низкое содержание тяжелых металлов в летучей золе.

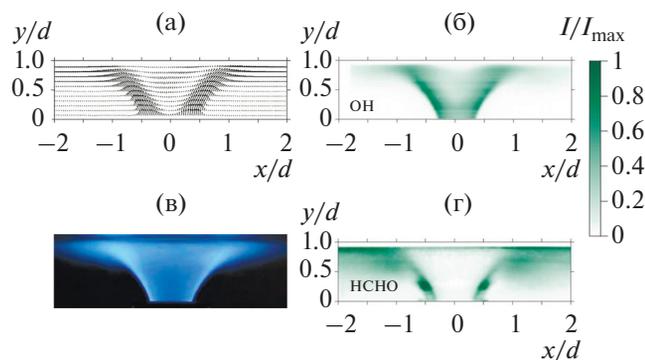
Вихревые горелочные устройства получили самое широкое распространение в настоящее время. Актуальной является разработка таких горелочных модулей, которые могли бы обеспечить сжигание нескольких видов топлива: твердого, жидкого и газообразного. Важным в этой связи является организация плавного перехода между различными видами топлива без снижения тепловой мощности горелки. Опыт исследования вихревых горелочных устройств показывает, что именно противоточные горелки имеют наибольший потенциал в плане организации многотопливного сжигания с высокими энергетическими и экологическими характеристиками.

Представлены результаты численного моделирования процесса горения торфяной пыли в прямоточной вихревой камере сгорания [33] и противоточной вихревой горелке (рис. 10) [34, 35]. Использование таких устройств обеспечивает высокую эффективность сгорания твердого топлива и низкий выброс загрязняющих веществ, но формирование высокотемпературных зон внутри камеры сгорания требует разработки надежной системы охлаждения.

Закрутка потока используется и для интенсификации массообмена в ближней области свободных и импактных реагирующих струй и обеспечения безносного горения в широких пределах отношения коэффициентов топливо–окислитель. Импактная струя с горением является одной из конфигураций горения вблизи твердой поверхности, которая реализуется при интенсивном нагреве объектов в процессе их термической обработки или плавлении. Однако структура потока импактных закрученных струй с горением изучена недостаточно. В работах [36, 37] представлены результаты экспериментального исследования структуры течения и когерентных структур в импактных струях с сильным завихрением и горением обедненной пропановоздушной смеси комбинированным применением ОН, НСНО PLIF и PIV. Коэффициент эквивалентности смеси составлял 0.7, число Рейнольдса струи – 5000. Для пламени обнаружено значительное увеличение интенсивности флуоресценции формальдегида и других органических соединений при возбуждении на длине волны 355 нм в пристеночной области на расстоянии трех калибров от сопла до поверхности (рис. 11). Предполагается, что этот эффект обусловлен охлаждением продуктов сгорания за счет теплообмена с поверхностью, понижением температуры внутри зоны рециркуляции и снижением полноты сгорания топлива.

Проблеме повышения качества смешения топливо–воздушных смесей в закрученном потоке уделяется большое число расчетных и экспериментальных работ. Процесс смешения играет существенную роль в формировании состава смеси в зоне рециркуляции, и знание основных зависимостей может быть весьма полезным при объяснении сложных процессов смесеобразования, стабилизации пламени и горения смеси, происходящих в первичной зоне камеры сгорания.

В работе [38] исследован изотермический закрученный поток на выходе из модельной горелки с радиально-лопастным завихрителем. Измерены распределения скорости при изменении угла наклона лопаток завихрителя и числа Рейнольдса. Рассмотрены различные определения интегрального параметра закрутки, в том числе их корреляции с геометрическим параметром закрутки и простым отношением максимальных скоростей в профиле. При  $S_p > 0.6$  эта корреляция перестает существовать и в потоке возникают центральная



**Рис. 11.** Среднее поле скоростей (а), распределение интенсивности флуоресценции в продольном сечении  $\text{OH}^*$  (б) и  $\text{HCHO}$  (в, г) фотография пламени ( $H/d = 1, S = 1$ ) [36].

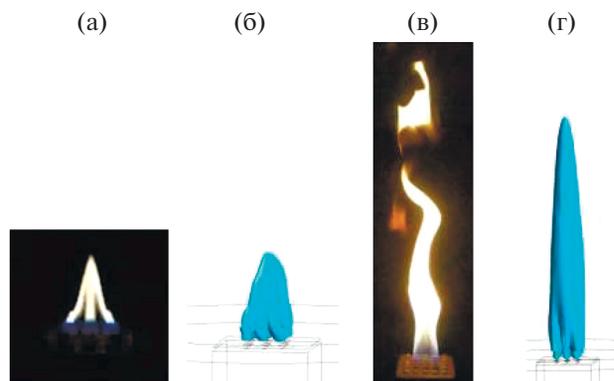
зона рециркуляции и прецессирующее вихревое ядро. Показано, что число Струхала имеет нелинейную зависимость от параметра закрутки.

Проведены экспериментальные исследования перемешивания потока за осевым завихрителем [39, 40]. Полученные результаты были сопоставлены с численными расчетами с использованием различных моделей турбулентности. Наилучшие качественные и количественные результаты при численном моделировании получены с использованием модели турбулентности DES в нестационарных расчетных условиях.

К рассмотренным фундаментальным проблемам можно отнести применение закрутки потока для снижения экологического воздействия угольных ТЭЦ и камер сгорания газотурбинных двигателей. Обсуждался [41–43] вклад коллективных эффектов в процесс горения системы диффузионных реагирующих струй с закруткой потока (рис. 12), влияние расстояния от сопла до импактной поверхности, числа Рейнольдса, коэффициента избытка топлива и степени закрутки потока на характерные режимы горения импактного закрученного пламени. Проведено обсуждение проблемы детального изучения зависимостей коэффициента смешения в закрученном потоке [39].

## 5. ЗАКРУЧЕННЫЕ И ВИХРЕВЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ ГАЗОТУРБИНОЙ, АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Обширный цикл научно-исследовательских работ, результаты которых докладывались на конференции, посвящен физическому и математическому моделированию структуры течения, тепло- и массообмена закрученных и вихревых потоков в элементах проточной части газотурбинной техники [44–46], камерах сгорания и отрывных диффузорах [47, 48], каналах систем охлаждения лопаток турбин [49, 50], теплообменников, в энергетическом обо-



**Рис. 12.** Сравнение фотографий пламени и изоповерхностей массовой доли  $\text{OH}$ : (а)  $\text{Re} = 124$ , эксперимент; (б) 124, расчет; (в) 610, эксперимент; (г) 610, расчет [41].

рудовании [51], динамике газожидкостных потоков, пленок и капель [52–54].

В докладе [55] представлены результаты исследования особенностей использования винтов с различными геометрическими параметрами (рис. 13) в качестве турбин плавучих и погружных микроГЭС методами оптической диагностики (PIV) и численного моделирования (LES). Изменение шага винта значительно влияет на структуру потока за винтовым ротором. Винтовой ротор с шагом винта, равным половине его длины, обладает хорошими энергетическими характеристиками и обеспечивает наилучшую гидродинамическую структуру течения.

В [45] исследована возможность активного воздействия закрученной периферийной струи на границу раздела до- и сверхзвуковых потоков, которая может изменять направление продуктов сгорания на выходе из сопла. Показано, что выдуваемая поверхностная пленка жидкости повышает эффективность охлаждения, которая ограничена величиной, определяемой соотношением Кутателадзе–Леонтьева для ламинарных режимов течения. Благодаря закрутке струи охладителя, испаряющиеся частицы жидкости в поле центробежных сил (как наиболее тяжелые компоненты в потоке) удерживаются вблизи ограничивающей стенки, а



**Рис. 13.** Фотографии винтовых роторов с различными геометрическими параметрами (а) и экспериментальной установки (б) [55].

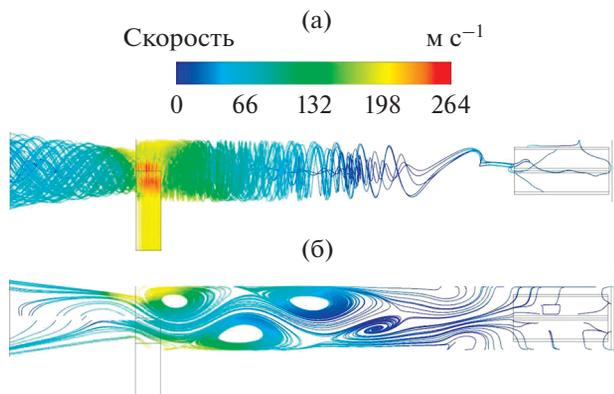


Рис. 14. Линии тока в вихревой трубе в ламинарном режиме работы [62].

не распространяются на весь слой смешения, как это имеет место в незакрученном потоке. Также закрученная струя способствует удержанию и меньшему испарению жидких пленок.

Исследовались аэродинамика и конвективный теплообмен в пристенной области потока в относительно длинных циклонных камерах [56, 57]. Для анализа характеристик теплообмена в пристенной зоне течения использовалась струйная модель закрученного потока. Течение на боковой поверхности рабочего объема представлялось в виде развитого турбулентного струйного течения, распространяющегося вдоль криволинейной стенки с постоянным радиусом продольной кривизны. Учитывается также влияние начального необогреваемого участка, в котором происходит закрутка потока. Получены уравнения для расчета толщины пограничного слоя и локальных коэффициентов теплоотдачи вдоль траектории течения.

## 6. ВИХРЕВОЙ ЭФФЕКТ. ТЕХНОЛОГИИ И АППАРАТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАКРУТКИ ПОТОКА

Относительно подробно затронуты наиболее характерные эффекты процесса с описанием технических приложений в направлении энергоразделения и повышения эффективности теплофизических процессов в различных технологиях и технических устройствах от охлаждения до горения.

Представлены результаты экспериментальных исследований вихревого эжектора [58, 59]. В частности, исследованы различные геометрические варианты вихревой камеры эжектора. Показано, что наиболее эффективной работе соответствует соотношение диаметров вихревой и смесительной камер, равное 2. Это обеспечивает самые высокие значения коэффициента эжекции и самые низкие значения относительного давления на пассивном сопле. Один из докладов [60, 61] посвящен исследованию влияния частичной за-



Рис. 15. Векторы скорости в поперечных сечениях вихревой трубы.

крутки активного потока на эффективность работы эжекторного устройства.

Несколько работ посвящено исследованию рабочего процесса вихревой трубы в ламинарном режиме течения на входе [62, 63]. Проанализировано влияние геометрических и режимных параметров на эффекты разделения энергии. Рассчитаны основные параметры потока и его структура (рис. 14). Выявлены предложенные причины переноса энергии в виде тепла от осевых газовых масс к периферийным.

Исследования интенсификации процессов теплопереноса в вихревой трубе представлены в докладах [64, 65]. Рассматривается вихревая труба с внутренними интенсификаторами в виде выпуклых и вогнутых полусфер. Показано, что по сравнению с гладкой камерой энергоразделения коридорное расположение выпуклых сферических интенсификаторов позволило в 1.5 раза увеличить коэффициент теплопередачи. Выполнен сопоставительный анализ особенностей температурной стратификации в вихревой трубе и трубе А.И. Леонтьева [65].

В докладе [66] приведены результаты нестационарного численного моделирования газодинамического течения в вихревой трубе Ранка—Хилша. Показано (рис. 15), что формирование спиральной структуры течения в вихревой трубе нестационарно и существует собственное вращение спирального вихря. Несмотря на то, что интенсивность этого вращения мала по сравнению с основным вращательным потоком, его вкладом в распределение термогазодинамических параметров в камере разделения энергии нельзя полностью пренебречь.

В [67] рассматривалось практическое применение вихревой трубы в качестве вихревого сепаратора-расширителя водяного пара для ПГУ с влажнопаровой трубиной. Численно исследованы различные варианты геометрии сепаратора, выбран оптимальный вариант с точки зрения массового расхода пара и степени сухости.

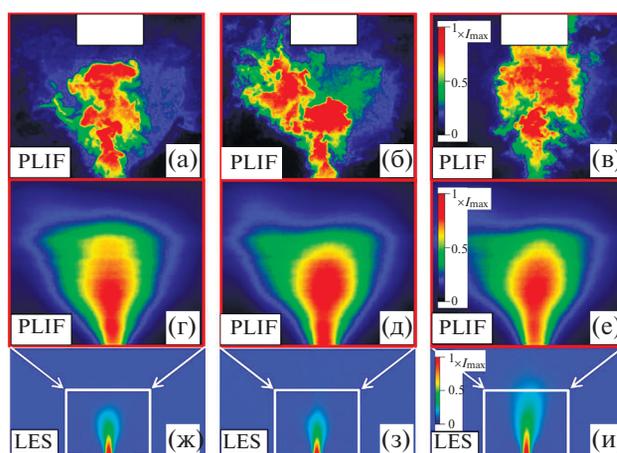
## 7. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ

Доклады данной секции были посвящены численному и экспериментальному уточнению макро- и микроструктуры закрученных потоков, динамики формирования когерентных вихревых структур и их взаимодействия, явления распада вихря, перезамыкания вихревых колец и их неустойчивости.

Большое внимание в настоящее время уделяется проблемам экспериментального исследования структуры сложных закрученных течений с использованием оптических и теневых методов, температурных полей методами рэлеевской и ИК-термометрии. В работе [68] сообщается о совместном применении методов оптической трассерной анемометрии stereo PIV и плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (PLIF) для измерения полей скорости и температуры в затопленной закрученной струе воды, натекающей на плоскую нагретую поверхность. Одновременно измерялась температура охлаждаемой струей поверхности с помощью высокоскоростной ИК-камеры. В докладе [69] проведено исследование структуры течения и турбулентного перемешивания в модельной атмосферной вихревой горелке Tugbotesa при различных числах Рейнольдса с использованием современных методов оптической диагностики (PLIF) и численного моделирования (LES). Численное моделирование показывает хорошее совпадение с экспериментальными результатами (рис. 16). Полученная информация свидетельствует о том, что на всех режимах наблюдаются ярко выраженные области с большой долей не перемешанного топлива. Высокая скорость струи подаваемого топлива оказывает влияние на центральную зону рециркуляции, что, вероятно, и является основной причиной неудовлетворительного перемешивания топлива и воздуха в начальной области течения.

В работе [49] представлены результаты экспериментального измерения коэффициентов теплоотдачи при течении теплоносителя во внутренних каналах лопаток турбины со встроенной вихревой матрицей. Для определения коэффициентов теплопередачи используется нестационарная инфракрасная термография, в основе которой лежит метод теплового регулярного режима первого рода. Представлены описание используемой методики и результаты ее апробации на тестовой задаче при различных числах Рейнольдса. Экспериментально определены пределы применимости предложенного метода по числу Био.

На конференции также обсуждался широкий круг фундаментальных проблем, связанных с теоретическим описанием процессов, протекающих в ограниченных и струйных закрученных потоках, вихревых и отрывных зонах, однофазных



**Рис. 16.** Мгновенное (а)–(в) и среднее по времени (г)–(е) распределение паров ацетона, измеренное методом PLIF и рассчитанное на модели LES (ж)–(и) для различных чисел Рейнольдса: (а), (г), (ж) – 5000; (б), (д), (з) – 15000; (в), (е), (и) – 30000 [69].

и двухфазных течениях. Обсуждались фундаментальные проблемы переноса, смесеобразования и горения газового топлива в закрученном турбулентном потоке с использованием панорамных оптических методов. Акцент сделан на количественной оценке вклада когерентных структур в кинетическую энергию турбулентности, турбулентный перенос и тепловыделение в процессе горения при различных значениях интенсивности закрутки. Проанализирована аэродинамическая структура течения, основанная на математической модели турбулентной изотермической аэродинамики камеры сгорания с четырьмя подводами. Выявлено, что при симметричных условиях выхода потока в камере сгорания по всей ее высоте образуются четыре устойчивые вихревые структуры.

Сравнение пределов применимости  $k-w$ - и RSM-моделей турбулентности в задаче интенсификации массообмена в поворотно-расширяющемся канале описано в докладе [70]. Проведены измерения кинематических характеристик в поворотно-расширяющемся потоке. Для диагностики турбулентного массообмена использовалась лазерная доплеровская анемометрия. По результатам экспериментальных исследований проведена верификация численного моделирования турбулентного течения, основанного на полумпирических моделях турбулентности:  $k-w$  и RSM. Лучшее совпадение с экспериментом получено с использованием модели переноса напряжений Рейнольдса [71].

В работе [72] предложены и исследованы численно две схемы сжигания кузнечного угля с удалением твердого шлака: схемы с прямым впрыском пылеугольного топлива и схемы с бункером пылеугольного топлива. Обе схемы основаны на использовании прямооточных горелок и противо-

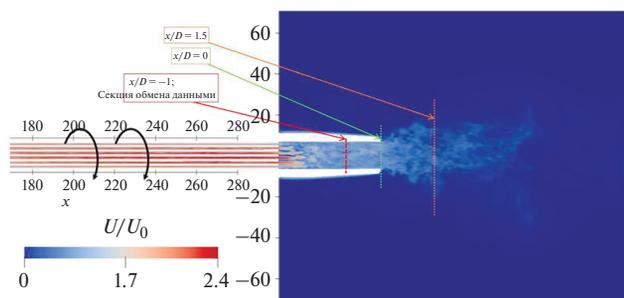


Рис. 17. Расчетная область и мгновенное поле скорости [74].

положно расположенных сопел, ориентации горелок вниз под углом и использовании ступенчатого сжигания топлива. Результаты моделирования показали устойчивое горение топлива, потери углерода в золе не более 2% и концентрацию оксидов азота в дымовых газах не более  $350 \text{ мг/м}^3$  [73].

Применение вихреразрешающих методов в вычислительной гидродинамике является многообещающим подходом для анализа структуры закрученных и вихревых потоков. Так, в докладе [74] представлены результаты моделирования методом LES свободной закрученной струи с числом Рейнольдса  $Re = 10^4$  для различной интенсивности закрутки (рис. 17). Моделирование проводилось для шести интенсивностей закрутки: 0, 0.15, 0.225, 0.3, 0.46, 0.63. Показано, что в последнем случае на оси струи образуется область возвратного течения, а также явление распада вихря с образованием центральной зоны рециркуляции.

## 8. ТЕПЛОМАССОБМЕН И ГИДРОДИНАМИКА НА МАКРО-, МИКРО- И НАНОМАСШТАБАХ

В рамках данного направления рассмотрены причины многомасштабной самоорганизации течения в структурных насадках, приводящие к развитию конвективных течений и капиллярно-гравитационной неустойчивости, что снижает эффективность процессов теплообмена. Обсуждены вопросы разработки физических и математических моделей теплообмена для расчета ректификационных колонн и градилен, пластинчато-ребристых испарителей и конденсаторов воздуходелительных установок, систем сжижения природного газа с поверхностной интенсификацией процессов теплообмена.

Управление теплообменом в канале за уступом возможно за счет установки дефлекторов (рис. 18) [13]. Это способ непосредственного воздействия на поток за счет разрушения крупномасштабных когерентных структур. Выполнено исследование влияния установки одного дефлектора различной формы на теплообмен за обратным уступом. Показано, что дефлекторы влияют на положение

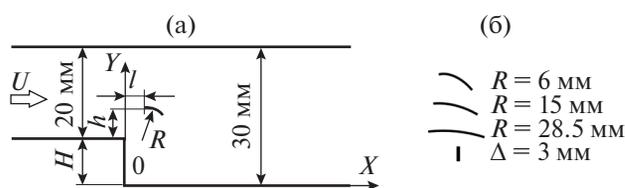


Рис. 18. Схема обратного уступа (а) и используемых дефлекторов (б) [13].

ние максимумов теплопередачи. Для обеспечения максимального теплосъема вблизи стенки уступа лучше использовать плоский дефлектор, перпендикулярный потоку. Использование всех рассмотренных дефлекторов приводит к увеличению гидравлических потерь, а теплогидравлическая эффективность всех исследованных дефлекторов менее 1.

В докладе [75] представлены новые обобщенные корреляционные зависимости для расчета коэффициента трения и теплоотдачи при течении в трубах с внутренним винтовым оребрением. Приведенные соотношения могут применяться для течения однофазной ньютоновской жидкости в широком диапазоне чисел Рейнольдса и Прандтля и в широком диапазоне геометрических параметров внутреннего спирального оребрения: числа заходов, высоты оребрения, относительного расстояния между ребрами и угла наклона спирали [76].

Для рациональной интенсификации теплообмена в компактных высокоэффективных пластинчато-ребристых теплообменниках за счет рассечения ребер и диафрагменных пережатий требуется проведение обширных экспериментальных исследований их теплогидравлической эффективности. В [77] представлен экспериментальный метод для непосредственного определения коэффициента потерь давления на трение в каналах теплообменного аппарата очень малых размеров. Получены теплофизические и аэродинамические характеристики исследуемой поверхности теплообмена в критериальном виде для проведения достоверных конструктивных расчетов полноразмерных теплообменных аппаратов различного назначения. Доказана возможность уменьшения объема и массы теплообменного аппарата при использовании пластинчато-ребристой теплообменной поверхности с рассеченными каналами и диафрагменными пережатиями.

В [8] рассмотрено явление аномальной интенсификации теплообмена в наклоненной траншее в узком облуненном канале. Проведены численные и экспериментальные исследования течения по поверхности теплообмена с овально-траншейными и овально-дугообразными углублениями (рис. 19). Представлена сравнительная оценка таких генераторов турбулентности с овальными и полусферическими лунками. Показано, что лунки

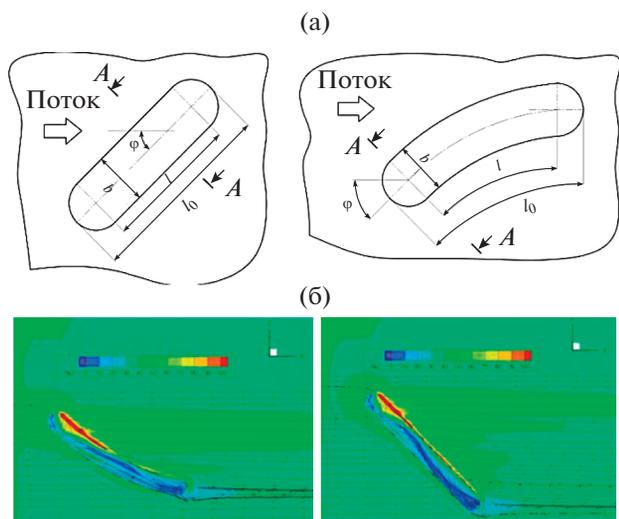


Рис. 19. Геометрия (а) и результаты расчета (б) линий тока и теплоотдачи в овально-траншейных и овально-дугообразных углублениях [8].

ки с относительными геометрическими размерами  $l/b = 4.7-5.78$ ,  $h/b = 0.18-0.37$ ,  $r = 0.025b$  и углом атаки  $45^\circ$  демонстрируют наилучшую теплоотдачу.

В области исследования закрученных газокapельных потоков на конференции рассмотрен важный с научной точки зрения вопрос эффективного охлаждения и стабилизации температуры высоконагруженных теплообменников, основанный на использовании дисперсного потока [78]. Проанализировано влияние основных параметров двухфазного закрученного потока, таких как концентрация капель, их начальный размер, скорость газокapельного течения и плотность теплового потока, на структуру течения, турбулентность и теплоперенос [79]. Установлена корреляция коэффициента теплоотдачи с массовым расходом воздуха. Показано, что увеличение теплоотдачи практически прекращается при определенном значении массового расхода несущей газовой среды  $x \approx 0.045$ .

Проведено расчетное исследование влияния формы микромиксера с цилиндрическим участком закрутки потока на эффективность перемешивания (рис. 20) и потери давления в широком диапазоне чисел Рейнольдса  $1 \leq Re \leq 300$  [80]. Установлено, что с увеличением числа сегментов миксера падение давления и эффективность перемешивания также возрастают во всем диапазоне чисел Рейнольдса. Полученные результаты сравнивались с аналогичными по постановке задачи и начальным условиям микромиксером Т-типа соответствующей длины. Получена зависимость относительной приведенной эффективности перемешивания от числа Рейнольдса. Выявлено, что применение микромиксеров со сложной гео-

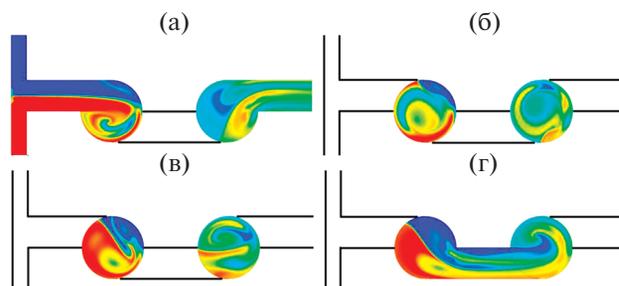


Рис. 20. Распределение концентрации при  $Re = 120$  [80] в различных поперечных сечениях микромиксера: (а) 700 мкм, (б) 400, (в) 200, (г) 100.

метрической формой позволяет интенсифицировать процессы перемешивания, особенно при низких числах Рейнольдса.

Экспериментально исследовалась интенсификация теплообмена при кипении хладагента R134a в горизонтальной трубе с шероховатостью стенки в виде метрической резьбы с глубиной резания  $\Delta = 0.45$  мм и шагом  $t = 1$  мм, а также со вставленной скрученной лентой со степенью закрутки  $s/d = 3$  и 6. Исследования проводились в диапазоне рабочих параметров: число Рейнольдса по скорости циркуляции жидкости  $Re = 16000-33000$ , плотность теплового потока  $q = 70-136$  кВт/м<sup>2</sup>. Массовая доля пара, рассчитанная с учетом подводимого теплового потока на выходе из рабочей секции, достигала  $x = 0.113-0.323$ . Использование скрученных лент при течении в шероховатой трубе так же, как и в гладкой, приводит к выравниванию температурных неоднородностей в азимутальном направлении и способствует интенсификации теплообмена при кипении.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный обзор пленарных, проблемных и секционных докладов, содержащих новые и важные результаты исследований, свидетельствует о высоком научном потенциале отечественных и зарубежных ученых в исследовании вихревых и закрученных потоков. Выбор рациональных форм проточных частей оборудования при использовании вихревых и закрученных токов для повышения эффективности работы теплоэнергетического оборудования, режимов течения и горения на основе глубокого изучения локальных параметров течения и теплообмена являются основными задачами исследований.

Результаты конференции свидетельствуют о том, что возросло количество научно-исследовательских работ в области изучения аэродинамики и теплообмена в закрученных и вихревых потоках с использованием бесконтактных оптических исследований PIV, PLIF, высокоскоростной и инфракрасной видеосъемки. Важную роль играют разработка и обновление совре-

менных вычислительных моделей, отечественного и открытого программного обеспечения. В их основе должны лежать надежные и апробированные модели турбулентности, адаптивные сетки и эффективные процедуры решения задач.

Нерешенной остается проблема повышения квалификации исследователей в области механики жидкости для адекватной постановки математических и физических задач аэрогидродинамики для вихревых и закрученных течений и интерпретации численных и экспериментальных исследований.

По итогам конференции было отмечено, что вопросы совершенствования систем охлаждения и повышения эффективности элементов газотурбинного, теплоэнергетического и теплопередающего оборудования остаются актуальными.

Следующая 8-я Международная конференция “Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках” состоится в 2021 г. в НИУ МЭИ, г. Москва.

Конференция проводилась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-08-20110).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Markovich D., Dulin V.* On Large-scale Vortex Structures and Flame Front Corrugations in Swirling Jets with Combustion // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 020001.
2. *Alekseenko S.V., Dulin V.M., Kozorezov Yu.S., Markovich D.M.* Effect of High-Amplitude Forcing on Turbulent Combustion Intensity and Vortex Core Precession in a Strongly Swirling Lifted Propane/Air Flame // Combust. Sci. Technol. 2012. V. 184. № 10–11. P. 1862.
3. *Hanjalić K., Launder B.* Modelling Turbulence in Engineering and the Environment: Second-moment routes to Closure. Cambridge University Press, 2011. 379 p.
4. *Collopy H., Sampson M., Ligrani P.M.* Recent Research Developments for Turbine Blade Tip Heat Transfer, Including Development and Effects of Tip Leakage Vortices // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 020002.
5. *Sampson M., Fairbanks A., Moseley J., Ligrani Ph.M., Xu H., Fox H.* Linear Cascade and Wind Tunnel Development for Turbine Blade Tip Heat Transfer Investigations with and Without Film Cooling. V. 5A: Heat Transfer. Phoenix, Arizona, USA: Amer. Soc. Mech. Eng., 2019. P. V05AT13A007.
6. *Kornev N., Samarbakhsh S.* Large Eddy Simulation with Direct Resolution of Subgrid Motion Using a Grid Free Vortex Particle Method // Int. J. Heat Fluid Flow. 2019. V. 75. P. 86.
7. *Isaev S.A., Leontiev A.I., Milman O.O., Nikushchenko D.V., Sudakov A.G.* The Effect of Anomalous Enhancement of Vortex Heat Transfer in the Separated Flow in Inclined Oval-trench Dimple and on the Structured Surfaces // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 020003.
8. *Isaev S.A., Mironov A.A., Popov I.A., Skrypnik A.N., Shelchkov A.V.* Heat Transfer Enhancement Using Oval-trench Vortex Generators // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 080004.
9. *Isaev S.A., Грицкевич М.С., Леонтьев А.И., Попов И.А., Судаков А.Г.* Аномальная интенсификация турбулентного отрывного течения в наклоненных однорядных овално-траншейных лунках на стенке узкого канала // ТВТ. 2019. Т. 57. № 5. С. 797.
10. *Piralishvili Sh.A.* Vortex Effect: A History on Its Development in the USSR and Russia // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 020004.
11. *Казанцева О.В., Пиралишвили Ш.А., Фузеева А.А.* Численное моделирование закрученных течений в вихревых трубах // ТВТ. 2005. Т. 43. № 4. С. 606.
12. *Kuzma-Kichta Y.A., Leontiev A.I.* Choice and Justification of the Heat Transfer Intensification Methods // J. Enhanced Heat Transfer. 2018. V. 25. № 6. P. 465.
13. *Terekhov V.I., Dyachenko A. Yu., Smulsky Ya.I.* Heat and Mass Transfer Behind a Backward-facing Step in the Presence of Detached Vortex Generators // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 080001.
14. *Terekhov V.I., Smul'skii Ya.I., Sharov K.A.* Experimental Study of the Separated Flow Structure Behind a Backward-facing Step and a Passive Disturbance // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2016. V. 57. № 1. P. 180.
15. *Kuznetsov V.V.* Fundamental Issues Related to Flow Boiling and Two-Phase Flow Patterns in Microchannels – Experimental Challenges and Opportunities // Heat Transfer Eng. 2019. V. 40. № 9–10. P. 711.
16. *Mitrofanova O.V.* On the Structural Similarity of Stable Forms of Spiral-vortex Motion // J. Eng. Phys. Thermophys. 2017. V. 90. № 5. P. 1119.
17. *Ivanova Y.F., Yukhnev A.D., Gataulin Y.A., Smirnov E.M., Vavilov V.N., Moiseev A.A., Vrabiy A.A.* Three-dimensional Flow in a Model of the Blood Vessel Graft with a Spiral Ridge on the Wall // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 030003.
18. *Ryzenkov V.O., Abdurakipov S.S., Mullyadzhanov R.I.* The Final Stage of the Vortex Breakdown in the Annular Swirling Turbulent Jet // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 030004.
19. *Gaifullin A.M., Zhvick V.V.* Vortical Structures in Two Counter-swirling Submerged Jets // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 030002.
20. *Gaifullin A.M., Zhvick V.V.* Interaction Between Two Oppositely Swirled Submerged Jets // Fluid Dyn. 2019. V. 54. № 3. P. 339.
21. *Soldatov I.N., Klyueva N.V.* Effects of Viscosity on Inertial Waves in Swirling Jets // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 030007.
22. *Gadzhiev D.A., Gaifullin A.M., Zubtsov A.V.* An Axisymmetric Vortex Around a Rotating Infinitely Elongated Circular Cylinder in a Viscous Heat-conducting Gas // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 030009.
23. *Gadzhiev D.A., Gaifullin A.M., Zubtsov A.V.* On Vortex Generation by a Rotating Cylinder // Fluid Dyn. 2020. V. 55. № 8. P. 965.
24. *Kadyrov A.I., Vachagina E.K.* Semi-analytical Solution of Laminar Flow in a Circular Duct with Constant Value of the Radial Vector at the Entrance // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 030011.
25. *Suslov D.A., Litvinov I.V., Shtork S.I.* Frequency Response of Swirl Flow Behind an Axial Swirler // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 030012.
26. *Шторк С.И., Суслов Д.А., Литвинов И.В., Гореликов Е.Ю.* Анализ структуры течения в модели микрогидротурбинного аппарата // ПМТФ. 2020. Т. 61. № 5. С. 144.

27. *Kadyirov A.I., Vachagina E.K., Karaeva J.V., Yudakhin A.E.* The Viscous Flow in a Channel with Helical Fins // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 030008.
28. *Reshetnikov A.V., Busov K.A., Kapitonov O.A., Panov G.V.* Effect of Flow Swirl on the Spray of Boiling Liquid // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 030001.
29. *Решетников А.В., Мажейко Н.А., Скоков В.Н., Коверда В.П.* Неравновесные фазовые переходы в струе сильно перегретой воды // ТВТ. 2007. Т. 45. № 6. С. 838.
30. *Roslyakov P.V., Zaichenko M.N., Khokhlov D.A., Proskurin Y.V.* The Effect of the Structure of the Vortex Burner for Combustion Processes in Limited Volumes // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 040001.
31. *Lyubov V.K., Finker F.Z.* Reducing the Environmental Impact of Coal-fired Thermal Power Station // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 040002.
32. *Lyubov V.K.* Influence of Coal Combustion Technology on Boiler Operation Efficiency // Solid Fuel Chem. 2020. V. 54. № 5. P. 260.
33. *Prokhorov D.A., Piralishvili Sh.A.* Numerical Simulation of Pulverized Coal Combustion and Comparison with in-furnace Measurements // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 040008.
34. *Evdokimov O.A., Guryanov A.I., Mikhailov A.S., Veretennikov S.V.* A Numerical Simulation of Burning of Pulverized Peat Fuel in a Bidirectional Vortex Combustor // Therm. Sci. Eng. Prog. 2020. V. 17. P. 100510.
35. *Evdokimov O.A., Guryanov A.I., Mikhailov A.S., Veretennikov S.V., Stepanov E.G.* Experimental Investigation of Burning of Pulverized Peat in a Bidirectional Vortex Combustor // Therm. Sci. Eng. Prog. 2020. V. 18. P. 100565.
36. *Tolstoguzov R.V., Sharaborin D.K.* Coherent Structures in an Impinging Jet with Swirl and Combustion // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 040004.
37. *Sharaborin D.K. et al.* On the Structure of an Impact Jet with Flow Swirling and Combustion // Combust. Exp. Shock Waves. 2020. V. 56. № 2. P. 131.
38. *Litvinov I.V. et al.* Analysis of the Swirl Number in a Radial Swirler // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 040005.
39. *Nguyen T.D., Aleksandrov Yu.B., Mingazov B.G.* Study of Mixing in a Swirling Jet // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 040007.
40. *Sulaiman A.I. et al.* Investigation of the Flow Mixing behind the Flame Tube Head of a Combustion Chamber in a Gas Turbine Engine // Russ. Aeronaut. 2019. V. 62. № 2. P. 281.
41. *Kalinina K.L., Evdokimov O.A., Guryanov A.I.* The Numerical and Experimental Study of the Combustion of Microflame Jet Arrays // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 040003.
42. *Evdokimov O.A. et al.* Special Features of the Formation of Diffusion Reacting Jets in a Swirled Air Flow // J. Eng. Phys. Thermophys. 2018. V. 91. № 5. P. 1267.
43. *Evdokimov O.A.* The Structure of Coaxial Buoyant Jets with Swirl and Combustion // Int. J. Energy Clean Env. 2019. V. 20. № 4. P. 339.
44. *Remizov A.E., Gribov M.V., Vinogradova O.V.* Optimization of the Characteristics of the Axial Stage of the Axial-diagonal Compressor by 3D Modeling and Structural-Parametric Analysis // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 050006.
45. *Shishkin N.E.* Protecting the Exhaust Chamber Against the Combustion Products of Reactive Engine by the Swirling Jets // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 050005.
46. *Shishkin N.E., Terekhov V.I.* The Effect of Liquid Phase Temperature and Concentration on Gas-Droplet Cooling Efficiency // Int. J. Heat Mass Transfer. 2020. V. 153. P. 119639.
47. *Guryanova M.M., Timofeeva K.R., Guryanov A.I.* Investigation of the Effect of the Output Parameters of the Flow Behind the Compressor on the Gas Dynamics of the Separation Diffuser of the Combustion Chamber // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 050002.
48. *Gur'yanova M.M., Piralishvili Sh.A.* Joint Effect of Input Asymmetrical Velocity Profile and Initial Turbulence Intensity on Hydraulics of a Separated Diffuser of GTE Combustion Chamber // Russ. Aeronaut. 2016. V. 59. № 2. P. 197.
49. *Kolesova E.G., Zhornik M.N., Kolesova A.A.* The Experimental Study of Heat Transfer in the Channels of the Vortex Matrices of Gas Turbine Blades // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 070005.
50. *Remizov A.E., Lebedev V.V., Lebedev O.V.* Specifics of Film Cooling Formation on the Turbine Blade Suction and Pressure Sides when Using Heat Exchange Intensifiers under Conditions of Accelerated Main Flow and Wall Curvature // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 050004.
51. *Leukhin Yu.L., Pankratov E.V.* Aerodynamics and Heat Transfer in a Narrowing Annular Channel with a Swirling Flow and a Different Taper of Inner Surface // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 030010.
52. *Sergeev M.N.* On the Stability of a Charged Rotating Droplet in a Stream // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 030006.
53. *Safronov A.A. et al.* Investigation in the Structure of the Inertial Flow in a Thin Film Formed by a Flow of Falling Drops // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 050003.
54. *Koroteev A.A. et al.* Cavitation Effects on the Work of Disperse Sheet Collectors of Frameless Heat Removal Systems in Outer Space // J. Eng. Phys. Thermophys. 2020. V. 93. № 6. P. 1311.
55. *Lobasov A.S., Platonov D.V., Dekterev D.A.* Experimental and Numerical Study of Screw Rotors Efficiency with Different Geometric Parameters as Turbines in Micro-HPP // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 050001.
56. *Onokhin D.A., Orekhov A.N., Karpov S.V.* Aerodynamics and Convective Heat Transfer at the Inner Wall of the Relatively Long Cyclone Chambers // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 030005.
57. *Сабуров Э.Н., Онохин Д.А.* Аэродинамика и устойчивость потока в относительно длинных циклонных камерах // Энергетика. Изв. вузов и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61. № 6. С. 527.
58. *Evdokimov O.A.* The Influence of the Ratio of the Diameters of the Vortexes and Mixing Chambers of a Vortex Ejector on Its Own Characteristics // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 060001.
59. *Evdokimov O.A. et al.* Experimental Study of Cleaning Aircraft GTE Fuel Injectors Using a Vortex Ejector // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 925. P. 012027.
60. *Khaliulin R.R. et al.* Intensification of the Ejection Coefficient in the Gas Ejector due to the Partially Swirled Active Stream // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 060004.

61. Халиулин Р.Р., Сыченков В.А., Панченко В.И. Разработка методики расчета эжекторов с малыми коэффициентами эжекции // Изв. вузов. Авиационная техника. 2018. Т. 61. № 1. С. 64.
62. Vasilyuk O.V., Piralishvili Sh.A. The Laminar Regime of the Flow in the Vortex Tube // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 060005.
63. Naumkin V.S., Terekhov V.I. Modeling of the Laminar Regime of the Air Flow in Ranque–Hilsch Vortex Tube // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 060002.
64. Shaykina A.A., Veretennikov S.V., Popkova E.A. The Effect of Internal Intensifiers on Energy Separation in a Vortex Tube // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 060003.
65. Shaykina A.A., Popkova E.A. Analysis of the Operational Processes Realized in Vortex Tubes and in Leontiev's Tubes // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 060006.
66. Veretennikov S.V. The Unsteady Numerical Simulation of the Swirling Flow in the Vortex Tube // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 060008.
67. Vasilyuk O.V., Veretennikov S.V. Simulation of Vortex Expansion Separator for Steam // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 060007.
68. Sharaborin D.K., Protasov S.K., Nichik M.Yu. Planar Measurements of Velocity and Temperature Fields in an Impinging Jet with Swirl // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 070001.
69. Lobasov A.S., Dekterev Ar.A. Experimental and Numerical Study of Turbulent Mixing Behind a Model Turbomeca Swirl Burner // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 070004.
70. Kabardin I.K. et al. Applicability Limits Comparison of  $k-w$  Turbulence Model and Reynolds Stresses Transfer Model in the Problem of Intensification of Mass Transfer by Controlled Rotary-divergent Flow // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 070003.
71. Kabardin I.K. et al. Calculation-experiment Study of Gas Motion in Controlled Turning-and-Diverging Flow // J. Eng. Thermophys. 2020. V. 29. № 3. P. 393.
72. Prokhorov V.B. et al. Furnace Numerical Model Development for Checking the Possibility of Boiler Retrofitting from Liquid to Dry Ash Removal // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 070006.
73. Volkov E.P. et al. Investigation of the Combustion Process of Solid Fuel in Furnaces with Direct-Flow Burners // Therm. Eng. 2020. V. 67. № 6. P. 365.
74. Borynyak K.I., Hrebtov M.Y. Large Eddy Simulation of Turbulent Diffusion in Swirling Jets // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 070007.
75. Popov I.A., Skrypnyk A.N., Schelchikov A.V. Derivation of the Generalized Correlations for Heat Transfer and Friction Factor for the Flow in Pipes with Inner Helical Finning // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 080002.
76. Skrypnyk A.N. et al. Thermohydraulic Efficiency of Tubes with Internal Spiral Finning // J. Eng. Phys. Thermophys. 2018. V. 91. № 1. P. 52.
77. Vasiliev V.Ya., Nikiforova S.A. Energy-saving Effect of Rational Enhancement of Heat Transfer in Non-round Surface Channels // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 080003.
78. Дедов А.В., Забиров А.Р., Слива А.П., Федорович С.Д., Ягов В.В. Влияние углеродистого покрытия поверхности на теплообмен при нестационарном пленочном кипении // ТВТ. 2019. Т. 57. № 1. С. 72.
79. Dedov A.V. et al. The Study of Heat Removal Efficiency Using a Dispersed Flow Method // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 080005.
80. Lobasov A.S. et al. Numerical Investigation of the Mixing Efficiency of Fluids in the Micromixer with a Cylindrical Section of a Swirl Flow // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. № 1. P. 080006.