

О.В.Митрофанова

**ГИДРОДИНАМИКА
И ТЕПЛОБМЕН
ЗАКРУЧЕННЫХ
ПОТОКОВ**

**В КАНАЛАХ
ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК**



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2010

УДК 532.5, 536.7

ББК 22.253.3, 22.317
М 67



*Издание осуществлено при поддержке
Российского фонда фундаментальных
исследований по проекту 09-08-07052*

Митрофанова О. В. **Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 288 с. — ISBN 978-5-9221-1223-9.

Монография посвящена проблеме моделирования процессов гидродинамики и теплообмена сложных закрученных течений вязкой несжимаемой жидкости в каналах с закручивающими устройствами. Рассмотрены физические особенности турбулентных закрученных потоков, выявлены факторы, влияющие на вихревую структуру течения теплоносителей, гидравлическое сопротивление и теплообмен в каналах ядерно-энергетических установок (ЯЭУ). Основой физико-математического моделирования является комплексное решение проблем пространственного осреднения уравнений динамики сплошной среды для каналов сложной геометрии, описания граничных условий, эффективных коэффициентов переноса и формулировки замыкающих соотношений, полученных в результате экспериментального подтверждения принимаемых физических моделей и гипотез.

Разработаны методы математического моделирования гидродинамики и теплообмена для наиболее характерных типов каналов с завихрителями различной конфигурации. Получены аналитические решения в форме модифицированных интегралов Лайона для оценки теплоотдачи в кольцевых каналах с завихрителями, а также для винтового течения теплоносителя. Проведено расчетное исследование влияния интенсивности завихренности потока и геометрических параметров каналов на вихревую структуру закрученных течений. Рассмотрены способы повышения теплогидравлической эффективности каналов ЯЭУ при использовании закручивающих устройств.

Для научных работников, инженеров, аспирантов и студентов физических факультетов университетов, чьи интересы связаны с теплофизикой, механикой жидкости и газа и процессами теплообмена в технических и природных системах.

ISBN 978-5-9221-1223-9

© ФИЗМАТЛИТ, 2010

© О. В. Митрофанова, 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Глава 1. Современное состояние исследований в области изучения гидродинамики и теплообмена закрученных потоков в каналах с завихрителями.	10
1.1. Введение	10
1.2. Виды завихрителей и их применение для интенсификации теплообмена	12
1.3. Физические особенности турбулентных закрученных потоков в каналах с завихрителями	20
1.3.1. Вопросы терминологии (20). 1.3.2. Основные закономерности закрученных течений. Связь интенсивности закрутки потока с формированием поля скорости закрученного течения в канале (24). 1.3.3. Вторичные течения (30). 1.3.4. Отрыв и присоединение потока (37).	
1.4. Факторы, влияющие на вихревую структуру потока, гидравлическое сопротивление и теплообмен в каналах с завихрителями 1.4.1. Форма завихрителей (46). 1.4.2. Загромождение канала (52). 1.4.3. Степень турбулентности потока (55). 1.4.4. Шаг расположения закручивающих элементов и угол скоса потока (58). 1.4.5. Продольная кривизна (63).	46
1.5. Современное состояние проблемы расчетного моделирования сложных турбулентных течений	67
1.5.1. Использование моделей турбулентности для расчета криволинейных и закрученных течений (67). 1.5.2. Различные подходы к построению расчетных методов сложных турбулентных течений (73).	
1.6. Опыт разработки инженерных методов расчета для каналов сложной геометрии с закруткой потока	82
1.7. Выводы	86
Глава 2. Теоретические основы математического моделирования гидродинамики и теплообмена в каналах с закручивающими устройствами.	88
2.1. Принципы расчетного моделирования	88
2.2. Постановка задачи. Вывод расчетных уравнений	89
2.2.1. Система исходных уравнений (89). 2.2.2. Процедура пространственного осреднения (95). 2.2.3. Уравнения для осредненных компонент скорости и давления (99). 2.2.4. Осреднение уравнения энергии (103).	
2.3. Формулировка замыкающих феноменологических соотношений 2.3.1. Описание силового воздействия завихрителей на поток (107). 2.3.2. Описание компонент тензора сопротивления (109). 2.3.3. Моделирование эффективного переноса в каналах с завихрителями (112).	107
Глава 3. Метод расчета гидродинамики и теплообмена для кольцевых каналов со спиральными завихрителями	117
3.1. Постановка задачи	117
3.2. Гидродинамический расчет кольцевых каналов с непрерывными по длине спиральными завихрителями.	119
3.2.1. Оценка эффективной вязкости (120). 3.2.2. Вычислительный алгоритм метода гидротеплового расчета (125).	
3.3. Расчет теплообмена в кольцевых каналах с завихрителями	128

3.3.1. Уравнение теплового баланса (129).	3.3.2. Интегральные соотношения в форме интегралов Лайона для расчета теплоотдачи в кольцевых каналах с завихрителями при произвольном соотношении тепловых нагрузок (133).	
3.4. Гидротепловой расчет винтообразных каналов		141
3.5. Верификация расчетного метода. Сравнение результатов расчетов и экспериментов.		145
Выводы к главе 3.		158
Глава 4. Метод расчета гидродинамики и теплообмена в трубах с локальными завихрителями		
4.1. Постановка задачи. Вывод расчетных уравнений.		160
4.1.1. Введение (160).	4.1.2. Вывод интегральных уравнений (162).	4.1.3. Описание профиля окружной скорости закрученного потока. Предварительный анализ (165).
4.2. Модель трансформации вихря		170
4.2.1. Основные положения (170).	4.2.2. Система расчетных уравнений (170).	4.2.3. Параметрическое описание поля скорости (172).
4.2.4. Оценка эффективной вязкости (176).		
4.3. Влияние завихрителей на теплообмен		177
4.4. Вычислительный алгоритм метода гидротеплового расчета труб с локальными завихрителями.		182
4.5. Верификация метода расчета гидродинамики и теплообмена труб с локальными завихрителями. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов		183
Выводы к главе 4.		192
Глава 5. Использование теории Громеки – Бельтрами для анализа условий существования макровихревой структуры внутренних закрученных течений при высоких числах Рейнольдса		
Введение		194
5.1. Перенос завихренности.		195
5.2. Винтовое течение в каналах		197
5.2.1. Решение для кольцевого канала (198).	5.2.2. Анализ результатов (199).	
5.3. Влияние интенсивности завихренности на структуру закрученных потоков в цилиндрических каналах		203
Глава 6. Генерация спиральности и критические переходы в закрученном потоке однофазной жидкости		
Введение		207
6.1. Понятие спиральности. Вывод уравнения спиральности		208
6.1.1. Приведение к безразмерному виду (209).	6.1.2. Связь спиральности с интенсивностью завихренности (210).	
6.2. Теоретический анализ.		211
6.2.1. Некоторые свойства вихревых течений с ненулевой спиральностью. Уравнение энергии для винтового течения (212).	6.2.2. Переход к винтовому движению (213).	
6.3. Самопроизвольная закрутка теплоносителя в коллекторных системах ядерно-энергетических установок		219
Выводы		227

Глава 7. Повышение теплогидравлической эффективности каналов ЯЭУ при использовании закручивающих устройств	229
7.1. Способы оценки теплогидравлической эффективности каналов с закручивающими устройствами	230
7.2. Выбор критерия эффективности для решения задач повышения безопасности и эффективности работы ЯЭУ	233
7.3. Оптимизация геометрии дистанционирующих устройств в кольцевых каналах ТВС	238
7.4. Примеры решения оптимизационных задач на основе вычислительных экспериментов	241
7.4.1. Интенсификация теплообмена в парогенерирующих каналах ТВС (241). 7.4.2. Улучшение массогабаритных характеристик авиационного теплообменника (244). 7.4.3. Уменьшение длины технологических каналов пиролизных печей (249).	
Выводы к главе 7	251
Заключение	252
Приложение 1. Значения коэффициентов полного сопротивления C_d для тел различной геометрии	256
Приложение 2. Вывод зависимости для определения коэффициента тензора сопротивления $k_{\eta\eta}$ при течении жидкости в винтообразном канале	262
Приложение 3. Приведение уравнений модели трансформации вихря к конечно-разностному виду	264
Список литературы	270

*Геorgию Алексеевичу Гладкову
с глубокой благодарностью за его
удивительный талант ученого и широту
человеческой души посвящается*

Я выражаю безграничную признательность дорогим для меня людям, благодаря которым оказалось возможным появление этой книги: моему отцу Торгашеву Виктору Ивановичу, первым открывшему для меня мир теплофизических явлений; Льву Сергеевичу Кокореву — моему учителю и истинному ученому, своим подвижническим трудом исследователя показавшему, что для научного познания нет ограничений; Александру Сергеевичу Корсуну — научному руководителю при выполнении кандидатской диссертации, учась у которого я поняла, что красота и стройность физической гипотезы выражаются математически.

Автору выпало счастье принадлежать к школам двух выдающихся академиков Российской академии наук (РАН): академика Ивана Ивановича Новикова — одного из первых руководителей Атомного проекта и Московского инженерно-физического института (МИФИ), основателя кафедры теплофизики МИФИ и Института теплофизики Сибирского отделения РАН, и академика Александра Ивановича Леонтьева, создавшего свою уникальную школу подготовки научных кадров не только в рамках советского, а затем и постсоветского пространства, но и объединившего наиболее ярких учёных-теплофизиков России, Англии, США, Украины, Белоруссии и других стран.

Слова особой благодарности я адресую Георгию Алексеевичу Гладкову, явившемуся идейным вдохновителем создания данной монографии, выдающемуся ученому, обладавшему не только даром научной интуиции, но и высочайшим профессионализмом и феноменальной памятью, что позволяло на практике оперативно решать сложнейшие теплофизические задачи.

Я благодарна за счастье дружеского знакомства, сотрудничества и ощущения поддержки в решении научных задач со стороны своих старших коллег, признанных мэтров отечественной теплофизики — Павла Анатольевича Ушакова и Генриха Александровича Дрейцера.

Это подаренная судьбой большая удача — учиться у таких выдающихся людей, принадлежащих к элите российской науки.

Предисловие

Проблема интенсификации тепломассообменных процессов имеет важное значение для достижения прогресса в совершенствовании современных и создании новых энергетических и теплообменных аппаратов. Среди многообразия способов интенсификации теплообмена закрутка потоков рабочих сред является одним из наиболее простых и распространенных способов и широко используется в энергонапряженных каналах ядерно-энергетических установок (ЯЭУ), теплообменников, аппаратов авиационной и ракетно-космической техники, химической промышленности и других технических устройств. Это связано с тем, что применение закрученных потоков приводит не только к усилению тепло- и массообмена, но и выравниванию температурных неравномерностей, стабилизации течений и процессов горения, используется для тепловой защиты стенок каналов, обеспечивает эффективное и экологически чистое сжигание топлива.

Анализ публикаций последних лет показывает, что закрученные потоки привлекают к себе все более пристальный интерес исследователей. Это обусловлено тем, что особые свойства закрученных течений имеют широкий диапазон технических приложений в энергетическом, теплообменном и технологическом оборудовании ядерной энергетики, аэрокосмической техники, химической и нефтеперерабатывающей промышленности, транспорта, промышленной теплоэнергетики.

В технических устройствах закрутка потока, т. е. сообщение потоку вращательного движения с помощью различных закручивающих устройств, приводит к крупномасштабному воздействию на все характеристики поля течения, а следовательно и теплообмен. При этом характерная для закрученных течений трехмерность поля скорости и соизмеримость тангенциальной и осевой компонент скорости (а в каналах переменного сечения всех трех компонент скорости, включая радиальную) обуславливает формирование трехмерного поля давления с радиальным градиентом, сравнимым по величине с продольным. Благодаря наличию поперечных составляющих скорости — тангенциальной и радиальной, усиливается конвективный перенос импульса, энергии и массы и изменяется вихревая структура внутренних закрученных потоков. С этим и связаны столь необходимые в технических приложениях свойства закрученных течений, выражающиеся в их способности интенсифицировать процессы тепло- и массообмена, выравнивать локальные температурные неоднородности за счет конвективного перемешивания,

подавлять или усиливать случайные возмущения (например, обтекание закрученным потоком выпуклой поверхности приводит к подавлению турбулентного переноса, а обтекание вогнутой — к его усилению), стабилизировать процессы течения в условиях сложного теплообмена при протекании химических реакций или процессов горения, обеспечивать рециркуляционное течение в камерах сгорания, что способствует более полному, экологически чистому выгоранию топлива и др.

Классическим стало применение закрученных потоков в циклонных аппаратах для очистки газов и жидкостей, в центрифугах и сепараторах для разделения различного рода смесей, в вихревых трубах для температурного разделения газа, в элементах энергетических и двигательных установок, в системах охлаждения, термостатирования и кондиционирования. Большие перспективы имеет использование закрутки потока для комплексного решения задач повышения безопасности и эффективности работы ядерно-энергетических установок, конструктивного усовершенствования теплообменных и двигательных систем авиационной и ракетно-космической техники, МГД-генераторов, для повышения устойчивости течений в условиях невесомости, для ускорения протекания металлургических и химико-технологических процессов (таких, как обжиг, плавление, коксование, пиролиз), для интенсификации процессов тепло- и массообмена в условиях вынужденной и естественной конвекции.

В последние годы повышенный интерес вызывает многоцелевое использование закручивающих устройств: например, одновременно в качестве турбулизаторов и закручивателей пристенных слоев жидкости в каналах теплообменных трактов, или в качестве завихрителей и дистанционирующих элементов в межтвэльном пространстве тепловыделяющих сборок и т. д. Многофункциональность закручивающих устройств делает экономически более выгодным обеспечение высокой теплоэнергетической эффективности и надежности работы ЯЭУ и другого теплоэнергетического оборудования. В связи с этим весьма перспективным является использование закручивающих устройств, в небольшой степени перекрывающих проходное сечение каналов: локальных, непрерывных или периодически расположенных завихрителей, винтового оребрения с различной формой выступов, спиральных накаток, проволочных навивок и др. Эти устройства наряду с дополнительным вихреобразованием и турбулизацией пристенной области обеспечивают глобальную циркуляцию (закрутку) потока, благоприятно влияющую на выравнивание температурных неоднородностей и усиление тепломассообменных процессов.

Большое разнообразие конструкций закручивающих устройств и сложная структура турбулентных потоков в каналах с завихрителями обусловили в основном прикладной характер проводимых в настоящее время исследований. Полученные при этом расчетные рекомендации носят ограниченный характер и имеют вид обобщающих эмпирических зависимостей, описывающих отдельные типы каналов, завихрителей

и режимы течения. Вместе с тем, проблема создания универсальных инженерных методов расчета гидродинамики и теплообмена закрученных течений в каналах сложной геометрии, основанных на более глубоком, фундаментальном изучении физической природы таких течений, приобретает все большую актуальность для решения задач повышения эффективности, надежности и безопасности работы энергоустановок и теплообменного оборудования, а также для оптимизации их конструкций в целях снижения материалоемкости и затрат энергии на собственные нужды.

В настоящей работе рассмотрены вопросы, касающиеся общих закономерностей и топологии закрученных и винтовых течений, выделены факторы, влияющие на вихревую структуру потока, гидравлическое сопротивление и теплообмен в каналах с завихрителями, дан анализ различных подходов к построению расчетных методов сложных турбулентных закрученных течений, а также предложены два новых физически обоснованных метода инженерных расчетов процессов гидродинамики и теплообмена для кольцевых каналов и труб с различной геометрией закручивающих устройств. Актуальность разработки таких методов обусловлена практической необходимостью сравнения влияния различных типов завихрителей на гидродинамику и теплообмен в каналах, определения оптимальной геометрии завихрителей и получения надежных количественных оценок теплоэнергетической эффективности каналов с закручивающими устройствами.

Глава 1

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ИЗУЧЕНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ В КАНАЛАХ С ЗАВИХРИТЕЛЯМИ

1.1. Введение

Различным аспектам теории, моделирования, экспериментальных исследований и практического применения закрученных потоков посвящено большое количество работ. Так, к приоритетным исследованиям в области изучения термодинамики закрученных потоков относятся работы И.И. Новикова и соавторов [1–3]. Результатом этих исследований является открытие и объяснение эффекта максимального расхода закрученного потока жидкости [3]. На основе проведенных экспериментов было показано, что критическая скорость поступательного движения закрученного потока вязкой несжимаемой жидкости равна скорости распространения длинных центробежных волн [2].

Среди работ, отражающих определенные направления исследований, можно выделить ряд обобщающих монографий. В работе М.А. Гольдштика [4] рассмотрены способы аналитического решения некоторых задач вихревого течения идеальной и вязкой жидкости. В.К. Щукиным [5] исследовалось влияние инерционных сил на гидродинамику и теплообмен при закрученном течении в каналах. В.К. Щукиным и А.А. Халатовым [6] приведены результаты исследований гидродинамических характеристик и тепло- массообмена в осесимметричных каналах при локальной закрутке потока. В работе А.А. Халатова [7] систематизированы эмпирические расчетные зависимости, используемые для завихрителей различного типа, рассмотрены проблемы практического использования закрученных потоков в химической промышленности, машиностроении, энергетике. Обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований структуры течения и тепломассопереноса в ограниченных вихревых потоках приводится в работе С.С. Кутателадзе, Э.П. Волчкова и В.И. Терехова [8]. Авторами рассмотрен широкий класс закрученных течений, в том числе течения с периферийной закруткой (газовые завесы и полуограниченные струи). В монографии А. Гупты с соавторами [9], отличающейся

широтой охвата проблем, связанных с практическим применением закрученных потоков, большое внимание уделено влиянию закрутки на процессы горения и сепарации частиц в конкретных промышленных установках, предложены методы повышения эффективности технических устройств, использующих эффект закрутки. Особо следует отметить работы по исследованию вихревого эффекта (эффекта Ранка) — сложного газодинамического процесса энергоразделения в закрученном потоке вязкого сжимаемого газа. Этой интереснейшей проблеме посвящены, например, монографии А.П. Меркулова [10], А.Д. Суслова с соавторами [11], В.И. Кузнецова [12]; в работе А.Ф. Гуцола [13] дан анализ существующих теорий по объяснению эффекта Ранка, а в статье В.А. Арбузова и соавторов [14] представлены весьма интересные экспериментальные результаты, указывающие на существование крупномасштабных спиральных вихрей в закрученном потоке Ранка. В монографии Б.П. Устименко [15] обобщаются результаты исследований в области аэродинамики и теплообмена вращающихся турбулентных течений, течений в криволинейных каналах, циклонных камерах. В работе Ф.Т. Каменьщикова с соавторами [16] рассмотрены вопросы формирования вращающихся потоков со свободной поверхностью и их свойства, изложены результаты экспериментальных работ по использованию закрученных потоков в целях повышения тепловой мощности ядерного реактора типа РБМК. Результаты оригинальных расчетно-теоретических исследований представлены в работе Ю.Г. Назмеева [17], в которой рассматривается возможность интенсификации теплообмена с помощью закручивающих устройств в реологически сложных средах, характеризующихся весьма высокими значениями вязкости и наличием вязкоупругих и нелинейно-вязких свойств при ламинарном режиме течения. Из наиболее крупных аналитических обзоров, посвященных математическому моделированию турбулентных закрученных потоков с использованием различных моделей турбулентности, следует отметить публикацию Д. Слоуна, Ф. Смита и Л. Смута [18].

Проблемы изучения физики и топологии сложных вихревых и закрученных течений актуальны не только для технических отраслей знаний, но и объединяют такие жизненно важные науки, как геофизика, океанология, климатология и др.

В области фундаментальных исследований сложных вихревых течений особо следует выделить проблему изучения механизмов генерации завихренности и условий образования и устойчивости детерминированных вихревых структур.

Следует отметить, что проблема теоретического описания вихревого движения ставилась еще Анри Пуанкаре [19] более века назад, а также рассматривалась такими классиками отечественной науки, как Н.Е. Жуковский [20] и И.С. Громека [21]. Систематизация современных представлений о природе вихрей и моделях вихревого движения является основным содержанием монографий Ф.Дж. Сэффмэна [22] и отечественных авторов Алексеенко С.В., Куйбина П.А. и Окуло-

ва В.Л. [23]. Причем ценность последней из вышеупомянутых монографий состоит не только в рассмотрении широкого класса вихревых движений, которые можно интерпретировать как концентрированные вихри, но и в представленном описании экспериментальных методов наблюдения устойчивых вихревых структур, служащих базисом для развития теоретических представлений.

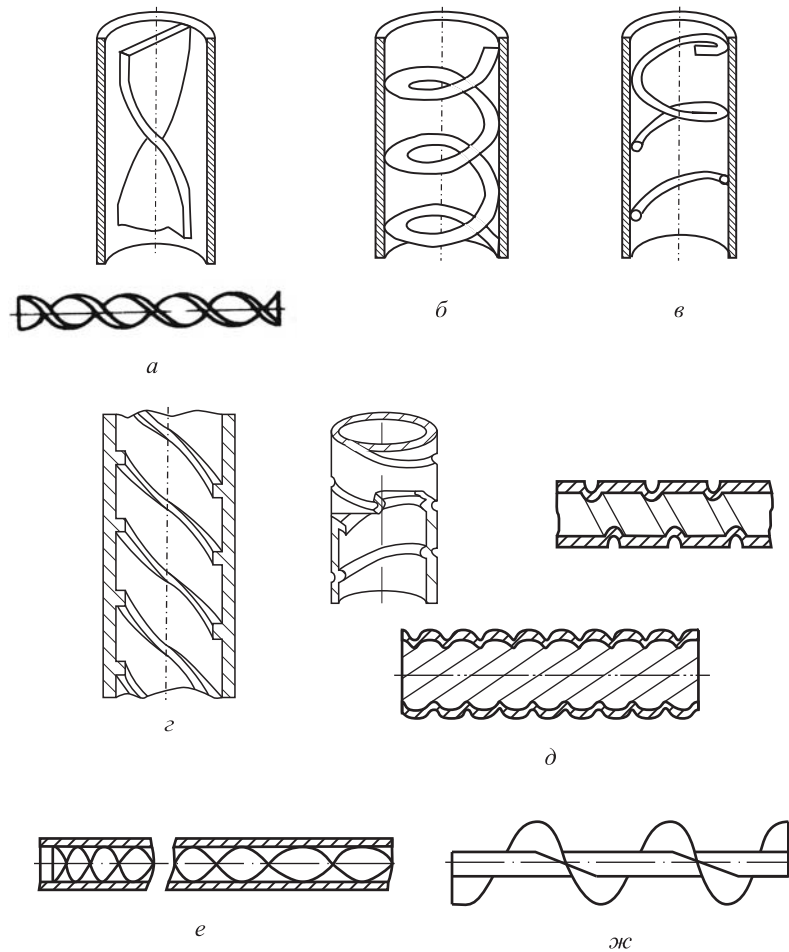
Опыт успешного практического применения закрученных потоков в технике обуславливает реальную перспективу создания энергетических и технологических установок, в полной мере использующих преимущества закрученных потоков и обладающих повышенной надежностью. Для решения этой задачи весьма актуальной является проблема создания универсальных инженерных методов расчетного моделирования сложных закрученных течений в каналах с завихрителями различной геометрии. Целесообразность разработки таких методов связана с практической необходимостью сравнения влияния различных типов завихрителей на гидродинамику и теплообмен в каналах, определения оптимальной геометрии завихрителей и получения надежных количественных оценок теплоэнергетической эффективности каналов с закручивающими устройствами. Решению этих вопросов и посвящена настоящая работа.

1.2. Виды завихрителей и их применение для интенсификации теплообмена

По современной классификации методов интенсификации теплообмена [24–28] закрутка потока в каналах, создаваемая с помощью закручивающих устройств, относится к *пассивным* методам интенсификации, т. е. не требует дополнительного подвода энергии извне в отличие от *активных* методов, к которым относятся, например, такие, как вибрация теплообменной поверхности или жидкости, воздействие электростатического, акустического или магнитного полей, перемешивание жидкости или вращение поверхностей теплообмена, вдув или отсос рабочей среды через пористую поверхность.

Закрутка потока в каналах может обеспечиваться не только специально предназначенными для этого закручивающими устройствами, такими, как скрученные ленты, шнеки, устройства для тангенциального подвода теплоносителя или аксиально-лопаточные завихрители, но и другими методами, также отнесенными в классификациях Р.Л. Вебба [26] и А.Е. Берглеса [27] к пассивным: оребрением, развитием и профилированием поверхностей, винтовыми вставками, накатками, навивками и т. п. (см. рис. 1, 2). В промышленности и энергетике пассивные методы интенсификации теплообмена занимают ведущую роль. Это обусловило широкое распространение в технике способа интенсификации теплообмена с помощью закручивающих элементов различной геометрии.

Ретроспективный взгляд на развитие пассивных методов интенсификации теплообмена позволил А.Е. Берглесу в работе [27] выделить три поколения «тепловой технологии» («heat transfer technology»). К первому поколению относятся гладкие каналы. Развитие «тепловой технологии» во втором поколении связано с использованием двухмерных интенсифицирующих устройств с размерами, соизмеримыми с масштабами каналов. «Тепловая технология» последнего, третьего поколения дает улучшенную интенсификацию и обеспечивается устройствами, имеющими трехмерную геометрию (трехмерные шероховатости, выступы, вставки) и уменьшенные или даже микромасштабы.



I
Рис. 1

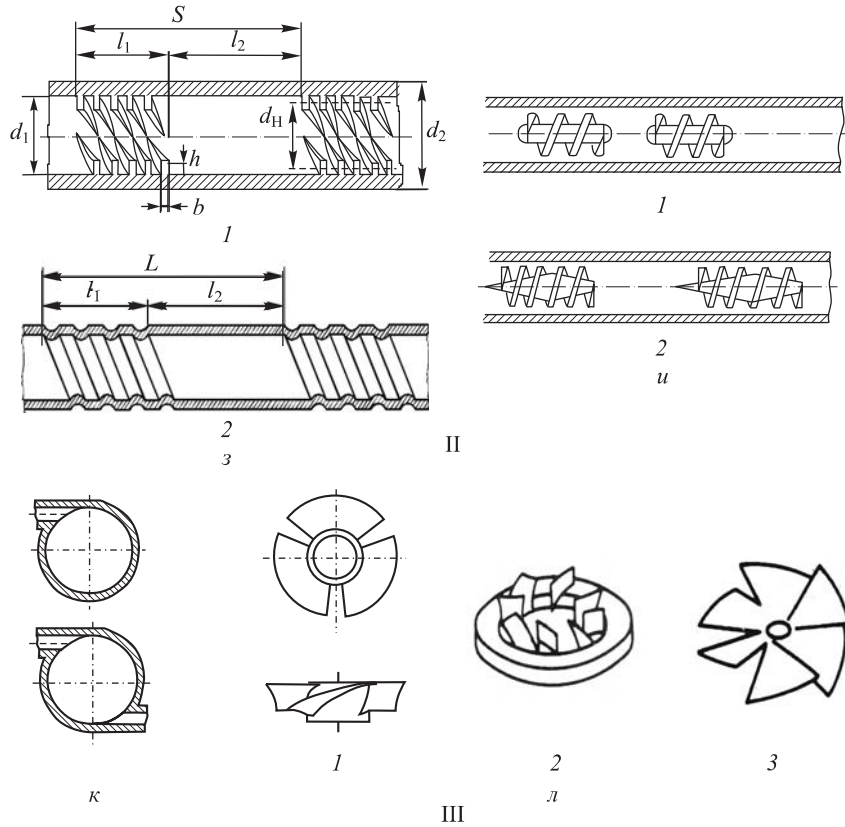


Рис. 1. (Продолжение) Типы завихрителей, используемых в трубах: I — непрерывные по длине: а — скрученная лента с постоянным шагом закрутки, б — пластинчатая спиральная вставка, в — проволочная навивка, г — винтовое оребрение, д — трубы с однозаходной (1) и многозаходной (2) спиральной накаткой, е — винтовая вставка из скрученной ленты с переменным шагом, ж — шнек; II — периодически расположенные: з — каналы с развитыми поверхностями в виде периодического спирального оребрения (1) или накатки (2), и — завихрители в виде шнековых вставок с постоянным (1) и переменным (2) диаметром центрального тела, III — локальные: к — тангенциальные завихрители с одним и двумя подводными каналами, л — аксиально-лопаточные завихрители с профилированными (1), (2) и плоскими (3) лопатками

К особой категории устройств третьего поколения следовало бы отнести и закручивающие устройства, лишь в незначительной степени перекрывающие проходное сечение каналов: локальные, периодические или непрерывно расположенные завихрители. Они обладают преимуществами устройств третьего поколения, но могут быть выделены в особую группу, так как их объединяет отличительный признак —

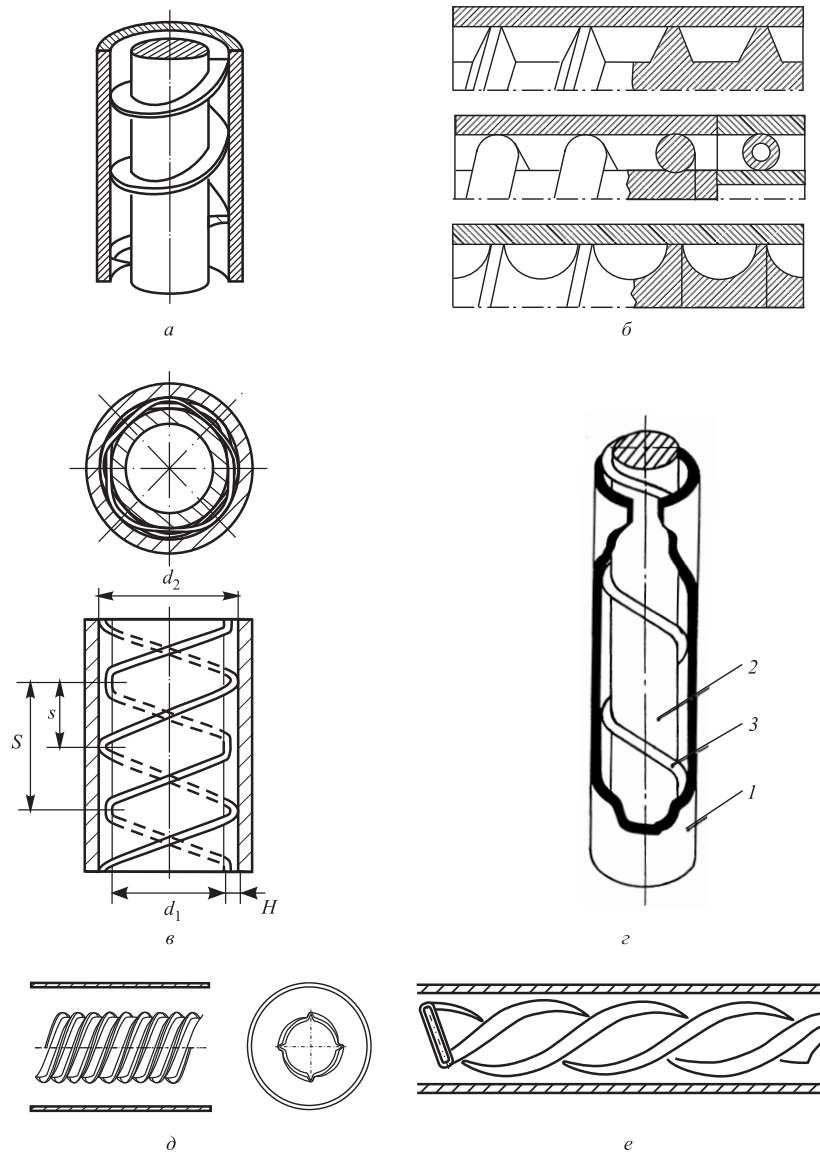


Рис. 2. Примеры кольцевой геометрии каналов с закручивающими устройствами: *a* — канал, полностью перегороденный однозаходной ленточной вставкой, *б* — каналы с завихрителями шнекового типа, *в* — канал сборки кольцевых твэлов с двухзаходной дистанционирующей спиралью, *г* — парогенерирующий канал (*1, 2* — тепловыделяющие элементы, *3* — закручиватель), *д* — кольцевой канал, образованный гладкой и спирально гофрированной трубами, *е* — внешнее обтекание винтообразно закрученной профильной трубы в круглом канале

создаваемая ими закрутка потока или направленный дополнительный конвективный перенос импульса, массы и энергии в тангенциальном направлении, что может положительно влиять на повышение теплоэнергетической эффективности и надежности работы каналов.

Описание разнообразных конструкций закручивающих устройств приводится в работах [6, 7, 16, 17, 26, 27], а также в аналитических обзорах В.К. Мигая [28], Г.А. Дрейцера [29], В.М. Будова и С.М. Дмитриева [30], посвященных проблемам интенсификации теплообмена в каналах. Закручивающие устройства в этих работах классифицированы по различным принципам: способам организации закрутки [6, 7], геометрическим особенностям [28, 30], функциональной принадлежности [26, 27], механизму влияния на тепломассообмен в каналах [17]. В силу того, что наибольшее распространение в технике имеют каналы, ограниченные цилиндрическими поверхностями, объектами рассмотрения в настоящем обзоре являются *трубы и кольцевые каналы с закручивающими устройствами различной геометрии*. Отвлекаясь от классификационных отличий и принимая для краткости терминологию, используемую в работах [5, 7], в дальнейшем изложении для обозначения любых устройств или элементов рельефа поверхности, которые придают потоку вращательную составляющую скорости, будем использовать термин *завихрители*. Примеры использования завихрителей в трубах и кольцевых каналах представлены на рис. 1 и 2.

Закрутка потока, создаваемая в каналах большой протяженности в целях интенсификации теплообмена, технологически наиболее просто осуществляется с помощью непрерывных по длине завихрителей (рис. 1-1, рис. 2). К этой категории завихрителей относятся скрученные ленты (рис. 1, *а, е*) и шнековые вставки (рис. 1, *ж*, рис. 2, *а, б*) характерные размеры которых соответствуют поперечным размерам каналов, т. е., как говорилось выше, устройства тепловой технологии второго поколения [27], широко использующиеся в технике достаточно длительный период времени. Благодаря этому накоплен обширный экспериментальный материал по изучению влияния такого типа завихрителей на гидродинамику и теплообмен в каналах, а также получены эмпирические расчетные зависимости, обобщающие многочисленные опытные данные [5–7, 16, 26, 28].

Массовые исследования, предпринятые в начале 1960-х годов, имели целью показать, что скрученные ленты могут быть использованы в качестве дешевого и эффективного средства усовершенствования каналов трубчатых теплообменников, ЯЭУ, энергетического и теплообменного оборудования, работающих при повышенных тепловых нагрузках в режимах турбулентного одно- и двухфазного течения теплоносителя. По современным представлениям теплогидравлическая эффективность применения закручивающих вставок, полностью перекрывающих ширину канала, при турбулентных режимах течения значительно уступает эффективности спирального оребрения с небольшой высотой

выступов. Это связано с тем, что в турбулентном потоке основное термическое сопротивление сосредоточено в узком пристенном слое, поэтому обеспечить закрутку и турбулизацию потока вблизи поверхности энергетически более выгодно, чем по всему сечению канала. Область термического сопротивления в ламинарном потоке не ограничена узкой пристенной зоной, а распределена по всему сечению канала, поэтому закручивающие устройства, воздействующие на поток по всему сечению канала, более эффективны при ламинарном режиме течения, чем при турбулентном, и используются, как правило, в однофазных потоках [26].

Применение завихрителей с характерными размерами, меньшими, чем поперечные размеры каналов (рис. 1, *г*, *д*, *з*, рис. 2, *д*), подразумевает использование трех механизмов интенсификации теплообмена: дополнительной турбулизации пристенной области за счет наличия отрывных зон в области расположения завихрителей, закрутки потока и эффекта увеличения площади теплообмена за счет оребрения или профилирования поверхности. Использование завихрителей, не имеющих полного термического контакта с теплообменной поверхностью, таких, как проволочные навивки, полосовые закручиватели (рис. 1, *а–в*), если они при этом не выполняют каких-то дополнительных функций, менее выгодно с точки зрения теплогидравлической эффективности, чем использование спирального оребрения (рис. 1, *г*, *з* (1)) или спирально профилированных поверхностей (рис. 1, *д*, *з* (2)), так как в первом случае действуют два из упомянутых механизмов интенсификации теплообмена (закрутка и вихревое смещение в пристенной области), а во втором все три.

Весьма распространенный способ интенсификации теплообмена с помощью так называемой регулярной шероховатости подразумевает преимущественное действие только одного механизма интенсификации, а именно, уменьшение термического сопротивления за счет разрушения и турбулизации вязкого подслоя.

Локальная закрутка потока осуществляется с помощью аксиально-лопаточных (рис. 1, *л*) или шнековых (рис. 1, *ж*) завихрителей, путем тангенциального ввода жидкости через один или несколько периферийных подводов (рис. 1, *к*), а также посредством улиточных завихрителей или тангенциально-лопаточных устройств [6, 7, 31]. Аксиально-лопаточные завихрители создают широкие возможности формирования скоростных полей, отличающихся степенью закрутки потока на входе в канал. Разновидности завихрителей шнекового типа (рис. 2, *б*) обычно используются для создания закрутки потока с углом больше 45° .

При необходимости регулирования интенсивности начальной закрутки без изменения расхода рабочего тела, протекающего через канал, поток разделяют на две части, одна из которых проходит через закручивающее устройство, а другая закрутке не подвергается. Изменение интенсивности закрутки потока обеспечивается за счет измене-

ния соотношения проходных сечений закрученного и незакрученного потоков [6, 7, 31].

В настоящее время большое внимание уделяется повышению экономической эффективности более сложных технологий производства теплообменного оборудования, связанных с мелкомасштабным профилированием внутренней и внешней поверхностей труб. Примеры таких каналов с развитой поверхностью в виде спирально-ребристой шероховатости, спирального рифления и гофрирования представлены на рис. 3. Двустороннее профилирование поверхностей обеспечивает интенсификацию теплообмена на обеих поверхностях каналов.

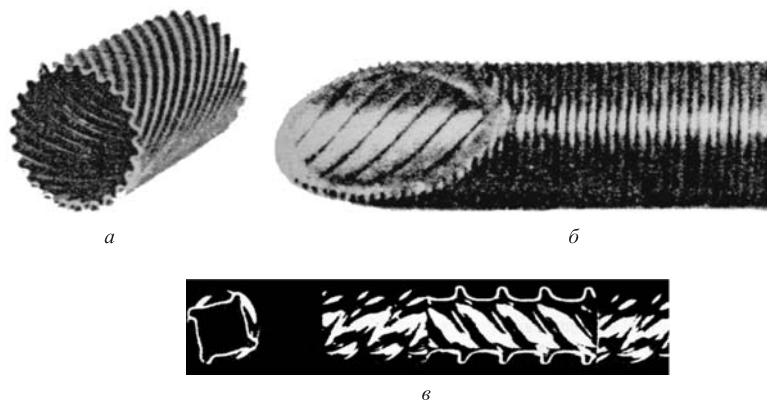


Рис. 3. Интенсифицированные каналы с развитыми поверхностями: *а* — спирально рифленая стальная труба, *б* — труба с внутренней 10-заходной спирально-ребристой и внешней ребристо-шероховатой поверхностями (Wolverine Turbo-Chil tube), *в* — спирально гофрированная труба. (Из обзора Р. Вебба [26])

Большинство из всех показанных на рис. 1–3 завихрителей применимы как для однофазного, так и для двухфазного течения рабочих сред. Исключение для использования при двухфазном течении потока могут составлять завихрители, приводящие к закрутке потока вблизи выпуклой поверхности кольцевых каналов, образованных трубчатыми твэлами в тепловыделяющих сборках (ТВС) ядерных реакторов. В этом случае закрутка потока негативно влияет на тепловой режим ТВС, снижая критическую тепловую нагрузку. Исследования, выполненные в ФЭИ Э.А. Болтенко, позволили усовершенствовать конструкцию парогенерирующего канала с дистанционирующей спиралью, полностью перекрывающей проходное сечение канала (рис. 2, *з*). Для интенсификации теплосъема в парогенерирующих устройствах им был предложен способ предотвращения закрутки потока вблизи выпуклой поверхности с помощью организации транзитного потока, текущего вдоль этой поверхности и взаимодействующего с основным закрученным потоком [32].

Наряду со случаями, когда закрутка потока создается преднамеренно как средство интенсификации процессов теплообмена, она может возникать в элементах конструкций теплоэнергетического оборудования и как побочное явление. Например, в межтрубном пространстве теплообменников и парогенерирующих каналов с витыми трубами (рис. 4), при дистанционировании кольцевых твэлов (рис. 2, *в*) или

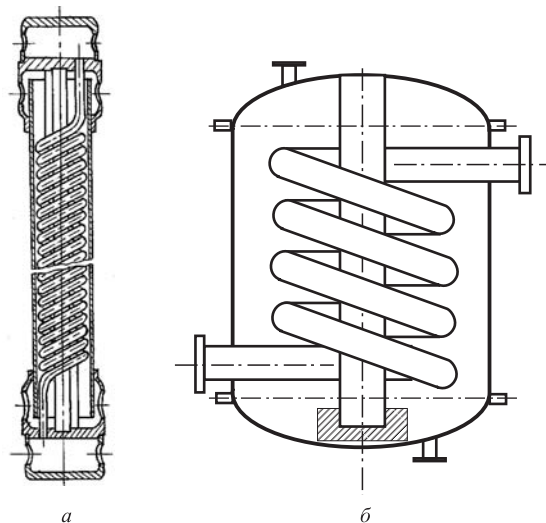


Рис. 4. Осуществление теплосъема при обтекании спирально витых труб в кольцевой области течения теплоносителя: *а* — модуль змеевикового парогенератора, *б* — схема теплообменника с витой трубой

при внешнем обтекании винтообразно закрученных профилированных труб (рис. 2, *е*). Учет поперечной циркуляции потока в этих случаях позволяет более точно оценить температурный режим установок.

В атомной энергетике использование теплопередающих поверхностей, выполненных в виде витых труб или змеевиков, остается весьма привлекательным для создания более компактных теплообменных аппаратов не только в энергоустановках с газоохлаждаемыми реакторами [33], но и с водо-водяными и быстрыми реакторами [34]. В работе [34] рассмотрена возможность использования змеевиков малого диаметра навивки в жидкометаллических теплообменных аппаратах в качестве парогенерирующих элементов (рис. 4, *а*). Высокая теплонапряженность змеевиковых парогенерирующих каналов обуславливает возможность создания мультимодульной конструкции парогенератора, обладающей повышенной безопасностью. Теплообменники с витыми трубами обладают рядом преимуществ по сравнению с конструкциями прямотрубных теплообменников. За счет спиральной формы обтекаемой поверхности происходит компенсация температурных удлинений.

Применение однорядных крутозагнутых змеевиков (рис. 4, а, б) позволяет упростить конструкцию теплообменника, исключив необходимость применения металлоемких трубных досок, а также повысить интенсивность теплообмена вследствие преимущественно поперечного обтекания трубного пучка. Вторичные течения в змеевиковых трубах обеспечивают увеличение коэффициентов теплоотдачи для однофазных потоков и для большинства режимов двухфазного течения. Однако для достижения заметного уровня интенсификации теплообмена внутри змеевиковых каналов требуется максимальное уменьшение диаметра изгиба труб [35].

Сфера применения закручивающих устройств для интенсификации теплообмена весьма широка и охватывает различные области технического использования: в активных зонах и теплообменном оборудовании ЯЭУ и АЭС, в теплообменниках турбокотлоагрегатов (воздухоподогревателях, экономайзерах, парогенерирующих каналах, калориферах, перегревателях, конденсаторах), в теплообменном оборудовании ракетной и аэрокосмической техники, в теплообменных устройствах систем кондиционирования, в теплообменных и технологических аппаратах химической и нефтеперерабатывающей промышленности и т. д.

1.3. Физические особенности турбулентных закрученных потоков в каналах с завихрителями

1.3.1. Вопросы терминологии

Определение понятия «закрученный поток». В научно-технической литературе термин «закрученные потоки» получил весьма широкое распространение, хотя само это понятие является скорее описательным, чем точным, ввиду отсутствия его строгого определения, и может трактоваться по-разному. Изложение предлагаемого в настоящей работе материала поэтому следует начать с определения того класса течений, к которым принадлежат закрученные потоки в каналах с завихрителями.

Прежде всего в данной работе речь пойдет об *однофазных потоках вязких несжимаемых жидкостей*, которые соответствуют процессу вынужденной конвекции в энергонапряженных каналах ядерно-энергетических установок и теплообменного оборудования. Необходимость обеспечения надежного теплоотвода в условиях больших тепловых нагрузок связана с реализацией *турбулентного режима* течения в каналах в целях получения высоких коэффициентов теплоотдачи. Генерация закрутки потока с помощью различных закручивающих устройств, как уже говорилось выше, способствует интенсификации теплообмена и выравниванию температурных неравномерностей в каналах. Не вдаваясь в детали классификаций ограниченных закрученных потоков, приводимые различными авторами [6–9], выделим типы закрученных

потоков в каналах, соответствующие основным типам завихрителей, описанным в предыдущем разделе (п. 1.2). Это а) затухающие закрученные потоки, которые имеют место в свободных каналах за расположенными на входе завихрителями (рис. 1-III), б) закрученные потоки, в которых постоянный уровень интенсивности закрутки формируется и поддерживается с помощью завихрителей на всем протяжении канала (рис. 1-I, 2) и в) закрученные потоки в каналах с периодически расположенными завихрителями, особенностью которых является существенно неустановившийся характер течения: закрутка потока нарастает на участках, где расположены завихрители и затухает в промежутках между ними (рис. 1-II). Из всех этих типов закрученных течений в каналах наиболее изученными являются затухающие закрученные течения. В настоящей же работе основное внимание уделено расчетному моделированию последних двух типов закрученных потоков.

Использование термина «закрученный поток» при рассмотрении процессов гидродинамики и теплообмена в каналах с завихрителями всех типов указывает на две характерные особенности течения: движение жидкости в канале является *вихревыми циркуляционным (вращательно-поступательным)* одновременно, т. е. характеризуется локальной завихренностью ω и крупномасштабной поперечной циркуляцией потока, обусловленной наличием тангенциальной компоненты скорости, соизмеримой с расходной скоростью в канале.

Следует обратить внимание на то, что *вихревой поток*, т. е. поток с отличной от нуля *завихренностью* $\omega \equiv 1/2 \operatorname{rot} \mathbf{u} \neq 0$ в каждой точке поля течения, в общем случае не является закрученным. Например, установившееся и неустановившееся течение вязкой жидкости в канале при ламинарном и турбулентном режимах течения является вихревым, так как в любой точке потока будет выполняться условие $\operatorname{rot} \mathbf{u} \neq 0$. При этом при прямолинейном движении жидкости вращательная (тангенциальная) компонента осредненной скорости течения отсутствует.

В то же время можно указать вращающиеся течения, для которых $\operatorname{rot} \mathbf{u} = 0$, т. е. *безвихревые циркуляционные* течения. Это слоистые течения типа течения Куэтта [36]. Такие течения являются *потенциальными (безвихревыми)* и могут существовать как в вязкой, так и в невязкой жидкости. Например, при вращении цилиндра в неограниченной жидкости или при течении между двумя вращающимися цилиндрами с определенным соотношением угловых скоростей вращения. В таких течениях радиальное распределение тангенциальной скорости u_ϕ соответствует закону $u_\phi = \operatorname{const}/r$.

Таким образом в настоящей работе термин *закрученный поток* используется по отношению к потоку, формирующемуся при вынужденном течении жидкости в каналах с завихрителями, и означает *ограниченное по поверхности канала внутреннее вращательно-по-*

ступательное вихревое течение жидкости¹⁾, характеризующееся отличной от нуля циркуляцией скорости в масштабе поперечного сечения канала.

Оценка интенсивности закрутки потока. Вопрос об оценке интенсивности закрутки потока в каналах также не является однозначным. Исторически сложилось так, что в начальный период исследований закрученных течений интенсивность закрутки потока в каналах связывали, как правило, с геометрическими параметрами завихрителей. Так, например, применительно к тангенциальным завихрителям центробежных форсунок Г.Н. Абрамовичем [37] была предложена так называемая *геометрическая характеристика*, которую можно рассматривать как критерий кинематического подобия поступательно-вращательно движущихся в диафрагмированной трубе потоков. В работе [31] этот критерий был обобщен на случай тангенциально-лопаточного, улиточного и аксиально-тангенциального завихрителей. Развернутая информация по определению *геометрических параметров закрутки* различных завихрителей дана в монографиях [7, 9]. Во многих экспериментальных работах степень закрутки потока оценивалась просто углом наклона закручивающих элементов, а в случае ленточных и шнековых завихрителей — значением относительного шага винтовой линии, по которой скручены эти элементы.

По мере накопления результатов экспериментов для обобщения экспериментальных данных стали использоваться разнообразные параметры, описанные в работах [6, 7, 31, 38], которые характеризуют соотношения между величинами максимальных или осредненных вращательной и осевой составляющих скоростей или отношение поверхностных касательных напряжений трения в тангенциальном и осевом направлениях. В последнем случае в рассмотрение вводится предельный угол закрутки потока на поверхности канала θ_w , определяемый соотношением $\operatorname{tg} \theta_w = \tau_{\phi w} / \tau_{zw}$, где $\tau_{\phi w}$, τ_{zw} — проекции поверхностного напряжения трения в угловом и продольном направлениях. Считая, что в пристенной области угол закрутки потока слабо изменяется по радиусу канала [6], принимают, что $\operatorname{tg} \theta_w \approx u_\phi / u_z$, где u_ϕ , u_z — измеряемые в экспериментах составляющие скорости потока в пристенной области.

По научным публикациям можно отметить, что, начиная приблизительно с середины 1960-х годов, для оценки интенсивности закрутки начали использовать интегральные параметры, характеризующие относительную величину потока импульса в тангенциальном направлении. Различные модификации этих параметров подробно описаны в монографиях [6, 7, 9, 18].

¹⁾ Под термином «жидкость», как это принято в механике сплошных сред, будем подразумевать и жидкость и газ (см. Л.Г. Лойцянский [85], стр. 14).

Весьма показательным параметром для оценки интенсивности закрутки также может являться циркуляция скорости $\Gamma \equiv \int_S (\mathbf{\omega n}) dS = \oint_C (\mathbf{u e}_\phi) dC = 2\pi r u_\phi$, где S — площадь поперечного сечения круглого канала, $\mathbf{\omega}$ — вектор завихренности, \mathbf{n} — вектор единичной нормали к площадке S , \mathbf{u} — вектор скорости потока, \mathbf{e}_ϕ — единичный вектор в тангенциальном направлении, C контур циркуляции скорости. Этот параметр используется, например, в работах [4, 8, 39, 40].

Такое разнообразие параметров и отсутствие единого метода оценки интенсивности закрутки потока при использовании различного типа закручивающих устройств существенно затрудняло сопоставление результатов исследований гидродинамики и теплообмена в каналах с завихрителями. Это не могло не привести к тому, что определенные усилия были направлены на поиски универсального параметра, наилучшим образом характеризующего особенности локальной структуры закрученного потока и его интегральные свойства. Как показано в работах [6, 7, 38], на основе большого объема накопленных экспериментальных данных удалось провести сравнительный анализ, в результате которого был выявлен единый параметр, наиболее полно выражающий основные особенности закрученных потоков независимо от способа их генерации.

Таким параметром является *интегральный параметр закрутки* Y (параметр Хигера – Бэра [41]), служащий для характеристики интенсивности закрутки потока в каналах с переменным по радиусу полем скорости и определяемый как отношение осевой составляющей потока момента импульса $M = 2\pi \int_0^R \rho u_\phi u_z r^2 dr$ к произведению осевой составляющей потока импульса $K = 2\pi \int_0^R \rho u_z^2 r dr$ на радиус канала R :

$$Y = \frac{\int_0^R \rho u_\phi u_z r^2 dr}{R \int_0^R \rho u_z^2 r dr} = \frac{M}{RK}. \quad (1.1)$$

Определение интегрального параметра закрутки Y для каналов кольцевой геометрии соответствует зависимости (1.1) с заменой нижнего и верхнего пределов интегрирования в выражениях для M и K соответственно радиусами внутренней и внешней поверхностей канала, при этом в знаменателе формулы (1.1) вместо R берется радиус внешней (вогнутой) поверхности кольцевого канала.

По своей сути интегральный параметр закрутки Y характеризует относительную величину потоков импульса, переносимых в угловом и продольном направлениях, и именно этот параметр в настоящее время используется в абсолютном числе публикаций, посвященных исследованию закрученных потоков. Более сложные модификации интегрального параметра закрутки, учитывающие вклад сдвиговых рей-

нольдсовых напряжений в выражение для осевой составляющей потока момента импульса M и нормальных рейнольдсовых напряжений и давления в выражение для осевой составляющей потока импульса K [9, 18], не получили широкого распространения, так как являются трудно определяемыми и громоздкими, к тому же поправки, вносимые учетом рейнольдсовых напряжений в большинстве случаев оказываются пренебрежимо малы.

Весьма интересным оказался тот факт, что для закрученных течений существуют общие закономерности, связанные с влиянием интенсивности закрутки потока на формирование полей скорости и давления в канале.

1.3.2. Основные закономерности закрученных течений.

Связь интенсивности закрутки потока с формированием поля скорости закрученного течения в канале

На основании большого числа экспериментальных исследований затухающих закрученных течений [6, 7, 42, 43] и др. установлено, что при использовании завихрителей различной геометрии лишь на незначительном по протяженности участке, расположенном непосредственно за завихрителем и имеющем длину z^* от половины до пяти калибров канала для различных завихрителей ($z^* = (0,5-5)d$, где d — характерный размер канала), распределение составляющих скорости, статического и полного давления определяется способом закрутки и геометрическими параметрами завихрителя. На основном же участке течения закрученного потока¹⁾ профили осевой u_z и вращательной u_ϕ компонент скорости, а также радиальное распределение других локальных параметров закрученного течения не зависят от способа начальной закрутки, а определяются только ее интенсивностью, характеризуемой обычно интегральным параметром закрутки Y (1.1). При этом существует пороговая величина интегрального параметра закрутки Y^* , начиная с которой при $Y > Y^*$ профиль окружной скорости можно разделить на две зоны (см. рис. 5): 1 — зону квазитвердого вращения (или «вынужденного» вихря) и 2 — зону квазипотенциального течения (или зону «свободного вихря» — течения с постоянной циркуляцией $\Gamma = u_\phi r = \text{const}$).

При $Y < Y^*$ максимальное значение окружной скорости достигается вблизи стенки (за пределами вязкого подслоя). Согласно опытным данным различных авторов [6, 7, 9, 42], значение Y^* оценивается приблизительно в интервале $0,23 < Y^* < 0,30$, хотя теоретический критерий оценки значения пороговой величины интегрального параметра закрутки Y^* в литературе отсутствует.

¹⁾ Основной участок соответствует расстояниям $z^* < z < z^{**}$, где z^{**} — длина, на которой происходит затухание закрученного течения под действием сил трения в гладком канале. Для турбулентных режимов течения длина z^{**} может быть определена уравнениями (2.1)–(2.2) работы [6].

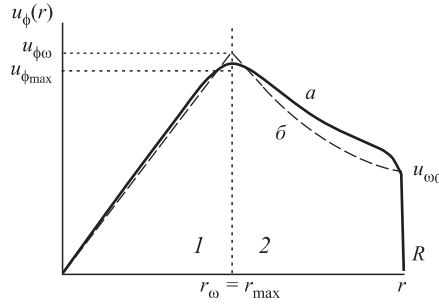


Рис. 5. Распределение окружной скорости закрученного потока в трубе при интенсивности закрутки $Y > Y^*$: a — типичное распределение реальной скорости, b — идеализированный профиль; 1 — зона квазитвердого вращения с угловой скоростью $u_\phi = \omega r$ ($0 < r < r_\omega$), 2 — зона квазипотенциального течения ($r_\omega \leq r \leq R$)

На рис. 5 схематически представлены идеализированный профиль окружной скорости, соответствующий скоростному распределению в классическом вихре (пунктир), и реальный профиль $u_\phi(r)$ при интенсивности закрутки $Y > Y^*$ (сплошная линия).

Распределение окружной скорости в идеализированном вихре описывается зависимостями:

$$u_\phi = \begin{cases} \omega r & \text{при } 0 < r < r_\omega, \\ \frac{u_{\phi\omega} r_\omega}{r} & \text{при } r_\omega \leq r \leq R, \end{cases} \quad (1.2)$$

где ω — угловая скорость в области квазитвердого вращения, r_ω — радиус, соответствующий максимальной окружной скорости $u_\phi = (u_{\phi\omega} r_\omega)/r$ и определяющий границу между областями 1 и 2 .

Экспериментально наблюдаемое распределение скорости $u_\phi(r)$ имеет более сглаженный максимум по сравнению с идеализированным профилем ($u_{\phi\max} < u_{\phi\omega}$), хорошо согласуется с квазитвердым характером вращения в центральной области канала 1 и несколько отличается от закономерности потенциального (безвихревого) течения в зоне 2 . В работах [6, 39] отмечается, что вместо условия постоянства циркуляции в области между максимальным значением скорости и вязким подслоем наблюдается ее небольшой рост по радиусу канала с максимумом вблизи его поверхности. Наиболее часто опытные данные по измерению реального профиля тангенциальной скорости аппроксимируются эмпирическими зависимостями, построенными по типу комбинированного вихря Рэнкина или Бюргера:

$$u_\phi(r, z) = u_\phi(R, z) \frac{R}{r} \left(1 - e^{-B(z)(r/R)^2} \right), \quad (1.3)$$

при этом для описания множителя $B(z)$ в показателе экспоненты используются самые различные эмпирические зависимости от константы (как, например, в работе [44]) до сложной функции, параметром в которой служит интегральный параметр закрутки Y (1.1), как это сделано в работе [45], где для $B(z)$ получено выражение:

$$B(z) = 0,89 + 0,75Y^{0,5} \exp(-2,4Y). \quad (1.4)$$

Поскольку Y соответствует локальному распределению осевой $u_z(r, z)$ и окружной $u_\phi(r, z)$ компонент скорости в каждой точке z , то такой подход приводит к неявному описанию профиля тангенциальной скорости и требует основательного экспериментального подтверждения.

Проведенный В.К. Шукиным и А.А. Халатовым [6, 7] анализ большого массива экспериментальных данных по структуре затухающих закрученных потоков на основном участке течения, полученных при различных способах начальной закрутки, позволил также выявить однозначную связь интегрального параметра закрутки Y с предельным углом закрутки потока на поверхности канала θ_w .

В подтверждение этого факта можно также привести результаты, полученные японскими авторами Сено и Нагата в работе [42]. В ней отмечается, что соотношение между углом закрутки потока на стенке и интегральным параметром закрутки должно зависеть от радиального распределения скорости. Естественно предположить, что, поскольку реальный профиль окружной скорости $u_\phi(r)$ является комбинацией свободного и вынужденного вихрей, значения Y для реального профиля должны располагаться между двумя предельными значениями параметра Y , вычисленными для случаев, когда все сечение канала занято только свободным или только вынужденным вихрем.

На рис. 6 представлено сравнение зависимостей интегрального параметра закрутки Y от локального угла закрутки на стенке θ_w , полученных для этих предельных случаев с экспериментальными данными для закрученного потока воздуха в трубе с различной степенью шероховатости поверхности при турбулентном режиме течения ($Re = (1,50-1,85) \cdot 10^5$). Для определенного угла закрутки потока на стенке θ_w минимальное значение интегрального параметра закрутки соответствует кривой, полученной для распределения скорости в виде вынужденного вихря (кривая 1), а максимальное — кривой, полученной для распределения скорости в виде свободного вихря (кривая 2).

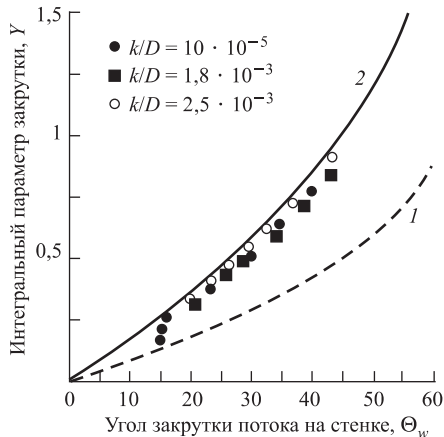


Рис. 6. Связь между интегральным Y и локальным θ_w параметрами закрутки: 1 — зависимость $Y_{вв} = 0,5 \operatorname{tg} \theta_w$, соответствующая вынужденному вихрю, 2 — зависимость $Y_{св} = \operatorname{tg} \theta_w$, соответствующая свободному вихрю, значками обозначены значения Y , соответствующие экспериментальным данным при различном отношении высоты выступов шероховатости k к внутреннему диаметру трубы D

Эксперименты показали, что для любой величины поверхностного трения, соответствующего различному уровню шероховатости поверхности, закон вращения жидкости в канале при интенсивности закрутки $Y > 0,3$ приближается к закону вращения свободного вихря и интенсивность закрутки реального потока составляет $\sim 85\%$ от интенсивности закрутки в свободном вихре $Y_{св}$ при одном и том же угле закрутки на стенке, т. е. $Y = 0,85Y_{св} = 0,85 \operatorname{tg} \theta_w$, тогда как при слабой закрутке потока при снижении Y до значений $0,2$ и ниже происходит переход к закономерности квазитвердого вращения с постепенным затуханием закрутки до нуля. В работе [6] для связи Y и θ_w при обобщении опытных данных по аксиально-лопаточным завихрителям получена очень близкая зависимость:

$$\operatorname{tg} \theta_w = 1,13 \cdot Y^{0,82}, \text{ что соответствует } Y = 0,86(\operatorname{tg} \theta_w)^{1,2}. \quad (1.5)$$

Действие сил инерции при превышении порогового значения интенсивности закрутки приводит к существенному отличию профилей продольной и полной скорости, а также поля давления в закрученном потоке жидкости от распределения этих характеристик в незакрученном потоке, что характерно как для ламинарного, так и для турбулентного режимов течения.

Важнейшим свойством внутренних закрученных течений с высокой интенсивностью закрутки при $Y > Y^*$ является возникновение области рециркуляционного течения в приосевой части канала. Из уравнения неразрывности для осесимметричных потоков следует, что величина радиальной составляющей скорости u_z связана с интенсивностью изменения осевой скорости u_z по продольной координате. Эксперименты и расчетные оценки показывают [6, 7], что для рабочих режимов течения в каналах с завихрителями во всей области течения за исключением очень тонкого пристеночного слоя величина радиальной компоненты скорости на порядок и более ниже по абсолютному значению, чем осевая и тангенциальная скорости. При малой величине радиальной составляющей скорости из закона сохранения импульса следует, что в любой точке потока имеет место приблизительное локальное равновесие радиального градиента давления и центробежной силы:

$$\frac{\partial P}{\partial r} \approx \rho \frac{u_\phi^2}{r}. \quad (1.6)$$

Значительный радиальный градиент давления, обусловленный величиной тангенциальной составляющей скорости (1.6), становится причиной возникновения области обратного (рециркуляционного) течения. Такое течение с отрицательной осевой скоростью u_z имеет место в приосевой зоне канала, где, как говорилось выше, наблюдается закономерность квазитвердого вращения. При этом максимальные значения осевой и суммарной скоростей располагаются в периферийной области цилиндрического канала и значительно превосходят среднерасходное значение скорости.

При уменьшении интенсивности закрутки, которое в затухающем закрученном потоке происходит по мере удаления от завихрителя под действием сил трения, осевая u_z и суммарная u скорости потока в периферийной области уменьшаются, а в приосевой зоне возрастают, область обратного течения постепенно вырождается, преобразуясь в «провал», характерный для течения за плохообтекаемым телом. Одновременно происходит уменьшение тангенциальной скорости $u_\phi(r)$, причем вначале уменьшение более заметно выражено в периферийной области канала (области 2 на рис. 5), а при дальнейшем снижении интенсивности закрутки — в центральной области (области 1). Это приводит к постепенному вырождению максимума вращательной скорости и формированию профиля «квazitвердого вращения» во всем сечении канала.

При интенсивной закрутке потока существуют области положительного и отрицательного избыточного давления (по отношению к давлению на выходе из канала) и отмечается существенный перепад давления между стенкой канала и его осью. В процессе затухания закрутки статическое давление в периферийной области канала уменьшается, а в приосевой возрастает, при этом радиус его нулевого значения постепенно смещается к оси канала, что приводит к выравниванию профиля давления. Таким образом, течение затухающего закрученного потока характеризуется наличием областей потока с противоположными продольными градиентами статического давления: отрицательным в области 2 и положительным в области 1 (рис. 5). Следует отметить, что в отличие от незакрученных течений знаки градиентов скорости и давления в затухающих закрученных потоках совпадают между собой.

Ключевыми параметрами, по которым обычно проводится обобщение и сопоставление экспериментальных данных по структуре затухающих закрученных течений, являются: радиус максимального значения тангенциальной скорости r_{\max} , максимальное значение тангенциальной скорости $u_{\phi \max}$, максимальное значение циркуляции тангенциальной скорости $\Gamma_{\max} = u_{\phi_0} R$, радиус нулевого значения избыточного давления r_{p0} и коррелирующий с ним радиус зоны обратных токов (зоны рециркуляции) $r_{\text{обр}}$. На основе обобщения результатов обширных экспериментальных исследований различных авторов в работах [6, 7] для всех перечисленных выше параметров получены эмпирические зависимости от интегрального параметра закрутки Y (1.1):

— при $Y > 0,5$ значение r_{\max} определяется уравнением

$$r_{\max} = 0,56RY^{0,69}, \quad (1.7)$$

в интервале $0,23 < Y < 0,5$ величина r_{\max} сохраняется приблизительно на постоянном уровне, равном 0,35–0,37, при $0,17 < Y < 0,23$ происходит вырождение максимума $u_\phi(r)$ и при $Y < 0,17$ изменение тангенциальной скорости практически соответствует закону квazitвердого вращения с максимумом вблизи поверхности канала;