

На правах рукописи



**Шишкин Николай Енинархович**

**АЭРОДИНАМИКА И ТЕПЛОМАССООБМЕН В ПРИСТЕННЫХ  
ЗАКРУЧЕННЫХ ОДНО- И ДВУХФАЗНЫХ СТРУЯХ**

Специальность 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Новосибирск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном Учреждении Российской академии наук Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
**Терехов Виктор Иванович**

Официальные оппоненты: **Кортиков Николай Николаевич**  
доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, профессор кафедры «Теплофизики, реакторы и котельные установки»;

**Солоненко Олег Павлович**  
доктор технических наук, профессор, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией «Плазмодинамика дисперсных систем»;

**Щукин Андрей Викторович**  
доктор технических наук, профессор, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, профессор кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения».

Ведущая организация: Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, г. Москва.

Защита состоится «23» сентября 2016 года в 11 - 00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д212.173.02 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте **www.nstu.ru**

Автореферат разослан «    » мая 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., профессор



Чичиндаев Александр Васильевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Развитие энергомашиностроения, ядерной энергетики, ракетной и многих других отраслей техники характеризуется повышением уровня температуры рабочих процессов в энергетических устройствах. Если термостойкость материалов обтекаемых поверхностей недостаточна для защиты от воздействия высокотемпературных или химически агрессивных газовых потоков, то в практике широко используются как газовые, так и газокапельные пристенные струи. Способы подачи охладителя могут быть самые различные, как через пористые участки, так и через щели в спутном, нормальном, либо во встречном направлении относительно основного потока.

К настоящему времени опубликованы многочисленные экспериментальные и аналитические исследования по эффективности газовых завес. Отметим работы Г. Н. Абрамовича, С. С. Кутателадзе, А. И. Леонтьева, Э. П. Волчкова, В. М. Репухова, R. A. Seban, R. J. Goldstein, S. C. Kacker, J. H. Whitelaw и многие др.

Кольцевая закрученная струя может более активно управлять пограничным слоем, изменять аэродинамические характеристики проточной части, обеспечивает интенсивную перестройку к устойчивому движению. Закрутка периферийного потока широко используется в плазмотронах с вихревой стабилизацией дуги, для тепловой защиты ограничивающей стенки; в вихревых горелках, форсунках и камерах сгорания для устойчивого горения. Перспективно использование закрученных потоков для охлаждения лопаток газовых турбин, в предсопловых объемах ракетных двигателей, в циклонных аппаратах.

Некоторые особенности структуры течения в полях массовых сил рассмотрены в работах М.А. Гольдштика, А.П. Меркулова, В.К. Щукина, А.А. Халатова, Н.Н. Кортикова, А.К. Gupta, D.G. Lilley, N. Syred, N.A. Chigier и др. Имеется ряд экспериментальных работ, в которых исследовалось смешение коаксиальных потоков (Р. Лянэ, Ю. Иванов, Е.П. Сухович и др.). Однако полученные результаты не дают полной картины всех особенностей ограниченного течения, влияния закрутки периферийного потока на интенсивность струйного перемешивания.

Газокапельные струи широко используются в различных отраслях промышленности, например, при напылении, распыле капель топлива, в системах кондиционирования воздуха, защите рабочих поверхностей. Использование для этих целей скрытой теплоты фазового перехода при испарении жидких капель позволяет значительно увеличить интенсивность теплообмена. Имеется обширный теоретический и экспериментальный материал по двухфазному охлаждению. Следует отметить труды Ю. В. Полежаева, Ф. Б.

Юревич, В. М. Репухова, А. И. Недужко, В. И. Терехова, М. А. Пахомова, А. В. Чичиндаева, Е. Talmor, N. Weber и многие другие.

Ряд технологических процессов в химической промышленности и энергетике связаны с поглощением газов жидкостями (абсорбцией) [С.В. Алексеенко, В.Е. Накоряков, Б.Г. Покусаев, Н.И. Григорьева, В.М. Рамм]. Межфазная поверхность для газочапельного потока может существенно превосходить поверхность раздела фаз в часто реализуемом в абсорберах пленочном режиме течения. Изучение абсорбции – десорбции, может также дополнить исследования тепло- и массообмена в ограниченном двухфазном потоке.

Большой класс задач возникает при испарении капель многокомпонентного состава в двухфазном потоке, осаждения их на обтекаемой поверхности. В зависимости от состава капель на поверхности возможно образование структурированных материалов микро- и наномасштабов, создание полимерных пленок. Испарение многокомпонентных жидкостей рассматривается во многих исследованиях, например, Ю.Ю. Тарасевича, Т.А. Яхно, В.Г. Яхно, С.С. Сажина, А.П. Крюкова и других. Горение капель сложного состава осуществляется при впрыске в двигателях внутреннего сгорания. Несмотря на широкое практическое использование, испарение капель, как многокомпонентного состава, так и бинарных растворов в газовом потоке исследовано слабо как экспериментально, так и теоретически.

Разработка надежных методов расчета тепломассопереноса при смешении основного потока с периферийным закрученным потоком представляет сложную термогазодинамическую задачу. Струйное взаимодействие зависит от степени закрутки и способа ввода вторичного потока в рабочий участок, от соотношения площадей подводящих каналов и толщины торцевой стенки, разделяющих два потока на входе, от режима течения, градиента плотности и других возмущающих факторов. Подвод капель во вторичный поток усложняет исследование и необходимость учета влияния также таких факторов как распределение размера частиц по размерам, их концентрацию и состав эжектируемой жидкости. Турбулентный перенос в двухфазном пограничном слое определяется характером взаимодействия коаксиальных потоков в зоне смешения, частиц между собой и осаждением капель на поверхности с образованием жидкой пленки.

Рассматривается ряд задач, которые по **степени разработанности** не удовлетворяют насущным требованиям фундаментальной науки и прикладным работам. Ранее была показана эффективность защиты с помощью гидродинамических способов охлаждения при обтекании плоских поверхностей, созданы методы расчета. Однако, влиянию процессов струйного смешения в приосевой области на эффективность охлаждения стенки в этих условиях не уделялось должного внимания. В имеющихся

публикациях показаны исследования лишь в узком диапазоне изменения основных параметров без необходимого обобщения для создания инженерных методов расчета аэродинамики течения в энергетических устройствах. Нами проработаны вопросы влияния на защиту поверхности в широком диапазоне параметров: неизотермичности потоков, интенсивности закрутки, геометрии входа, режима течения, концентрации жидкой фазы в пристенной струе. Данные об эффективности систем охлаждения, полученные в настоящей работе в адиабатических условиях, являются необходимыми при определении локальных коэффициентов теплообмена на стенке рабочих установок.

**Целью работы** является экспериментальное исследование эффективности закрученных газовых завес, охлаждение поверхности газочапельными струями и жидкими пленками; изучить аэродинамику струйного смешения; сопоставить десорбцию  $\text{CO}_2$  из газочапельных потоков и с жидких пленок; исследовать испарение капель, находящихся в потоке, как чистых жидкостей, так и водных бинарных растворов.

Для достижения поставленных целей **решались следующие задачи:**

– создание аэродинамического стенда для исследования закрученных завес, изготовление рабочих участков для тепловых опытов, для измерения концентрации инородных газов на стенке; участков и зондов для изучения аэродинамики течения, тепловых и турбулентных характеристик в области струйного смешения. Выбор способа закрутки периферийного потока, который обеспечивал бы различную интенсивность вращения, равномерность на входе рабочего участка. Исследование влияния на эффективность охлаждения геометрических граничных условий, режима течения, неизотермичности потоков, интенсивности закрутки пристенной струи. Анализ и обобщение результатов измерений.

– создание установки по исследованию газочапельных завес; системы распыла в пристенной струе; выбор методики и системы измерения для изучения теплофизических свойств двухфазного слоя смешения, характеристик осаждаемой жидкой пленки, десорбции углекислого газа из капель и с жидкости на поверхности канала; анализ влияния параметра вдува, концентрации жидких капель, неизотермичности на охлаждение газочапельной завесой и жидкой пленкой.

– исследование закономерностей интенсивности испарения капель бинарных смесей в струе воздуха; организация системы измерений и методики обработки результатов опытов; изучение влияния активных добавок на процессы межфазового перехода.

**Научная новизна.** 1. Комплексно исследована эффективность закрученной газовой и газочапельной завесы при турбулентном и ламинарном

режимах течения в зависимости от способа закрутки, геометрии входа в цилиндрический канал, неизотермичности потоков.

2. Впервые показано возникновение при наибольшей интенсивности закрутки периферийного потока вихревого прецессирующего цилиндра, отходящего от внутренней ограничивающей поверхности канала.

3. Вихревое движение, а также неизотермичность потоков вызывают ламинаризацию струйного смешения в канале; их влияние значительно ослабляется при ламинарных режимах течения.

4. Выявлена оптимальная массовая концентрация капель 6 – 10 %, выше которой эффективность газочапельного охлаждения не возрастает.

5. Впервые показано, что эффективность охлаждения в зависимости от концентрации капель и начальных условий при наличии пленки на стенке не превышает её значений при ламинарном течении.

6. Впервые опытным путем изучена десорбция углекислого газа из газочапельного потока и сопоставлена с десорбцией из жидкой пленки.

7. Выявлена температурная неравномерность на межфазовой поверхности, вследствие флуктуационного характера испарения капель, сложная взаимосвязь вариации состава, температуры и скорости обтекающей струи на интенсивность испарения жидких капель.

8. Впервые емкостным методом проведено исследование концентрации бинарных растворов в капле в потоке воздуха, получены новые закономерности по динамике снижения концентраций.

9. Получено обобщение по интенсивности испарения капель чистых жидкостей, с примесью углеродных нанотрубок и при добавлении поверхностно - активного вещества.

#### **Теоретическая и практическая ценность работы заключается:**

– в новых опытных данных о структуре течения, полученных в широком диапазоне изменения основных факторов, определяющих смешение незакрученного основного потока с закрученной периферийной струей, которые можно использовать для углубления и развития теории вихревых течений.

– полученные результаты исследования вихревых движений необходимы для проектирования циклонных аппаратов, плазмотронов, вихревых горелок, эжекторов, камер сгорания ряда энергетических установок и авиационных двигателей, где закрутка используется для стабилизации факела и улучшения условий перемешивания топлива с воздухом. Полученные закономерности могут быть использованы при конструировании химико-технологических установок, аппаратов новой техники.

– в новых опытных исследованиях газочапельных завес, характеристик течения жидкой пленки, образующейся при осаждении капель на стенке, в создании, в зависимости от состава жидкости, структурированных материалов микро- и наномасштабов, полимерных пленок.

- в первых результатах сопоставления десорбции  $\text{CO}_2$  с поверхности подаваемой жидкой пленки на стенке и образующейся при осаждении капель.
- в новых данных об испарении капель бинарных смесей, выбора обобщающих критериев для расчета интенсивности тепло- массообмена.

**Методы исследования** включали в себя измерения аэродинамических параметров, температуры, как на стенке, так и в цилиндрическом канале, при вариации геометрических и режимных параметров. Изучалось распределение концентрации газа на стенке при смешении инородных потоков. Определялась десорбция  $\text{CO}_2$  из жидкой пленки, возникающей при осаждении жидких капель на поверхности канала. Объектом изучения были капли как чистых жидкостей, так и водных растворов. В опытах измерялись размеры капель и температура на межфазовой поверхности. В результате определялась интенсивность испарения в зависимости от скорости и температуры обдуваемой струи воздуха, от состава смеси испаряющейся жидкости.

#### **На защиту выносятся:**

1. Результаты исследования эффективности тепловой завесы, концентрации вдуваемого газа на стенке трубы в зависимости от интенсивности закрутки при ламинарном и турбулентном режимах течения.
2. Подобие профилей температуры, циркуляции, кинетической энергии и угла закрутки в струйном пограничном слое.
3. Опытные данные о температуре, скорости и турбулентных характеристиках в приосевой области в зависимости от угла закрутки, параметра вдува и толщины разделяющей кромки. Обобщение и методику расчета температуры и концентрации газа на оси канала.
4. Результаты комплексных исследований изменения диаметра, температуры поверхности, концентрации бинарных компонентов капель, находящихся в воздушной струе. Методику обобщения тепломассообмена с каплями чистых вещества, водяных капель, содержащих углеродные нанотрубки, или с добавками ПАВ.
5. Экспериментальные данные об эффективности охлаждения газочапельными потоками или жидкими пленками. Результаты исследований десорбции углекислого газа из капель в пристенной струе и с поверхности жидкой пленки.

**Достоверность** основных результатов обеспечена использованием апробированных методов и оценкой погрешностей измерения, многократными экспериментами при идентичных условиях, сравнением с опытами других авторов, сопоставлением с результатами, полученных численными методами, а также широкой их апробацией.

**Апробация работы** в виде докладов и обсуждений основных положений и результатов исследований проходила на следующих семинарах и конференциях: на II и III Всесоюзных научно-технических конференциях

«Исследование вихревого эффекта и его применение в технике» (Куйбышев, 1975, 1979); на VI международной конференции по тепло- и массообмену (Торонто, 1978); на семинарах «Теоретические основы и оптимизация процессов тепловой защиты...» (Киев, 1982, 1987); на XXIII, XXIV, XXVI Сибирских теплофизических семинарах (Новосибирск, 1983, 1984, 2002); на VIII Всесоюзной конференции «Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах» (Ленинград, 1990); на XV Научно-технической сессии по проблемам газовых турбин (Рыбинск, 1993); на I, II, IV, V, VI Российских национальных конференциях по теплообмену (Москва, 1994, 1998, 2006, 2010, 2014); на 2<sup>nd</sup> Int. Symp. Two-Phase Model. Exp. (Pisa, 1999); на 3, 4, 6, 8<sup>th</sup> Int. Conf. Multiphase Flow (Lyon, 1998, New Orleans, 2001, China, Xi'an, 2009, Korea, Jeju, 2013); на XII, XIV, XV, XVI ICMAR (Новосибирск, 2004, 2008, 2010, 2014); на XI, XII Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ (С-Петербург, 2005, Москва, 2008); на Baltic Heat Transfer Conference (St. Petersburg, 2007); на I Minsk Int. Heat Mass Transfer Forum (Минск, 2008), 14<sup>ый</sup> Минский межд. форум по тепломассообмену (Минск, 2012); на Межд. конференциях «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики.» (Алушта, 2009, 2010, 2011, 2013, 2015); на Всеросс. конференции «Современные проблемы термодинамики и теплофизики» (Новосибирск, 2009); на 1 Российской конференции «Процессы самоорганизации в высыхающих каплях многокомпонентных жидкостей: эксперименты, теории, приложения» (Астрахань, 2010); на Международных научно-технических конференциях «Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ» (Санкт-Петербург, 2010, 2012, 2015); 24<sup>th</sup> European Conf. Liquid Atomization and Spray Systems (Portugal, 2011); The 7<sup>th</sup> International Symposium on Measurement Techniques fore Multiphase Flows (China, Tianjin, 2011); на IV Межд. конференции «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Москва, 2011); Spring World Congress on Engineering and Technology (China, Xi'an, 2012); на Всеросс. научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века» Москва, 2015).

**Личный вклад** автора заключается в проектировании рабочих участков, разработке методик измерения, проведении экспериментов и обработки результатов опытов, подготовке научных трудов. Постановка задач исследований осуществлена как лично, так и совместно с академиком Э.П. Волчковым и д.т.н., проф. В.И. Тереховым. На разных этапах частично в подготовке и проведении экспериментов участвовали к.т.н. Е.И. Синайко, д.т.н. Н.А. Дворников, д.т.н. В.П. Лебедев, к.т.н. К.А. Шаров, д.т.н. А.Д. Назаров.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка условных обозначений, списка литературы из 266 наименований, приложений. Основной текст диссертации содержит 257 страниц, включая 151 рисунок и 3 таблицы.



## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** сформулированы задачи исследований, обоснована их актуальность. Указана научная новизна и практическая ценность работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена обзору работ по исследуемым проблемам и обоснована постановка задач. Проведен анализ работ, в которых изучалась аэродинамика течения и тепломассообмен в коаксиальных потоках при локальной закрутке периферийного потока. Рассмотрены работы по эффективности закрученной и незакрученной газовой завесы в цилиндрическом канале. Большое внимание уделено экспериментальным и аналитическим исследованиям эффективности охлаждения при обтекании плоских поверхностей. Выделены основные факторы, влияющие на процессы струйного смешения: геометрия рассматриваемой области, режим турбулентного или ламинарного течения, параметры течения, неизотермичность коаксиальных струй, интенсивность закрутки периферийного потока.

На основании анализа имеющихся в литературе работ об эффективности охлаждения закрученным потоком сделаны следующие выводы. Отсутствует систематическое изучение структуры течения в зависимости от интенсивности закрутки вторичного потока, от параметров вдува, от толщины кромки сопел обоих потоков на входе рабочего участка. Не рассматривалось влияние параметра стесненности в трубах, угла закрутки на эффективность завесы при ламинарном и турбулентном режимах течения. Не проводилось сопоставления способов закрутки пристенной струи и этого влияния на эффективность охлаждения. Отсутствуют работы, где изучалось бы влияние толщины кромки на эффективность как незакрученной, так и закрученной завесы в осесимметричном канале.

Процессы тепло- и массообмена между частицами и газовым потоком, с ограничивающей поверхностью определяются большим числом факторов. Среди них основными являются концентрация частиц, многокомпонентность состава, аэродинамическая структура течения, а также процессы коагуляции и осаждения частиц на стенку с образованием на ней нестационарных волнообразных пленок. Представляет интерес комплексное изучение влияния этих факторов на характеристики двухфазной завесы.

**Во второй главе** дается описание аэродинамических стендов, рабочих участков. Изложена методика измерений и обработки опытных данных. Экспериментальное исследование свойств закрученной газовой струи проводилось в трубе диаметром 46 мм и длиной до 9 калибров. Измерялась температура и концентрация инородного газа на стенке, исследовались динамические и тепловые характеристики течения по сечениям канала, осуществлена визуализация пристенного течения.

Рассматривались три варианта **закрутки периферийной струи**. В первом случае охладитель поступал по касательной к внутренней поверхности канала через несколько прямоугольных щелей.

Во втором варианте вдуваемый газ закручивался как в первом варианте, но далее по коаксиальному соплу с криволинейными стенками трансформировался к спутному течению с основным потоком в канале. Исследования параметров течения показали что, к моменту выхода периферийного потока в канал на срезе щели формировалась волнообразная структура течения подобная вихрям Гертлера–Тейлора, что приводило к сильной неравномерности параметров по окружности кольцевого сопла, ослаблялась интенсивность вращения.

Чтобы избежать возникновения вторичных течений и иметь возможность устанавливать необходимую степень закрутки к началу взаимодействия двух потоков, в третьем варианте (Рисунок 1) закрутка струи осуществлялась с помощью винтообразных ребер. Направляющие ребра для кольцевой щели высотой 2 мм (Рисунок 1 а и б) имели на выходе следующие углы:  $\varphi_s = 0^\circ, 58^\circ, 74^\circ, 86^\circ$ ; что соответствовало по отношениям  $V_\varphi / V_x \sim 0; 1,6; 3,5; 14,3$ .

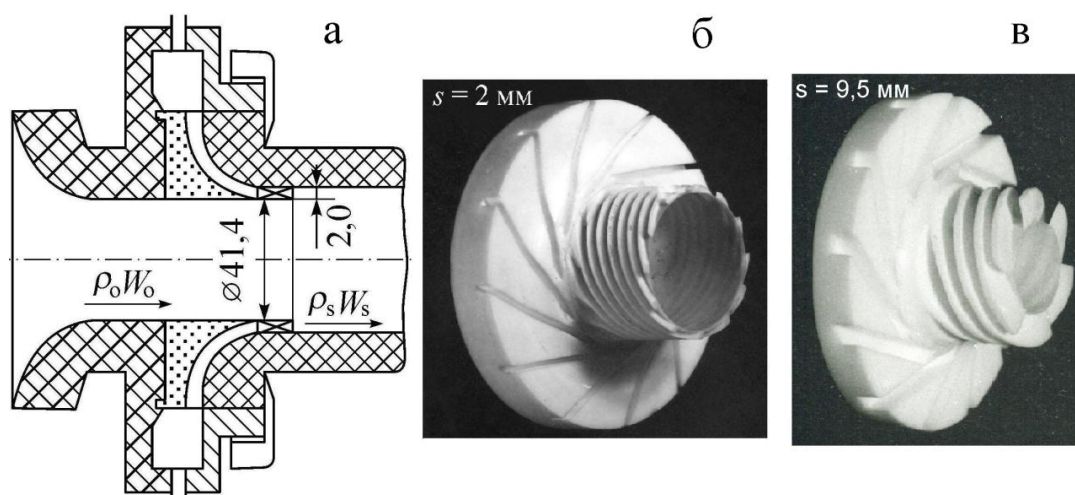


Рисунок 1 - Схема рабочего участка а), закручивающие вставки с  $s = 2$  мм б) и  $s = 9,5$  мм в).

Так как ранее влияние высоты кольцевой щели  $s$ , параметра стесненности  $s / D_k$  на эффективность завесы не исследовались, то были проведены эксперименты, когда  $s / D_k$  была  $0,0434$  ( $s_1 = 2$  мм) и  $0,206$  ( $s_2 = 9,5$  мм – Рисунок 1в), угол закрутки на выходе второго кольцевого сопла составлял  $\varphi_s \approx 74^\circ$ .

Исследование влияния толщины торцевой кромки, разделяющей основной и вторичный потоки на входе канала, проводилось с помощью профилированных втулок на выходе сопла центрального потока. С установкой которых были следующие относительные значения:

$$t / s = 0,15; 1,5; 4; 8 \quad (s = 2 \text{ мм}); \text{ и } 0,04; 0,9 \quad (s = 9,5 \text{ мм}).$$

Основной поток воздуха поступал в рабочий участок со средней скоростью  $W_o = 0,7 \div 320$  м/с; числа Рейнольдса  $Re_o = \rho_o W_o d_o / \mu_o$ , рассчитанные по параметрам потока на входе, имели значения  $1,5 \cdot 10^3 \div 4 \cdot 10^5$ . Относительный массовый расход периферийного потока воздуха составлял величину  $m = \rho_s W_s / \rho_o W_o = 0,2 \div 8$ , где  $\rho_s$  и  $W_s$  плотность и средняя скорость на выходе из кольцевой щели.

Средние параметры течения вблизи щели и в разных сечениях трубы измерялись трехканальным зондом, спаянным из медицинских игл с наружным диаметром 0,5 мм. В средней трубке помещалась нихром-константановая термопара, изготовленная из проводов диаметром 25 мкм. Характеристики течения в приосевой зоне изучались с помощью универсального зонда, сочетавшего в себе приемники давления, температуры и нить термоанемометра.

В тепловых опытах основной поток (или вдуваемый газ) нагревались примерно на  $60^\circ$  относительно друг друга, что соответствовало отношению плотностей в пределах  $\rho_s / \rho_o = 0,84 \div 1,2$ . В случае использования гелия в качестве основного потока его скорость составляла  $W_o = 42 \div 75$  м/с. Исследованный диапазон изменения параметра  $m$  в экспериментах при вдуве гелия в воздух и воздуха в гелий составил 0,11; 13,3;  $\rho_s / \rho_o = 0,13; 7,5$ ; значения  $Re_o = (1,4 \div 13) \cdot 10^4$ .

Объемная концентрация инородного газа, которая через отверстия 0,3 мм отсасывалась с поверхности трубы, определялась с помощью модифицированного хроматографа ГСТЛ. Ошибки измерения концентрации гелия этим методом составили 2,5 %, для аргона – 0,9 %. Имеющиеся в литературе данные об эффективности защиты были получены преимущественно для обтекания пластины, тогда как на практике существует необходимость охлаждения внутренних поверхностей труб. Сопоставление опытных данных об эффективности, полученных при обтекании пластины и в цилиндрических каналах, показало их отличие, особенно с удалением от начального сечения, когда струйный пограничный слой смыкается на оси.

Сравнительный анализ известных зависимостей эффективности газовой завесы показал, что для течений в трубе наиболее подходят зависимости Кутателадзе–Леонтьева, которые были предложены при обтекании пластины. С учетом ограниченности течения в трубе, интерполяционные формулы Кутателадзе–Леонтьева для случая незакрученной завесы имеют вид, соответствующий

**турбулентному режиму течения**

$$\theta = \{ 1 + 0,25 ( 1 - s/D_k )^{1,25} Re_{\Delta x} / [ Re_s (\mu_s / \mu_o) ]^{1,25} \}^{-0,8} \quad (1)$$

Для ламинарного течения имеем

$$\theta = \{ 1 + 10,6 ( 1 - s/D_k )^2 Re_{\Delta x} / [ Re_s (\mu_s / \mu_o) ]^2 \}^{-0,5} \quad (2)$$

**Опытное исследование газочапельного охлаждения** проводилось на специальной дозвуковой аэродинамической трубе. Рабочий участок (Рисунок 2) представлял собой цилиндрический канал с внутренним диаметром 100 мм и длиной 1200 мм. На входе канала имелась тангенциальная кольцевая щель высотой  $s = 5$  мм, жидкая пленка подавалась через кольцевой зазор высотой 0,5 мм. Эксперименты проводились, как при горизонтальном, так и при вертикальном расположении рабочего участка.

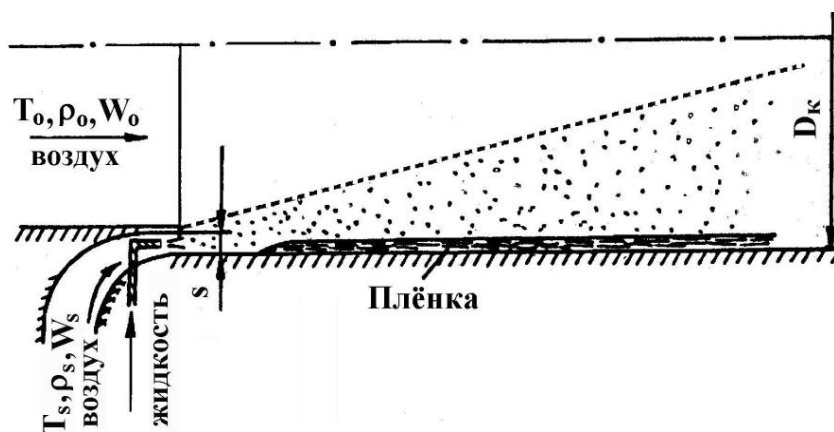


Рисунок 2 - Рабочий участок для исследования газочапельной завесы.

Распыление жидкости в пристенную струю осуществлялось внутри тангенциальной щели, примерно на половине её высоты были установлены равномерно по окружности 48 стальных игл внутренним диаметром 0,5 мм. При этом массовая концентрация воды могла изменяться в широких пределах  $K_{ж} = 0 \div 50$  %.

Скорость основного потока на входе рабочего участка была  $W_0 = 30 \div 65$  м/с, числа Рейнольдса составляли  $Re_0 = W_0 d_0 / \nu = (1 \div 2) \cdot 10^5$ . С помощью нагревателя температура основного потока поддерживалась постоянной, в опытах достигала  $T_0 \sim 200$  °С, температура в пристенной струе –  $T_s \approx 20$  °С. Параметр вдува определялся по среднерасходным параметрам охладителя, содержащим в себе газовую фазу и жидкость,  $m = \rho_s W_s / \rho_0 W_0$ , где

$\rho_s W_s = (G_{в} + G_{ж}) / F_s$ , а  $F_s$  – площадь кольцевой щели. В опытах параметр вдува изменялся в пределах  $m = 0,5 \div 1,8$ .

Область смешения в газочапельной струе анализировалось по радиальным профилям температур “сухого” и “мокрого” термометров. Для определения температуры газа над корольком термопары устанавливался металлический экран. В качестве «мокрого» термометра использовалась термопара, запеченная в элементе пористого оргстекла, в эксперименте непосредственно перед измерением зонд опрыскивался жидкостью. По результатам этих измерений определялись профили температур, влажности, и концентрации пара по сечениям канала.

**Количество жидкости**, оседающей на поверхности, определялось путем прямого отбора со стенки в различных сечениях трубы. **Толщина пленки**

**жидкости** измерялась датчиком емкостного типа, который был вмонтирован заподлицо с поверхностью в одну из секций. Сигнал с датчика направлялся в преобразователь емкость–частота, оцифровывался и в последующей обработке использовался как зависимость частоты измерительного генератора от времени. В дальнейшем, по тарировочным зависимостям частота измерительного генератора переводилась в толщину пленки, её погрешность измерения составила менее 7 %.

В **третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований процесса смещения пристенных закрученных струй со спутным потоком. Изучается распределение температуры и концентрации газов на оси и в пристенной области под влиянием таких факторов как неизотермичность, параметр вдува, режим течения, степень закрутки периферийной струи, соотношение плотностей обоих потоков, толщина кромки, разделяющей в начальном сечении струи.

Опытные данные о распределении скорости поперёк канала обнаруживают ряд особенностей течения в закрученном ограниченном потоке. Профили аксиальной компоненты скорости для  $m = 0,5$ , измеренные в разных сечениях, приводятся на Рисунке 3. При незакрученном течении (Рисунок 3а) профили обобщаются между собой и удовлетворительно описываются степенной зависимостью с показателем степени  $1/7$  для развитого турбулентного пограничного слоя.

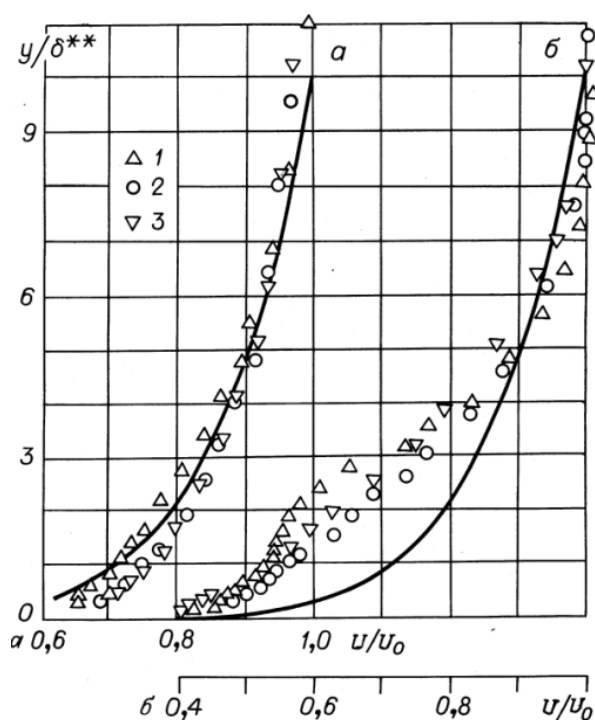


Рисунок 3 - Распределение аксиальной скорости в пристенном пограничном слое при незакрученном и закрученном течении. Опыты при  $m = 0,5$ : а) -  $\phi_s = 0^\circ$ , б) -  $\phi_s = 74^\circ$ ; 1 -  $x/D_k = 2,1$ ; 2 - 4; 3 - 6.

В условиях закрутки периферийного потока (Рисунок 3б,  $\phi_s = 74^\circ$ ) профиль продольной скорости вблизи стенки остается менее заполненным,

что свидетельствует о снижении интенсивности турбулентного обмена, удержанием в поле массовых сил основного потока в начальных границах.

Вид распределения циркуляции по радиусу канала показал возможность представить результаты измерения в координатах для струйного пограничного слоя. На Рисунке 4а нанесены опытные точки, полученные в экспериментах с закрученным периферийным и незакрученным осевым потоком при  $x / D_k = 0,036; 0,24; 0,85 \div 0,9$  [Лянэ, Иванов; Сухович], при течении закрученного периферийного и отсутствии осевого потока [Иванов, Лянэ], по измерениям в вихревой трубе [Меркулов]. Как следует из графика, профиль циркуляции сохраняет свой вид в разных условиях закрученного течения. Кинетическая энергия в осевом и окружном направлениях, корреляция осредненных скоростей  $V_x V_\varphi$  также обобщались в безразмерном виде (Рисунок 4б). Интенсивность закрутки потока на радиусе  $r$  характеризуется отношением  $V_\varphi / V_x \equiv \text{tg } \varphi$ . Данные по изменению угла вращения по радиусу показали, что профиль  $\text{tg } \varphi$  (Рисунок 4с) также как и циркуляция может удовлетворительно описываться кривой Гаусса (сплошная линия на графике).

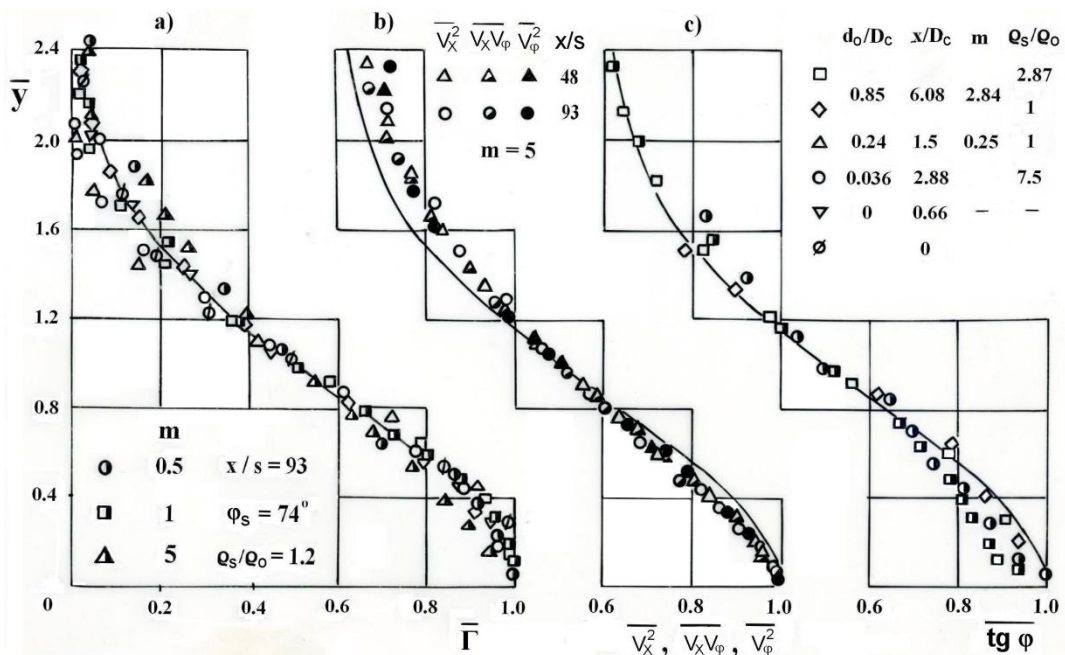


Рисунок 4 - Распределение циркуляции а), кинетической энергии б) и угла закрутки с) по радиусу канала.

Экспериментальное исследование профилей температуры поперек канала в условиях закрутки периферийной струи проведено при нагреве или основного или вторичного потоков. Результаты измерения в разных сечениях для углов закрутки  $\varphi_s = 0^0, 58^0, 74^0$  и относительного параметра вдува  $m = 0,5$ , а также эксперименты Суховича, в которых было  $\rho_s / \rho_o = 2,64$ , представлены в обобщенном виде на Рисунке 5. В такой обработке опытные точки обобщаются между собой и удовлетворительно согласуются с расчетом по формуле Вигхардта.

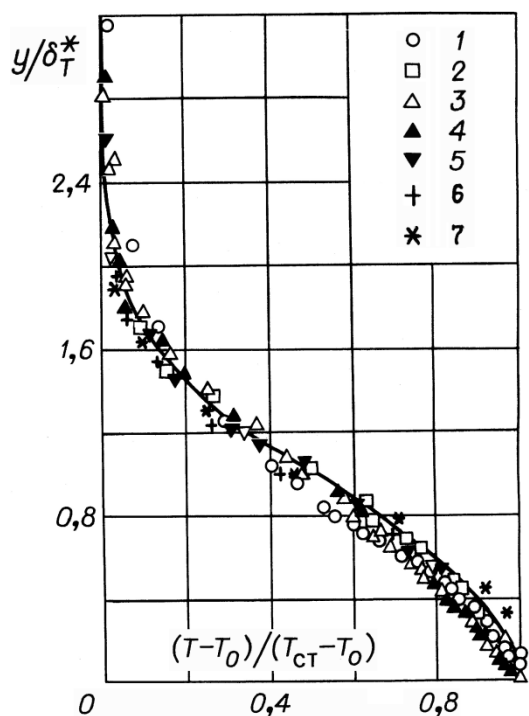


Рисунок 5. Обобщение профилей температуры в условиях закрученной завесы на адиабатической поверхности.

$m = 0,5$  (1 – 5);  
 $\varphi_s = 0^0$  (1),  $58^0$  (2),  
 $74^0$  (3 – 5);  
 $x / D_k = 2,1$  (1-4),  $6,0$  (5);  
 $T_s > T_{o1}$  – светлые точки,  
 $T_{o1} > T_s$  – темные точки.  
 Опыты Суховича:  $x / D_k = 13$  (6,7),  
 $m = 1,2$  (6),  $m = 2$  (7).

По фотографиям растекания вязкой жидкости, полученных при этих начальных углах закрутки, определялись линии тока газа вблизи поверхности канала в виде отношения вращательной к осевой компоненте скорости вблизи стенки. Визуализация течения вблизи поверхности показала, что при углах закрутки газовой завесы  $\varphi_s = 58^0$  и  $74^0$  движение газа в канале было осесимметричным. Изменение локальной степени закрутки потока по длине канала нанесено на Рисунке 6.

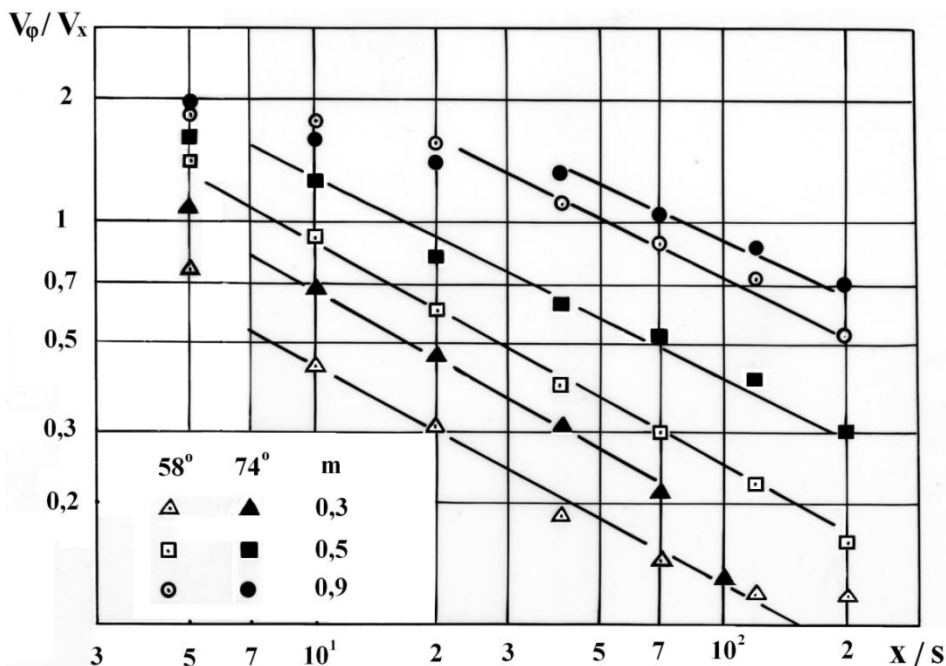


Рисунок - 6. Интенсивность закрутки потока вблизи стенки в зависимости от начального угла  $\varphi_s$  и параметра вдува  $m$ .

Видно, что, чем больше параметр вдува  $m$ , а также начальный угол  $\varphi_s$ , тем более высокой сохраняется величина  $(V_\varphi/V_x)_{ст}$  по длине канала.

Опытные данные о  $\text{tg } \varphi_{ст}$  вблизи стенки, отнесенные к этому значению на входе, обобщаются в первом приближении такой же зависимостью, что и данные об эффективности завесы. Принимая во внимание также подобие профилей угла закрутки, циркуляции (Рисунок 4) и температуры (Рисунок 5) можно заключить, что на начальном участке трубы перераспределение вращательного импульса периферийного потока происходит аналогично изменению безразмерной температуры.

Визуализация пристенного течения при наиболее интенсивной закрутке периферийного потока ( $\varphi_s = 86^\circ$ ,  $V_\varphi / V_o \sim 14,3$ ) (Рисунок 7) показала несимметричную картину распределения линий тока у стенки. Вязкая жидкость значительно слабее увлекалась газовым потоком вблизи поверхности, чем это было при меньших значениях  $\varphi_s$ . Наглядно демонстрировался отрыв течения вблизи стенки.

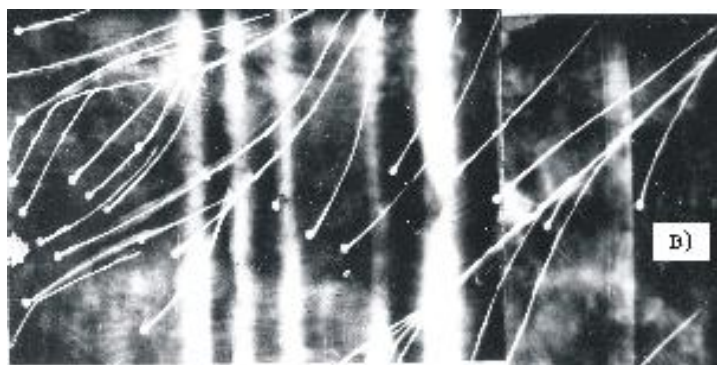


Рисунок 7 - Картина линий тока вблизи поверхности канала при  $\varphi_s = 86^\circ$ .

Изучение параметров течения на оси канала дает также наглядное представление о степени и характере перемешивания спутных потоков. Часто изменение параметров на оси является главным предметом исследования, например, в плазмотронах, в вихревых горелках. Температуру на оси принято представлять в виде  $(T_o - T_{см}) / (T_{o1} - T_{см})$ , где  $T_o$  и  $T_{o1}$  – температура потока на оси в текущем сечении и на входе в канал,  $T_{см} = (G_o T_{o1} + G_s T_s) / (G_o + G_s)$  – температура при полном смешении потоков.

Характерные данные об изменении температуры на оси канала показаны на Рисунок 8 для тонкой разделяющей кромки ( $t/s = 0,15$ ) в зависимости от продольной координаты  $x / D_k$ . Области начального участка соответствует значение безразмерной температуры, равное единице, а полному смешению – ноль. Из графика видно, что для незакрученного течения (опытные точки 1) длина начального участка мала (не превышает трех калибров при  $m = 0,5$  и составляет один калибр при  $m = 5$ ). Далее безразмерная температура на оси быстро падает, указывая на интенсивное перемешивание коаксиальных струй.



Закрутка периферийного потока (опытные точки 2 и 3) увеличивает длину начального участка и значительно замедляет снижение температуры далее вниз по потоку. Из правого графика (Рисунок 8) видно, что закрутка вдуваемого газа уменьшает степень турбулентности в приосевой зоне. Следует отметить сложный характер изменения  $Tu$  при больших параметрах вдува ( $m = 5$ ). Так, при отсутствии закрутки на некотором расстоянии от входа наблюдается подъем степени турбулентности на оси канала. При закрутке потока отмеченное резкое увеличение в распределении турбулентности исчезает.

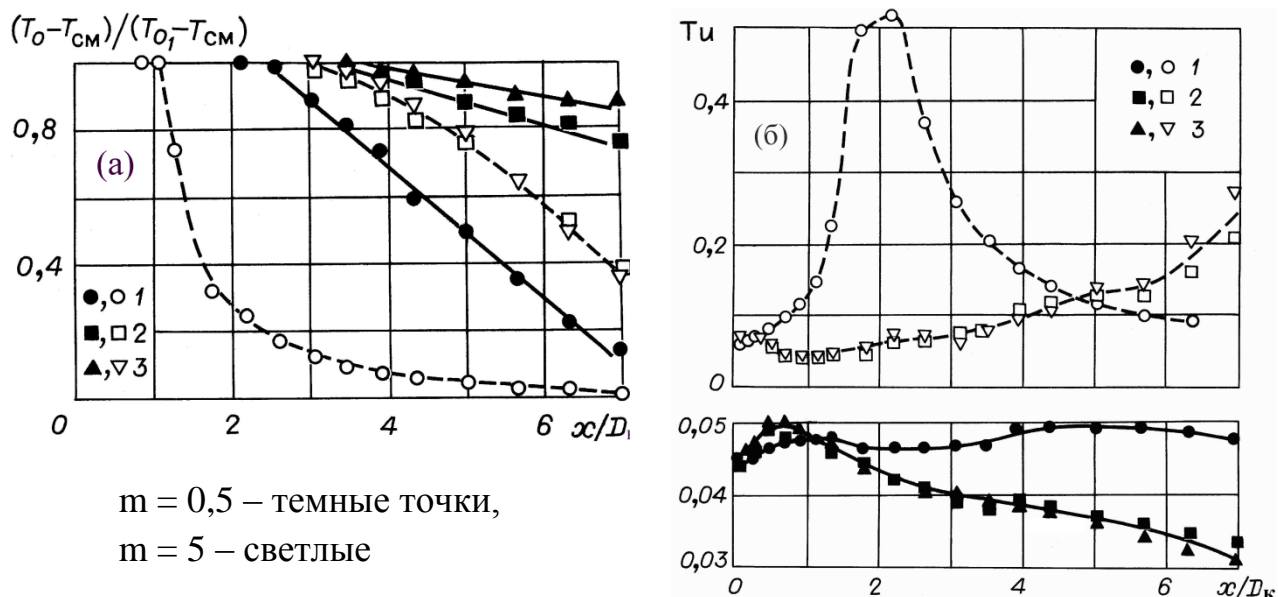


Рисунок 8 - Влияние закрутки периферийного потока на распределение температуры (а) и степени турбулентности (б) вдоль оси канала.  $\varphi_s = 0^\circ$  (1),  $58^\circ$  (2),  $74^\circ$  (3);

Увеличение толщины кромки, разделяющие основной и периферийный потоки, в отсутствие закрутки приводит к уменьшению длины начального участка и интенсивному перемешиванию потоков. Так изменение  $t/s$  от 0,15 до 8 сократило длину потенциального ядра от 2,5 до 0,5 калибров, а температура на оси сильно уменьшилась, достигая практически температуры полного смешения. На оси также возрастала степень турбулентности. Так, если при тонкой кромке ( $t/s = 0,15$ ) уровень турбулентности по длине оставался приблизительно постоянным и достаточно низким ( $Tu \approx 4\%$ ), то при толстой кромке ( $t/s = 8$ ) степень турбулентности достигала значения  $Tu \approx 28\%$ .

Влияние закрутки на распределение температуры потока на оси канала при наличии толстой кромки показало ухудшение смешения в приосевой области; длина зоны потенциального течения оставалась приблизительно постоянной, а темп падения безразмерной температуры замедлялся. Интересно отметить, что наибольший эффект достигался при максимальном угле  $\varphi_s = 86^\circ$ .

Предполагая аналогию в характере изменения температур на оси и на стенке канала, представим температуру на оси в безразмерном виде

$\eta = (T_o - T_s) / (T_{oI} - T_s)$ . Как известно, экспериментальные данные об эффективности завесы обобщаются с использованием комплекса

$Re_{\Delta x} / [Re_s (\mu_s / \mu_o)]$ . Аналогично, исходя из формул (1) и (2), запишем выражение для распределения  $\eta$  в случае **турбулентного течения**

$$\eta = \{ 1 + 0,254 Re_{s\Delta x} / [ Re_{or} (\mu_o / \mu_s) ( r_o / D_k ) ]^{1,25} \}^{-0,8}, \quad (3)$$

для **ламинарного течения**

$$\eta = \{ 1 + 10,6 Re_{s\Delta x} / [ Re_{or} (\mu_o / \mu_s) ( r_o / D_k ) ]^2 \}^{-0,5} \quad (4)$$

Имеющиеся результаты измерения температуры на оси канала при разных размерах торцевой стенки (кромки) и параметров вдува были обработаны в зависимости  $\eta$  от комплекса  $K_m$  для турбулентного течения и представлены на Рисунке 9. В случае смешения в незакрученном потоке, опыты удовлетворительно описывались зависимостью (3, кривая 1) до начала полного струйного перемешивания. Распределение в случае закрученной подачи периферийного газа было выше относительно незакрученного, опытные точки располагались вблизи расчетной кривой 2 (5), выраженной следующим образом

$$\eta = \{ 1 + 0,1 Re_{s\Delta x} / [ Re_{or} (\mu_o / \mu_s) ( r_o / D_k ) ]^{1,25} \}^{-0,8} \quad (5)$$

Удовлетворительное обобщение опытов достигалось по измерениям, в которых были соотношения  $0,09 \leq d_o / D_k \leq 0,32$  [Иванов, Лянэ]. Полагая, что при больших положительных градиентах плотности и закрутки периферийного потока происходит ламинаризация процессов смешения, некоторые опыты из работ Суховича, были представлены в обобщенных координатах для ламинарного режима течения на Рисунке 10. Как видно, наиболее высокое положение на графике, близкое к расчетной кривой (4), занимали точки, соответствующие параметрам вдува  $m \geq 2$ .

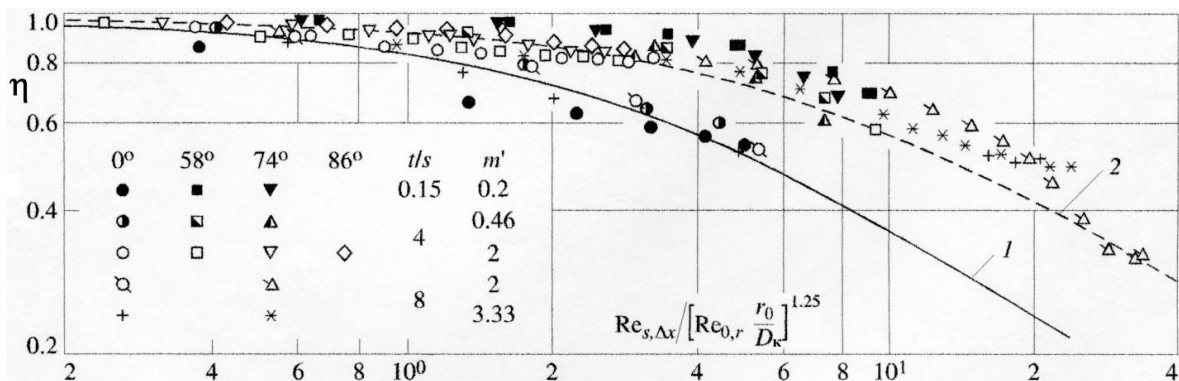


Рисунок 9 - Обобщение результатов измерения температуры на оси при различной толщине кромки, разделяющей два потока в начальном сечении. Здесь  $m' = \rho_o W_o / \rho_s W_s$ . 1 - расчет по формуле (3), 2 - по (5).

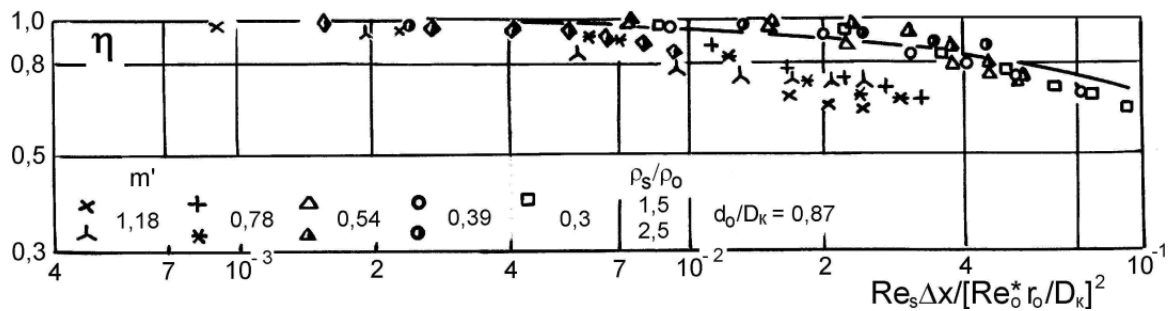


Рисунок 10 - Сопоставление результатов измерения температуры на оси при  $d_o / D_k \sim 0,9$  в обобщенных координатах для ламинарного режимов течения. Линия на графике – расчет по формуле (4).

### Влияние угла закрутки и режима течения на эффективность тепловой завесы

Эффективность тепловой завесы при небольших параметрах вдува  $m < 1$  и углах её закрутки  $\varphi_s = 58^\circ \div 74^\circ$  уменьшалась на близких расстояниях от щели (Рисунок 11,  $m = 0,5$ ). При удалении от щели вниз по потоку, температура на стенке при закрученных и незакрученных завесах сближаются.

При больших расходах вторичного потока ( $m > 2$ ) закрутка периферийного газа способствовала увеличению эффективности тепловой защиты на всех расстояниях от входа (Рисунок 11,  $m = 5$ ). Следует отметить, что изменение угла закрутки от  $58^\circ$  до  $74^\circ$  практически не изменяло распределение  $\theta$  по длине канала. По-видимому, в указанном диапазоне значений  $\varphi_s$  организуется оптимальный режим закрученного течения, когда достигается наибольшая эффективность тепловой завесы.

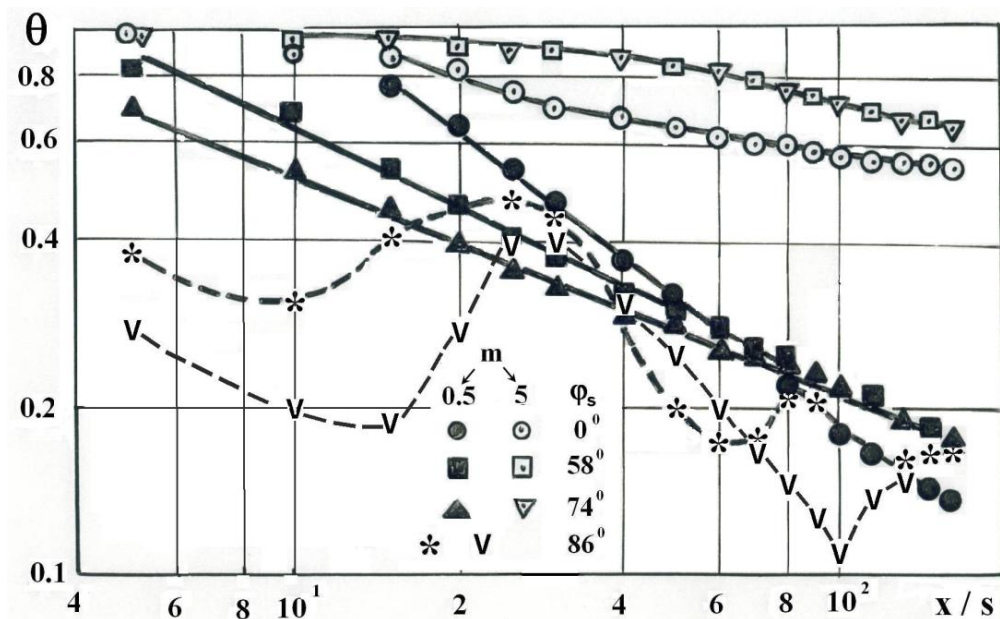


Рисунок 11 - Влияние угла закрутки и параметра вдува на эффективность завесы.

Из волнообразного изменения температуры при наиболее интенсивной закрутке ( $\varphi_s = 86^\circ$ , Рисунок 11), концентрации инородного вдуваемого газа по длине канала, а также из характера течения вблизи стенки (Рисунок 7) можно предположить следующее. Закрученный поток на входе рабочего участка отходил от ограничивающей поверхности с образованием коаксиального вихревого цилиндра. Предположительно с конфигурацией, аналогичной вихревым дымовым цилиндрам (столбам), наблюдавшимся в вихревой камере в работах В.И. Багрянцева, В.И. Кислых, И.И. Смульского, С.В. Алексеенко, Д.М. Маркович и др. Вихревое течение становилось не строго цилиндрическим: периодически расширялось до соприкосновения с ограничивающей поверхностью канала, затем сжималось. Вихревое движение обладало прецессией вокруг оси, что определяло несимметрию в распределении параметров.

Газовая завеса в условиях турбулентного и ламинарного режимов течения отличается по величине эффективности охлаждения. Результаты измерений при наименьшей скорости  $W_o \sim 0,7$  м/с,  $m = 0,5$  представлены на Рисунке 12, здесь же указаны исходные параметры, характеризующие оба потока перед началом смешения. Из рисунка видно, что снижение  $\theta$  в канале заметно изменилось, чем оно было при турбулентном течении (рис. 11). Наблюдается совпадение опытных точек при  $\varphi_s = 0^\circ$  и  $74^\circ$  по всей длине цилиндрического канала, т.е. влияние закрутки при ламинарном режиме течения практически исчезает.

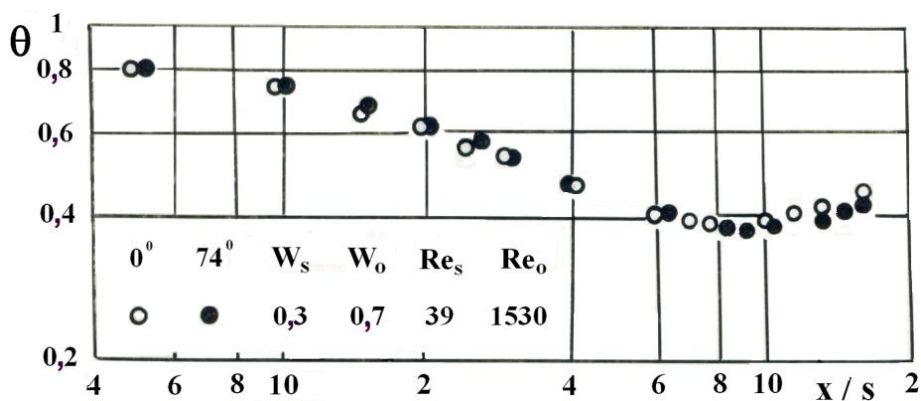


Рисунок 12 - Тепловая завеса при ламинарном режиме течения.

### Эффективность завесы при вдуве инородных газов

На ламинаризацию и процессы струйного смешения большое влияние оказывает соотношение плотностей коаксиальных потоков  $\rho_s/\rho_o$ . Результаты измерений концентрации инородных газов при близких значениях относительной скорости вдува  $W_s/W_o < 1$  показаны на Рисунок 13. Здесь же также нанесены опытные данные об эффективности тепловой завесы.

Как видно из графика, закрутка вторичного потока уменьшает эффективность завесы вблизи щели при вдуве как более легкого ( $\rho_s/\rho_o = 0,13$ ),

так и более тяжелого ( $\rho_s/\rho_0 = 1,2$  и  $1,36$ ) газа. При большом отношении плотностей  $\rho_s/\rho_0 = 7,5$  влияние закрутки исчезает, смешение коаксиальных потоков существенно замедляется, характер изменения был аналогичен тому, что был представлен на Рисунок 12 при  $W_0 \sim 0,7$  м/с.

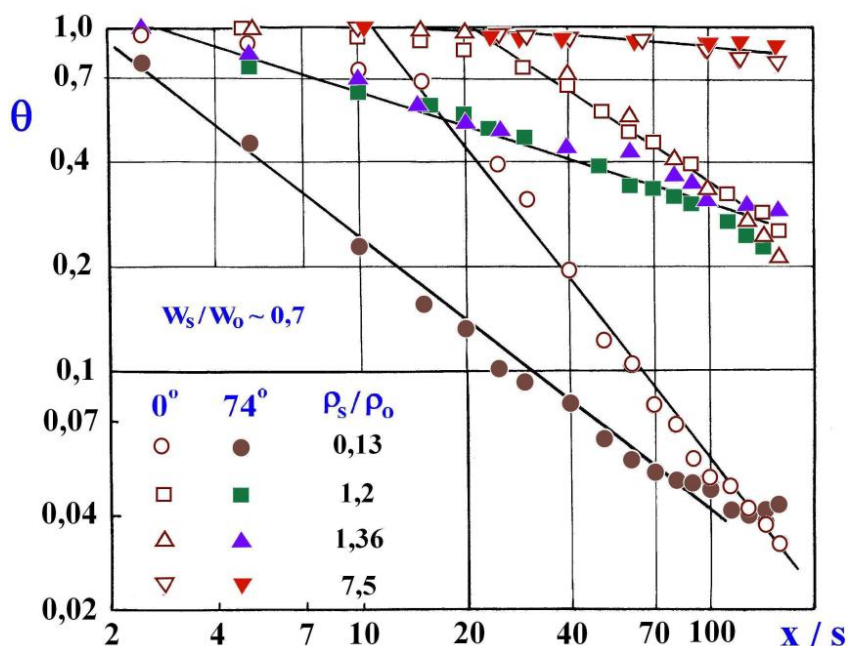


Рисунок 13 - Распределение весовой концентрации на стенке цилиндрического канала при вдуве газов различной плотности.

Эти результаты измерений, соответствующие ламинарному режиму смешения, были представлены в зависимости от комплекса

$Re_x / [Re_s (\mu_s / \mu_0) \cdot (1 - s / D_k)]^2$  на Рисунке 14 (точки 1 – 3). Здесь же нанесена расчетная кривая для эффективности ламинарной газовой завесы (уравнение 2), которая хорошо описывает опытные точки до значения комплекса меньше 0,15, далее, как и в тепловых опытах при тех же значениях комплекса, расчет дает более низкие значения эффективности. Таким образом, измерения концентрации воздуха на стенке канала показали, что в условиях сильных положительных градиентов плотности, эффективность завесы практически не зависит от её закрутки и принимает наибольшее значение.

Кроме опытов с гелиевым основным потоком на Рисунке 14 нанесены эксперименты с вдувом Ar ( $m = 0,5; 0,9; \phi_s = 74^\circ$ ), которые показали, что влияние центробежных сил оказалось недостаточным, чтобы осуществить ламинаризацию процессов смешения.

**Влияние высоты щели на эффективность охлаждения** исследовалось в тепловых и диффузионных задачах. Для изучения процессов смешения в закрученном потоке большей плотности осуществлялась подача воздушной пристенной струи в гелиевый основной поток. Результаты измерения концентрации воздуха на стенке, при вдуве его в гелиевый основной поток, имели другой вид, чем это наблюдалось в экспериментах с кольцевой щелью

высотой  $s = 2$  мм (Рисунок 13). Ламинаризации струйного смешения, несмотря на большой градиент плотности ( $\rho_s / \rho_o = 7,5$ ), не происходило, возможно, необходимо учитывать в этих условиях также параметр стесненности  $s / D_k$ .

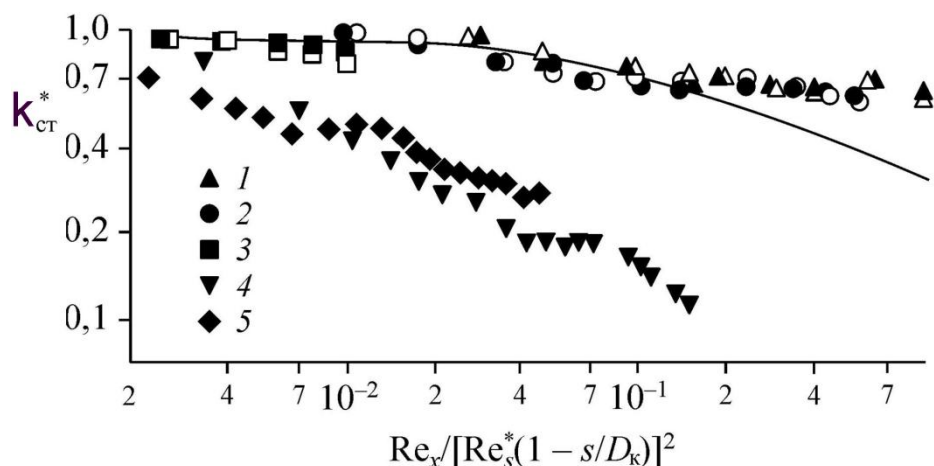


Рисунок 14 - Распределение весовой концентрации воздуха и аргона на стенке канала в обобщенных координатах для ламинарного течения. Ниже в таблице указаны условия в опытах.

Опыты	1	2	3	4	5
$m$	0,3	0,5	5	0,5	0,9
$W_s/W_0$	0,04	0,067	0,67	0,36	0,65
Вдув	воздуха в гелий			аргона в воздух	

**Эффективность газовой завесы при разной толщине кромки сопла,** разделяющей основной и вторичный потоки, экспериментально исследована только при обтекании плоской пластины [S.C. Kacker, J.H. Whitelaw]. Было показано, что эффективность на адиабатической стенке существенно снижается с увеличением толщины кромки, причем наибольший эффект достигается при отношении скоростей  $W_s / W_o \sim 1$ . Опытные данные об охлаждении плоской поверхности [Kacker, Whitelaw] и в цилиндрическом канале, сопоставляются между собой по эффективности на Рисунке 15 для отношения скоростей  $W_s / W_o \approx 1,07$ .

В настоящей работе высота кольцевой щели оставалась постоянной, увеличение ширины торцевой стенки на входе производилось за счет уменьшения проходного сечения основного потока. Эксперименты, представленные на Рисунках 15 и 16, осуществлялись при одних и тех же расходах  $G_s$  соответственно 14,4 г/с и 8 г/с, а расход основного потока варьировался, чтобы сохранялся постоянным параметр вдува  $m$ .

В приведенных на Рисунке 15 опытах в цилиндрическом канале относительная толщина кромки была намного выше ( $t / s = 0,15; 1,5; 4$ ), чем в

цитируемой работе, однако снижение эффективности завесы от  $t/s$  оказалось не так сильно выражено, как это наблюдалось на пластине. Обращает на себя внимание тот факт, что опытные точки для  $t/s = 1,5$  и  $t/s = 4$  совпадают между собой.

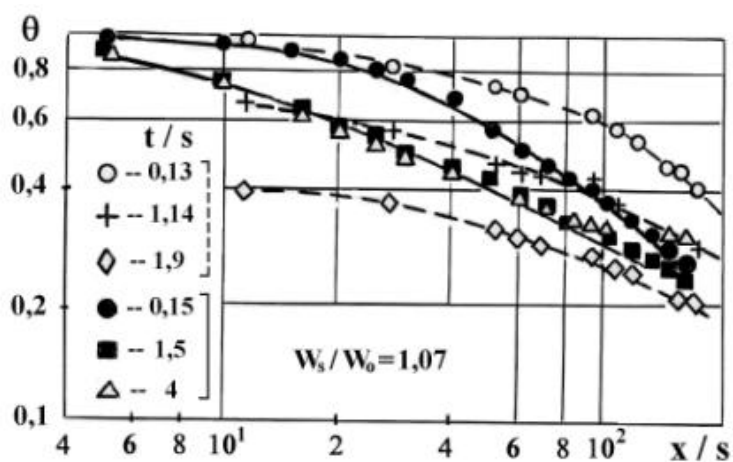


Рисунок 15 - Сопоставление эффективности тепловой завесы при разной толщине кромки щели для пластины [Kacker, Whitelaw] (выделены пунктирной скобкой) и цилиндрического канала.

Измерения, проведенные при других расходах вторичного потока ( $m = 0,5$ ), не выявили существенного отличия эффективности газовой завесы при тонкой и толстых кромках (Рисунок 16,  $\varphi_s = 0^\circ$ ). Здесь вследствие полного перемешивания двух потоков величина  $\theta$  в конце рабочего участка при толстой кромке может приблизиться к пределу, который, например, при  $t/s = 4$  был, фактически достигнут -  $\theta_{cm} = 0,21$ .

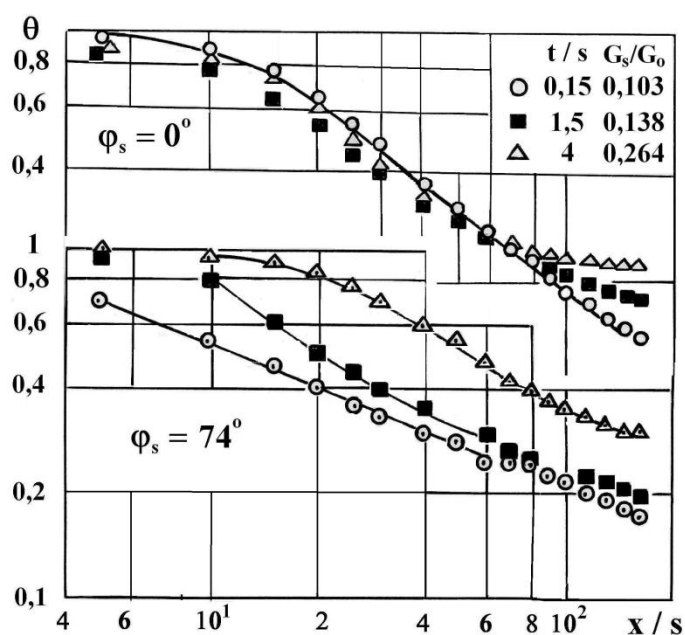


Рисунок 16 - Эффективность закрученной и незакрученной тепловой завесы для разных толщин кромки.  $m = 0,5$ .

Результаты измерения температуры адиабатной стенки, когда охлаждаемый газ поступал закрученным, представлены на Рисунке 16,  $\varphi_s = 74^\circ$ . Вблизи торцевой стенки расширение закрученного потока осуществлялось по сходящимся к основному потоку спиральным линиям тока (о чем свидетельствовали линии растекания вязкой жидкости по торцу). Таким образом, области отрыва за разделяющей кромкой, имевшей место при незакрученном течении, не было. Отмеченные особенности смешения во вращающемся потоке привели к тому, что эффективность закрученной завесы с увеличением толщины кромки возрастала.

**Четвертая глава.** Ввод диспергированной жидкости в пристенные струи приводит к улучшению защиты за счет дополнительного охлаждения при испарении капель. Особенности испарения изучались на каплях, которые подвешивались в газовом потоке. Несмотря на давний интерес к испарению капель, начиная с XIX века в работах Б. Срезневского, J.G. Maxwell, позднее W.E. Ranz, W.R. Marshall, D.B. Spalding, H.A. Фукса, С.К. Law, W.A. Sirignano, S.S. Sazhin и многие др., исследования остаются незавершенными, особенно с каплями бинарного или многокомпонентного состава. В настоящей работе объектами изучения были капли как чистых жидкостей, так и водных растворов ацетона, этанола и метанола. Исследовалось влияние добавки углеродных нанотрубок и поверхностно-активного вещества (додецилсульфат натрия) на испарение капель.

Опыты проводились с каплями размерами  $\sim 2 \div 3$  мм, которые подвешивались в струе воздуха на выходе канала диаметром  $\sim 52$  мм. Поток направлялся снизу вверх, чтобы уравновесить силы гравитации и облегчить удержание капли. Скорость практически сухого воздуха (влажность  $< 1 \div 2\%$ ) изменялась в пределах  $W_o = 0 \div 6$  м/с, степень турбулентности не превышала  $\sim 5,5\%$ . Температура струи изменялась в широком диапазоне  $T_o \sim 15 \div 200$  °С. Максимальное число Рейнольдса в экспериментах составляло  $Re \sim 2 \cdot 10^3$ . Измерение контуров капли и температуры ее поверхности производилось инфракрасной камерой THERMOTRACER TH7102IR, погрешность определения температуры не превышала  $0,2$  °С.

Термографические снимки как капель чистых жидкостей воды, этанола и ацетона так и водных растворов показали, что температура была неравномерной по поверхности (Рисунок 17). С течением времени расположение зон более низких температур спонтанно менялось, аналогичный характер сохранялся и при испарении капель в неподвижной среде. Из качественного рассмотрения понятно, что неоднородность температуры была вызвана случайно возникающими центрами парообразования во внешнем слое капли.



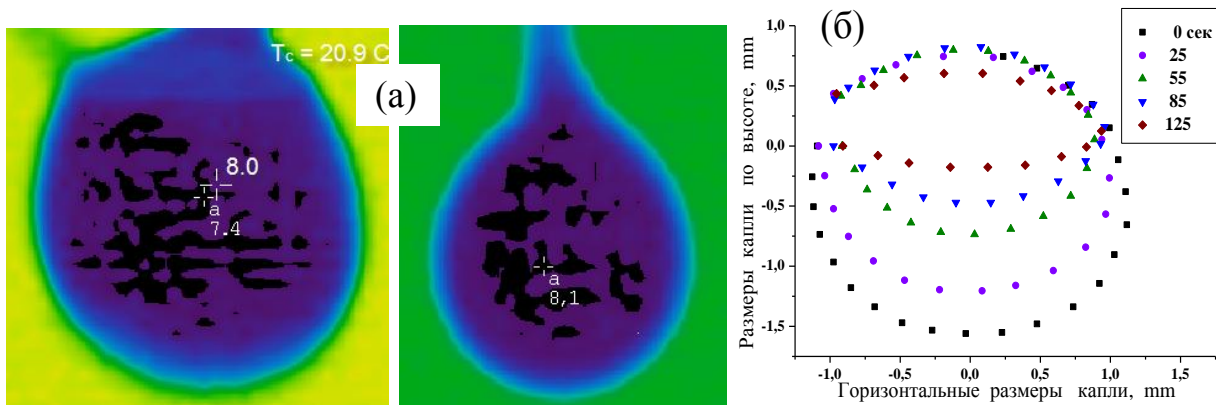


Рисунок 17 - Термографический вид капель а), её контуры б) при испарении.

Поэтому в каждом случае определялась гистограмма распределения температуры: фиксировались значения минимальной, средней и максимальной температуры на поверхности. Изменение этих величин с течением времени показано на примере испарения капель смеси исследуемых жидкостей на Рисунке 18.

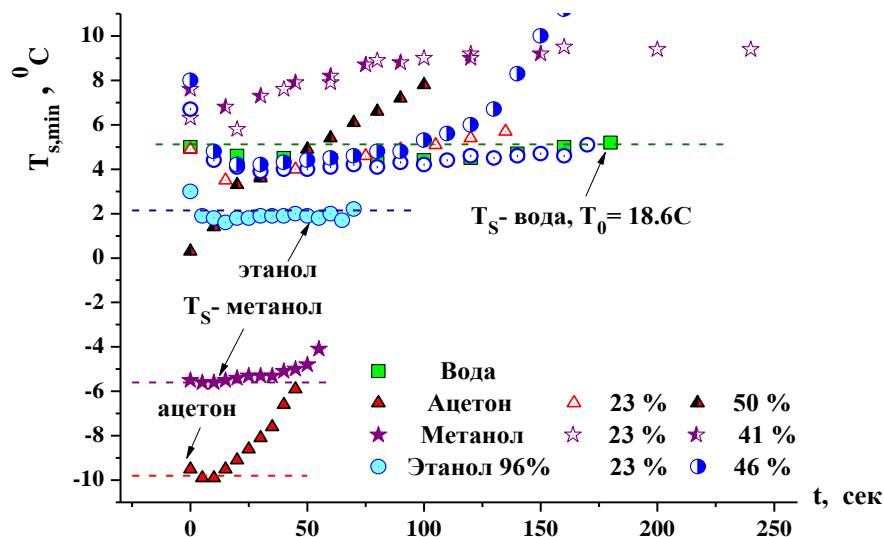


Рисунок 18 - Величина минимальной температуры на поверхности капель.

Как видно, что для всех исследованных чистых жидкостей в начальные моменты времени температура поверхности капли близка к температуре адиабатического испарения (пунктирные линии). В каплях бинарных растворов по мере увеличения содержания воды температура поверхности возрастала и, как её минимальное значение, так и при сопоставлении средней температуры, становилась выше, чем для капель чистой воды.

Большой интерес к процессам испарения жидких пленок и капель, содержащих поверхностно-активное вещество (ПАВ), вызван возможностью управления силами поверхностного натяжения на межфазовой границе и, таким образом, воздействовать на теплообмен. Опытное исследование скорости испарения капли и температуры ее поверхности показали, что

добавление поверхностно активного вещества в базовую жидкость (вода) оказывает существенное влияние как на характер изменения температуры поверхности испаряющихся капель по времени (Рисунок 19), так и на закономерности тепло - и массопереноса.

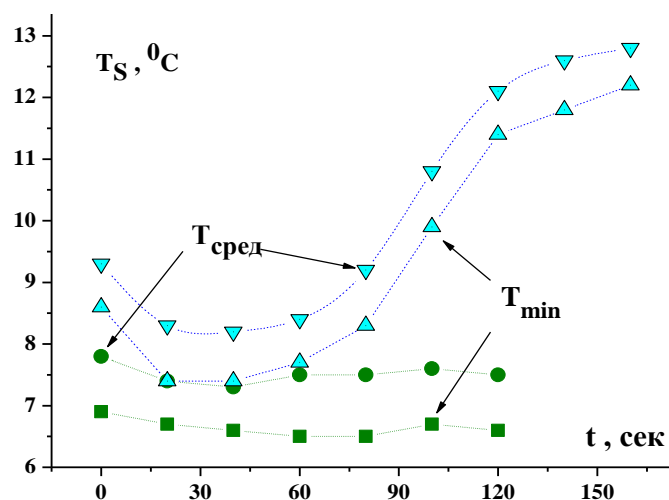


Рисунок 19 - Средние и минимальные температуры поверхности испаряющихся капель, темные точки – чистая вода, светлые – содержащие 0,15 % ПАВ;  $T_0 = 19,8 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $W_0 = 3,2 \text{ м/с}$ .

Если в начальный момент времени температура незначительно отличается от опытов с чистой воды, то далее, с увеличением концентрации ПАВ на межфазовой границе в результате испарения базовой жидкости и миграции примеси из внутренней области, быстро начинает возрастать.

Для изучения динамики изменения **концентрации компонентов** в испаряющейся одиночной капле бинарного раствора был применен емкостный метод, принцип действия которого основан на зависимости емкости зонда от диэлектрической проницаемости в смеси компонентов капли. Данный метод пригоден для регистрации динамики изменения средней по объему концентрации компоненты в указанном диапазоне размеров капель с точностью  $\sim 5 \%$ . Изменение концентрации при разных начальных содержаниях в каплях ацетона показано на Рисунке 20а.

Опытные данные рассматриваемых растворов имеют тенденцию к обобщению (Рисунок 20б) единой зависимостью, если первые точки из экспериментов нанести на эту кривую. Последующее изменение не зависит от того, было ли оно начальным или достигалось предшествующим испарением. Что является важным для разработки инженерных расчетов интенсивности испарения легколетучих компонентов.

Весьма существенное влияние на динамику испарения капель водных смесей оказывает температура воздушного потока. Так с увеличением температуры струи с  $T_0 = 21,4 \text{ } ^\circ\text{C}$  до  $74,4 \text{ } ^\circ\text{C}$  время испарения ацетона из капли сократилось в 3 раза. Однако последующее увеличение нагрева воздуха выше

температуры кипения жидкости, практически не повлияло на скорость испарения ацетона.

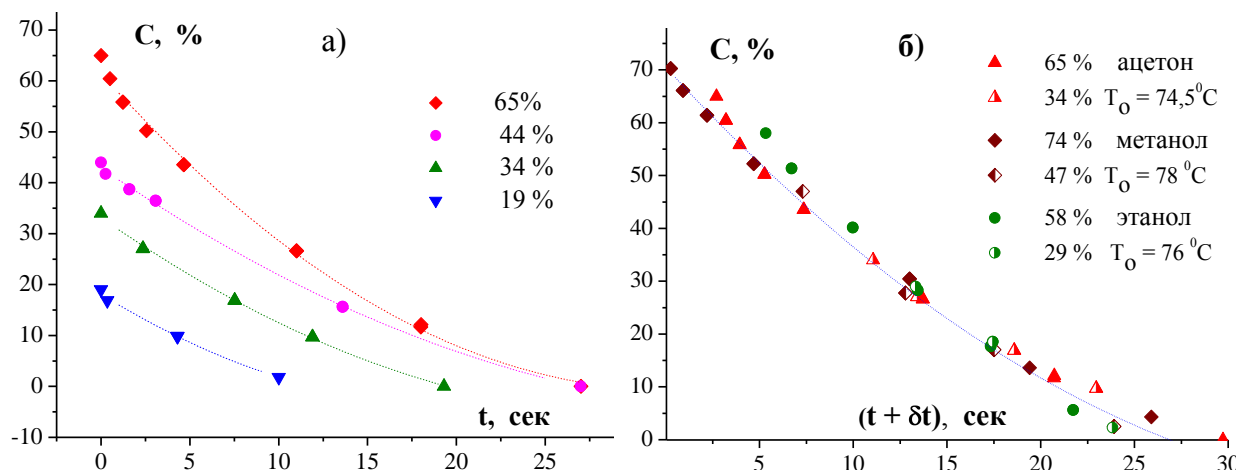


Рисунок 20 - Снижение концентрации ацетона в капле во времени а), обобщение опытов с различными легколетучими компонентами б).

Изменения размеров капель бинарных растворов в процессе их испарения рассматривались в виде зависимости  $d^{1.5}$  от времени  $t$ , которая следует из уравнения теплового баланса на испаряющейся поверхности. Для обобщения опытных данных по скорости испарения капель жидкости использовалась следующая зависимость, полученная из уравнения теплового баланса на поверхности капли и соотношения для ее коэффициента теплоотдачи

$$(d / d_0)^{3/2} = 1 - A \cdot \frac{Re_0^{0.5} \cdot Fo}{Ku}, \quad (6)$$

где  $Fo = t \cdot a_0 / d_0^2$  - число Фурье,  $Ku = r / [c_{po} \cdot (T_0 - T_s)]$  - критерий фазового превращения Кутателадзе,  $r$  и  $c_{po}$  - скрытая теплота парообразования и теплоемкость газа, а  $T_s$  и  $T_0$  - температура парогазовой смеси на поверхности капли (линия насыщения) и в окружающем потоке воздуха соответственно.

Результаты обобщения опытных данных приведены на Рисунке 21 для испарения капель воды и ацетона, на Рисунке 22 капли воды с добавкой ПАВ. Из рисунков следует, что закон “3/2” приводит к хорошему обобщению экспериментальных точек. Видно, что присутствие ПАВ на поверхности ослабило теплообмен на межфазовой поверхности.

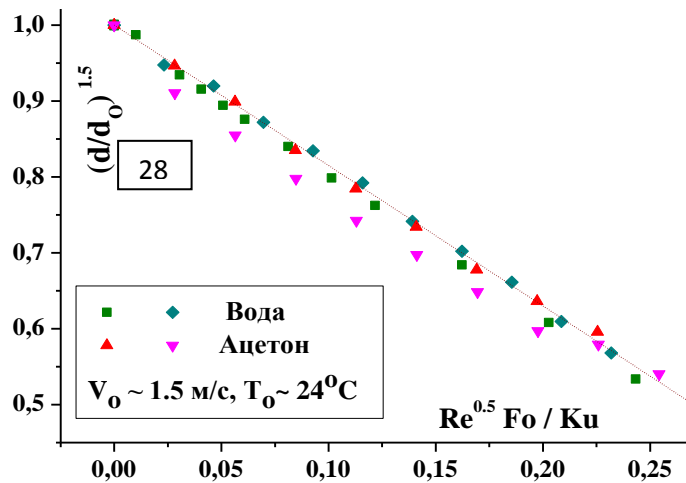


Рисунок 21 - Обобщение опытных данных по испарению капель воды и ацетона.

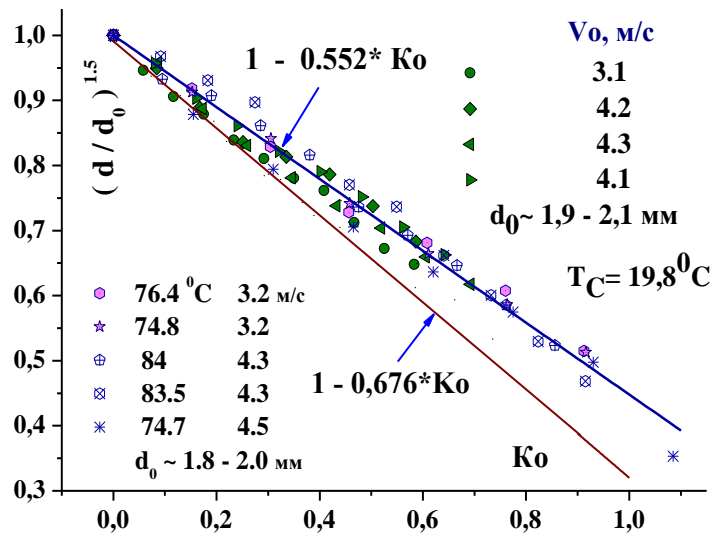


Рисунок 22 - Обобщение опытных данных по испарению жидких капель, содержащих ПАВ.

В **пятой главе** рассматривается эффективность защиты поверхности канала с помощью газокapельных струй и жидкой пленки. Большое внимание уделено воздействию параметра вдува, неизотермичности потоков, начальной концентрации жидкой фазы. Представлены результаты исследования десорбции углекислого газа из распыленных капель, с поверхности жидкой пленки. Схема течения в рабочем участке и возникновение на стенке жидкой пленки в результате осаждения капель из пристенной струи показана на Рисунке 2.

Характеристики течения при смешении в газокapельной струе изучались по радиальным профилям температур сухого и мокрого термометров, измерениям жидкой пленки. Присутствие жидких капель сказывалось только в пристенной области: здесь происходило достаточно быстрое нарастание влажности воздуха вплоть до насыщения над поверхностью канала (Рисунок 23а). По влажности (Рисунок 23а) и профилям температур в экспериментах

оценивалось распределение массовой концентрации пара пограничном слое, которое показано на Рисунке 23б для различных расстояний от входа. Следует отметить, что с удалением от щели устанавливалось почти постоянное распределение пара над поверхностью с жидкой пленкой.

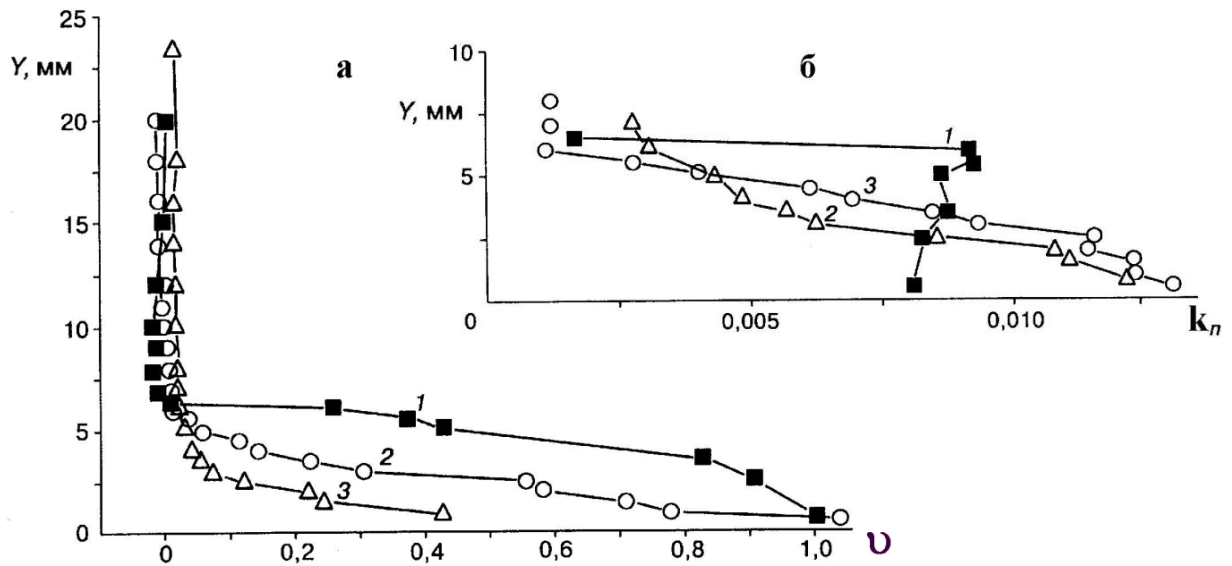
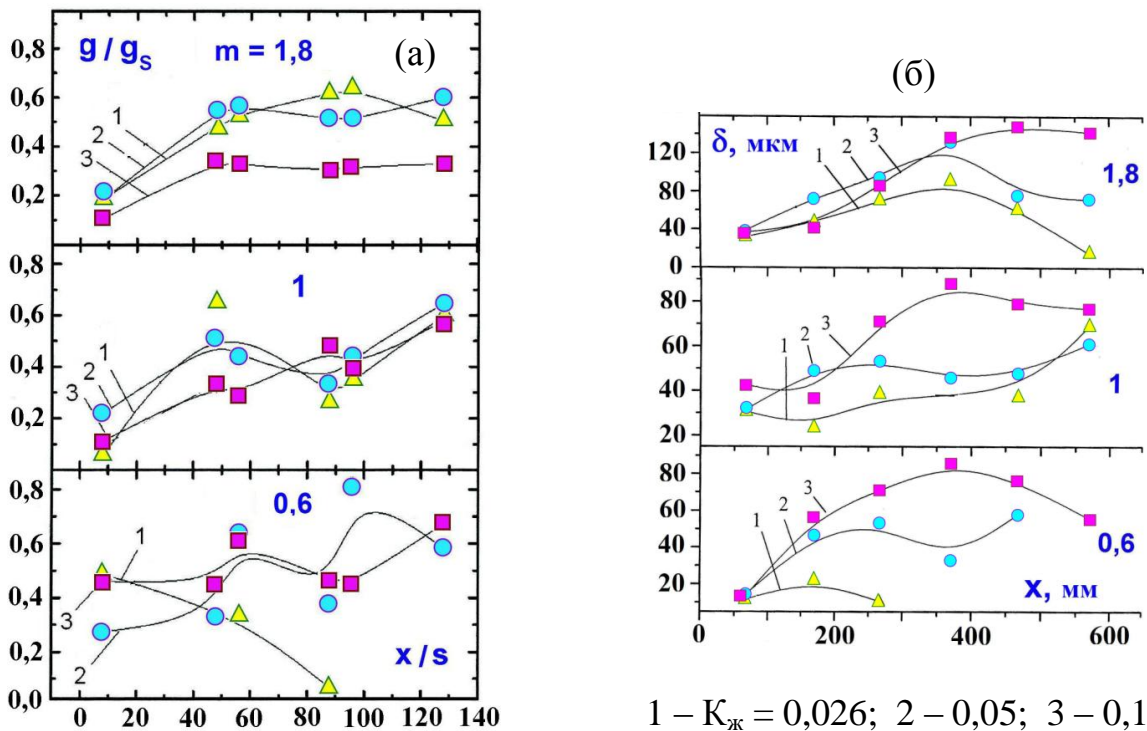


Рисунок 23 - Распределение относительной влажности по сечению канала  $u$  (а) и массовых концентраций пара в пристенной области  $k_n$  (б).  $K_{ж} = 0,05$ ;  $T_0 = 100$  °C;  $x = 40$  (1), 240 (2), 440 мм (3).

Количество осажденной в виде пленки жидкости приведено на Рисунке 24 а, как  $g / g_s$  – доля от всего расхода жидкой фазы.



1 –  $K_{ж} = 0,026$ ; 2 – 0,05; 3 – 0,1.

Рисунок 24 – Расход а), и средняя толщина жидкой пленки б) в зависимости от параметра вдува и концентрации капель.

Как следует из рисунка, количество осаждаемой жидкой фазы может изменяться в широких пределах  $g / g_s = 0 \div 0,6$ , при этом на образование жидкой пленки влияет как параметр вдува, так и концентрация жидкости.

Возникающая на поверхности жидкая пленка имеет волнообразный характер, её средняя толщина  $\delta$  по длине канала показано на Рисунке 24 б. Как видно, при обтекании двухфазным потоком капли оседают на поверхности и с удалением от начального сечения толщина пленки увеличивается. Наибольшая её величина соответствует большим параметрам вдува. При малых концентрациях капля отмечается с удалением от щели преобладание уноса жидкости и, практически, осушение поверхности.

**Влияние концентрации жидких капель на эффективность охлаждения** изучалось в широком диапазоне  $K_{ж} = 0 \div 50$  и  $100$  %. В последнем случае жидкость подавалась через кольцевую щель высотой  $0,5$  мм.

Важная особенность поведения эффективности двухфазной завесы прослеживается на Рисунке 25, где представлены опытные данные об эффективности завесы при больших значениях концентрации жидкой фазы  $K_{ж} \geq 25$  %. Область течения, где защитные свойства завесы максимальны ( $\theta = 1$ ), занимает практически всю длину канала. Столь высокие значения эффективности газожидкостной завесы объясняются тем, что водяные капли, взаимодействуя с поверхностью канала, образует на ней сплошную жидкую пленку, что было подтверждено измерениями толщины осаждаемой жидкости (Рисунок 24 б). При этих условиях эффективность завесы стремится к своему максимальному значению  $\theta \rightarrow 1$ .

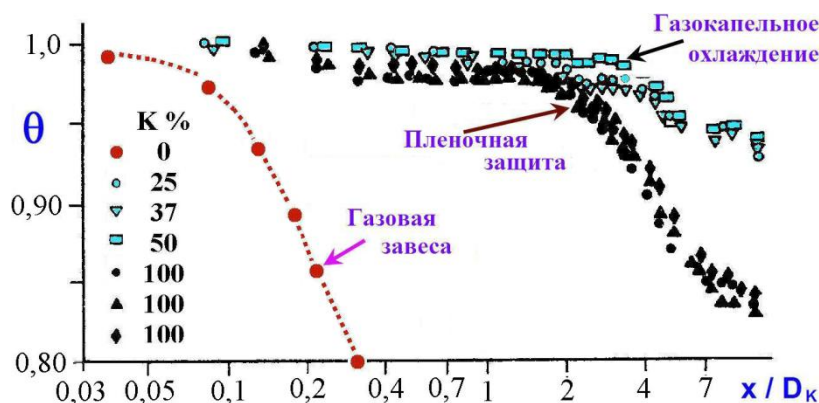


Рисунок 25 - Эффективность двухфазной завесы при больших концентрациях частиц жидкости ( $K_{ж} = 25 \div 100$  %).

Для сравнения на Рисунке 25 нанесены также опыты по эффективности завесы при подаче через щель только жидкости ( $K_{ж} = 100\%$ ). В этих опытах соотношение расходов охладителя и основного потока было таким же, как и для двухфазного режима подачи пристенной струи и равным  $G_s/G_o \approx 0,24$ . Видно, что эффективность завесы при подаче воздушно-капельной смеси на больших расстояниях от входа заметно выше, чем вдув чисто водяной струи такого же расхода. Это означает, что для обеспечения высоких защитных

свойств поверхности с помощью двухфазной завесы нет необходимости подавать в качестве охладителя чистую жидкость, а более экономичной будет ее подача в распыленном виде

Проведенный анализ полученных экспериментальных данных о влиянии концентрации жидкости в газовой завесе на эффективность охлаждения позволил выявить существование предельного значения концентрации частиц жидкости, при котором достигается максимальная эффективность завесы.

При этом дальнейшее увеличение массовой доли жидкости в газе не приводит к увеличению эффективности завесы. Этот вывод можно сделать, обратившись к Рисунку 26, где показана зависимость отношения эффективности газочапельной завесы  $\theta$  к эффективности однофазной завесы  $\theta_0$  в заданном сечении в зависимости от концентрации частиц жидкости во вторичном потоке.

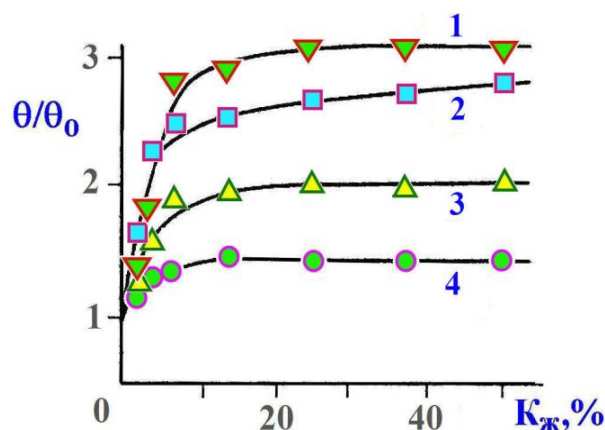


Рисунок 26 - Влияние концентрации частиц воды на эффективность газожидкостной завесы. Значения  $x / D_k$ : 0,5 (1); 2,1 (2); 5,6 (3); 11,3 (4).

Из графика видно, что эффективность завесы при двухфазном течении может более чем в 3 раза превышать значение однофазного режима. Кроме того, увеличение эффективности завесы происходит до  $K_{ж} \approx 6 - 10 \%$ , а затем достигается ее предельное значение, не зависящее от дальнейшего роста концентрации. Это объясняется тем, что при этом содержании капель на поверхности канала образуется устойчивая жидкая пленка, а дальнейшее увеличение концентрации практически не влияет на параметры образующейся пленки. Обнаруженный результат имеет большое практическое значение, так как показывает, что для достижения такого же качества охлаждения, какое имеет место при использовании только жидкости, достаточно добавить в газовую завесу всего  $\sim 6 \div 10 \%$  по массе жидких капель.

#### Расчет по температуре стенки эффективности газочапельной завесы.

Эффективность тепловой защиты, часто представляют её в виде безразмерной температуры  $(T_o - T_w)/(T_o - T_s)$ ,

где  $T_s = [T_{as} \cdot (1 - K_{ж}) \cdot c_{p,a} + T_{жс} \cdot K_{ж} \cdot c_{p,ж}] / [(1 - K_{ж}) \cdot c_{p,a} + K_{ж} \cdot c_{p,ж}]$ . Анализ влияния неизотермичности потоков на процессы струйного взаимодействия в этих параметрах затруднен: при небольшой разности температур  $\sim 10 \text{ }^\circ\text{C}$  рассматриваемая величина может в 2 раза превышать соответствующие значения, полученные при  $\sim 100 \div 200 \text{ }^\circ\text{C}$ . При смешении потоков,

отличающихся по своим физическим свойствам, эффективность охлаждения выражается через энтальпии  $\theta = (i_w^* - i_w) / (i_w^* - i_w)_1$

Для эффективности  $\theta$ , определяемой через температуры и концентрации воздуха, пара и жидкости, обозначенные как  $k_o$ ,  $k_v$  и  $k_{ж}$ , имеем

$$\theta = \frac{c_{pa}T_o - T_w(c_{pas}k_o + c_vk_v + c_{ж}k_{ж} - r(K_{ж} - k_v)/T_w)}{c_{pa}T_o - [c_{pas}(1 - K_{ж})T_{a,s} + c_{ж}K_{ж}T_{ж} - rK_{ж}]} \quad (7)$$

Для расчета  $\theta$  по соотношению (7) остаются неизвестными концентрации  $k_o$ ,  $k_v$ ,  $k_{ж}$ . Если сделать приближение, что концентрация пара вблизи стенки по длине канала сохраняется, а это видно и на Рисунке 23б, то неизвестные коэффициенты можно представить соответственно как  $(1 - K_{ж})$ ,  $k_v$ ,  $(K - k_v)$ . Величина  $k_v$  может быть определена различным способом, в том числе используя приближенную формулу Филоненко (по кривой насыщения). Отсюда, используя только концентрацию пара  $k_v$ , значение  $\theta$  может определяться как

$$\theta = \frac{c_{pa}T_o - T_w[(1 - K_{ж})c_{pas} + c_{pv}k_v + (K_{ж} - k_v)(c_{ж} - r/T_w)]}{c_{pa}T_o - [(1 - K_{ж})c_{pas}T_{a,s} + K_{ж}(c_{ж} - r/T_{ж,s})T_{ж}]} \quad (8)$$

При полном испарении жидкости  $k_v$  достигает известного предела  $K_{ж}$ , выражение для эффективности уже воздухопаровой завесы записывается как

$$\theta_v = \frac{c_{pa}T_o - T_w[(1 - K_{ж})c_{pas} + c_{pv}K_{ж}]}{c_{pa}T_o - [(1 - K_{ж})c_{pas}T_{a,s} + K_{ж}(c_{ж} - r/T_{ж,s})T_{ж}]} \quad (9)$$

Таким образом, представление эффективности возможно комбинированным способом: пока  $k_v$  вблизи стенки меньше  $K_{ж}$ , используется формула (8), далее при полном испарении (9).

Эффективность охлаждения определяется существованием на поверхности жидкой пленки. Из Рисунка 27 видно, что при наличии жидкости на

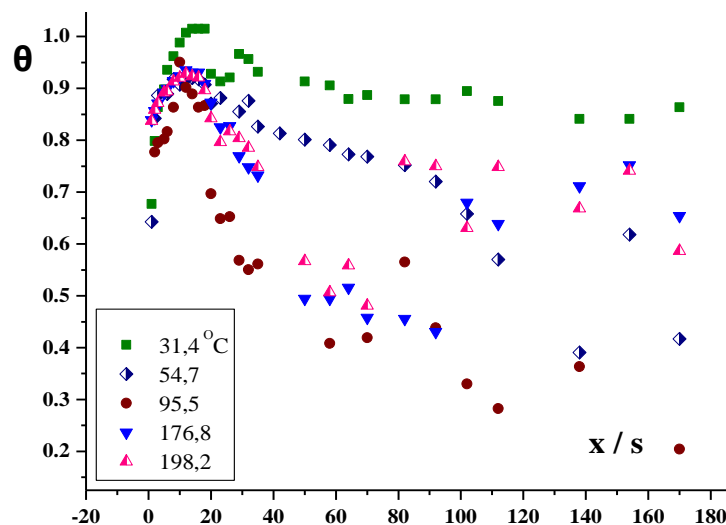


Рисунок 27 - Влияние неизотермичности потоков на эффективность газочапельного охлаждения при постоянных  $m = 0,6$ ;  $K_{ж} = 0,016$ ;  $T_s \sim 18$  °C.



стенке, имеем более высокое значение  $\theta$ . С испарением пленки, снижается и эффективность защиты.

Результаты измерения эффективности тепловой завесы могут быть обобщены и сопоставлены с расчетами для соответствующих режимов течения – турбулентного либо ламинарного. На Рисунке 28 показаны опыты с различными концентрациями капель (от 0 до 10 %) в зависимости от комплекса для ламинарного течения.

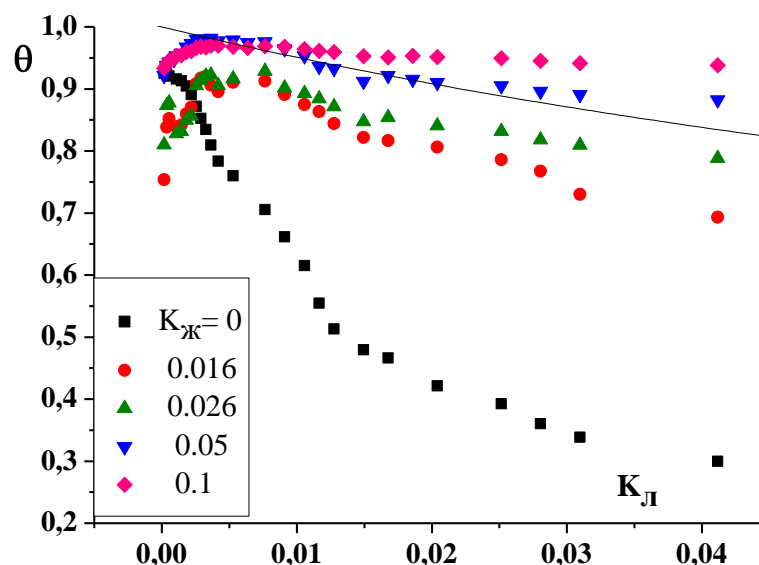


Рисунок 28 - Представление опытов в обобщенных координатах для ламинарного режима, линия – зависимость (2).

Как видно, при наличии жидкой пленки на поверхности экспериментальные точки по эффективности охлаждения группируются вблизи кривой (2). Таким образом, для опытных условий Рисунка 28 эффективность газожидкостной завесы находилась в пределах между зависимостями для турбулентного (чисто газовая струя) и ламинарного режимов течения.

### **Десорбция углекислого газа из капель, диспергированных в пристенной воздушной струе, и с поверхности жидкой пленки.**

Изучение десорбции углекислого газа, дополняет результаты исследования теплообмена в двухфазном газокапельном потоке.

Программа экспериментальных исследований включала в себя изучение влияния на массообмен значения концентрации жидкой фазы при вариации расхода воздуха в пристенной струе и основном потоке. Подача в канал жидкой пленки ( $K_{ж} = 1$ ) позволила в непосредственном виде проводить сопоставления интенсификации массопереноса при распылении жидкости по сравнению с режимом пленочного течения.

В представленной серии опытов на Рисунке 29 для газожидкостной струи сохранялись примерно постоянными параметр вдува ( $m \approx 0,7$ ) и массовая концентрация жидких капель на входе ( $K_{ж} \approx 0,25$ ), для экспериментов с жидкой пленкой -  $G_{ж}/G_0 \sim 0,14$ . Как видно из Рисунка 29, процесс десорбции

в газокапельной струе протекал более интенсивно, нежели при десорбции газа с поверхности жидкой пленки. Особенно активен он на начальном участке канала ( $x / s \leq 10 \div 20$ ). Темп падения концентрации  $\text{CO}_2$  по длине канала в жидкой пленке заметно ниже, что говорит об ослаблении массообменных процессов в режиме пленочного течения.

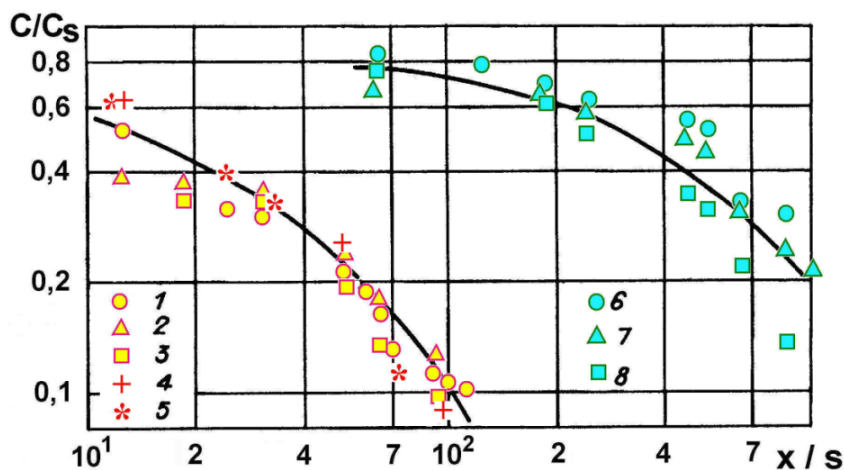


Рисунок 29 - Изменение концентрации растворенного газа  $\text{CO}_2$  в жидкой пленке по длине канала. 1 ÷ 5 - газокапельная струя, 6 ÷ 8 – жидкая пленка.

1 -  $W_0 = 29,4$  м/с; 2 – 34,4; 3 – 42,0; 4 – 43,6; 5 – 44,1;

6 –  $m = 8,1$ ;  $W_0 = 27,5$  м/с; 7 – 6,45; 34,4; 8 – 5,8; 38,1.

Одним из важных параметров, определяющих процесс десорбции в двухфазной струе, является концентрация жидкой фазы. Влияние концентрации на десорбцию  $\text{CO}_2$  для фиксированного сечения  $x / D_k \approx 1$  показало, что увеличение количества жидкости в пристенной струе приводит к ослаблению процесса массообмена между жидкостью и воздушным потоком. Влияние концентрации жидкой фазы на процесс десорбции существенно. Так, увеличение содержания жидкости в струе от  $K_{ж}$  от 0,2 до 0,6 приводит к более чем трехкратному росту концентрации углекислого газа в жидкости или к такому же снижению среднего коэффициента массоотдачи.

### Основные выводы

1. В широком диапазоне начальных условий проведено систематическое исследование эффективности пленочного охлаждения внутри осесимметричных каналах. Результаты сопоставлены с известными опытами и методами расчета, полученных при обтекании пластины. Главное отличие от обтекания полубесконечным потоком состоит в том, что происходит смыкание пограничных слоев на оси (через несколько калибров). Далее струи перемешиваются и достигают параметров полного смешения к концу рабочего участка. Наилучшее обобщение результатов измерения температуры и концентрации инородных газов на стенке получено с использованием зависимости Кутателадзе-Леонтьева.

2. Впервые проведено сопоставление способов подвода, и закрутки периферийной охлаждающей струи на входе трубы: вдув по нормали к оси канала, закрутка вторичного потока внутри коаксиального сопла и на выходе тангенциальной щели. Показано, что внутри сопла образуются вихри Гёртлера - Тэйлора, которые разрушают структуру вихревого движения. Для достижения больших интенсивностей закрутки, вторичный поток подавался под определенным углом непосредственно на выходе в рабочий участок. Максимальная закрутка струи, которая осуществлялась по этому способу ( $V_{\phi}/V_x \sim 14$ ), вызвала отрыв периферийного потока от ограничивающей стенки с образованием вихревого цилиндра в приосевой области трубы.

3. Экспериментально исследованы процессы смешения пристенных закрученных струй с незакрученным спутным потоком для начальных условий, превышающих по параметрам и геометрии известные в литературе. Изучены аэродинамика течения, распределение температуры и концентрации газов смешивающихся коаксиальных потоков, на оси и в пристенной области. Исследовано влияние на завесу неизотермичности, параметра вдува, режима течения, степени закрутки периферийной струи, соотношение плотностей обоих потоков и толщины кромки, разделяющей в начальном сечении соосные струи.

Впервые показаны аналогия профилей циркуляции, кинетической энергии в тангенциальном и аксиальном направлениях, температуры и тангенса угла закрутки. Аксиальный профиль скорости вблизи стенки при вихревом движении оказывается незаполненным, приближаясь к отрывному.

Для приближенного расчета распределения температуры и концентрации инородного газа на оси и на стенке канала при разных интенсивностях закрутки периферийного потока, параметрах вдува и режимах течения может быть использована асимптотическая теория Кутателадзе - Леонтьева.

4. Вихревое движение, а также неизотермичность потоков ( $\rho_s / \rho_o > 1,5$ ) вызывают ламинаризацию струйного смешения в канале, что значительно повышает эффективность охлаждения поверхности. При значительных размерах коаксиального сопла ( $s_2 / D_k \sim 0,21$ ) закрутка и вдув воздуха в гелиевый основной поток не приводят к ламинарным процессам смешения.

Увеличение разделяющей кромки (торцевой стенки) в трубе не так значительно влияет, как это имеет место при обтекании пластины. Закрутка периферийной струи устраняет на входе застойные зоны в следе торцевой стенки и повышает эффективность защиты с увеличением интенсивности вращения потока.

5. Для систем газочапельной завесы изучены процессы тепломассопереноса при испарении капель чистых жидкостей и бинарных смесей. Показана причина неравномерности температуры на поверхности капель, обусловленная в результате спонтанно возникающих центров вскипания. Для водных

растворов спиртов и ацетона обнаружено, что температура адиабатического испарения на поверхности становится выше, чем это имеет место для чистой жидкости.

**6.** Проведено обобщение данных по скорости испарения капель чистых жидкостей в зависимости от комплекса, включающего в себя числа Фурье, Рейнольдса и критерия Кутателадзе. В этих координатах хорошо обобщались опыты с каплями воды при наличии примеси углеродных нанотрубок  $\sim 0,1$  % и поверхностно-активных веществ ( $C_{12}H_{25}OSO_3 - Na^+$  - додецилсульфат натрия)  $\sim 0,15$  %.

**7.** С помощью емкостного метода впервые изучено влияние начальной концентрации легколетучей компоненты в водном растворе, скорости и температуры обдувающего потока. Получено, что снижение концентраций легколетучих компонентов со временем в капле происходит нелинейно, может быть описано единой зависимостью.

Скорость обтекания потоком оказывает сильное влияние на выход легколетучей компоненты из капли, но эти же опыты, представленные в зависимости от критерия гомохронности  $tV/r$ , хорошо обобщаются.

Воздействие температуры воздушной струи было существенным, пока она не достигала температуры кипения жидкостей, с превышением которой снижение концентрации становилось близким к предельному.

**8.** Впервые исследована пристенная газокапельная завеса в широком диапазоне начальных условий по параметру вдува, концентрации капель жидкости  $0 \div 50$  %,  $100$  % (жидкая пленка), температуры основного потока (до  $\sim 200$  °C). Эффективность газокапельного охлаждения за счет фазового перехода жидких частиц может более чем в 3 раза превосходить её значения для чисто газовой струи. Увеличение эффективности защиты происходит только по достижению  $6 - 10$  % концентрации капель, дальнейшее увеличение концентрации практически не влияет, причем эффективность газокапельной завесы заметно выше жидкой пленки примерно на  $\sim 12$  % при том же расходе охладителя. Показана возможность интенсификации процессов абсорбции – десорбции в двухфазном газокапельном потоке по сравнению с пленочным течением.

**9.** Разработана инженерная методика расчета эффективности газокапельной завесы, основанная на использовании полных энтальпий смешивающихся потоков двухфазной смеси, позволяющая оценивать параметры эффективности охлаждения при ламинарном и турбулентном режимах течения.

В работе созданы фундаментальные основы эффективности охлаждения поверхностей с помощью пристенных закрученных одно и – двухфазных струй. Полученные данные могут быть использованы при создании новых

систем тепловой защиты, при расчетах процессов стабилизации плазменных струй газовым вихрем, а также в энергоустановках с испарением и горением газокапельных топлив.

Научные результаты представленной работы применимы для большого класса задач, где возникает испарение капель многокомпонентного состава в двухфазном потоке, осаждение капель на обтекаемую поверхность. Опытные данные об испарении капель чистых жидкостей и бинарных смесей послужат основой для проверки новых моделей расчета.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы научные результаты на соискание ученой степени доктора наук:*

1. Леонтьев, А.И. Тепловая защита стенок плазматронов / А.И. Леонтьев [и др.] - Новосибирск: ИТФ СО РАН, 1995. - 336 с. (Низкотемпературная плазма. Т. 15).
2. **Шишкин, Н.Е.** Структура вращающегося потока газа в кольцевой щели и эффективность закрученной газовой завесы / Н.Е. Шишкин, Н.А. Дворников // Изв. СО АН СССР. - 1977. - № 3. Сер. техн. наук. Вып. 1. - С. 35 – 39.
3. Dvornikov, N.A. Swirled-Film Cooling of Cylindrical Channels / N.A. Dvornikov, V.P. Lebedev, **N.Ye. Shishkin** // Heat Transfer – Soviet Research. - 1980. - Vol. 12, No. 6. - P. 1 – 20.
4. Волчков, Э.П. Экспериментальное исследование газовой завесы в трубе / Э.П. Волчков, В.П. Лебедев, **Н.Е. Шишкин** // Изв. СО АН СССР. - 1983. - № 3. Сер. техн. наук. Вып. 1. - С. 25 – 31.
5. Volchkov, E.P. Film cooling efficiency in the case of interaction between a wall jet and a countercurrent flow / E.P. Volchkov, V.P. Lebedev, **N.E. Shishkin** // Heat Transfer, Sov. Research. - 1986. - Vol. 18, No. 6. - P. 69 – 73.
6. Волчков, Э.П. Экспериментальное исследование влияния концентрации мелкодисперсных капель жидкости на эффективность газовой завесы / Э.П. Волчков, В.П. Лебедев, В.И. Терехов, **Н.Е. Шишкин** // Сиб. физ.-техн. журн. - 1992. - Вып. 1. - С. 28 - 32.
7. Лебедев, В.П. Массообмен при десорбции газа из мелкодиспергированных капель жидкости в пристенной двухфазной струе / В.П. Лебедев, В.И. Терехов, **Н.Е. Шишкин** // ПМТФ. - 1995. - Т. 36, № 3. - С. 122 - 129.
8. Volchkov, E.P. Simulation the flow stabilization process by peripheral flow swirling as applied to plasma reactors / E.P. Volchkov, V.P. Lebedev, V.I. Terekhov, **N.E. Shishkin** // Thermal Plasma Torches and Technologies. - 1999. - Pt. 2. - P. 440 - 465. - (Plasma Torches. Basic Studies and Design, V. 1).

9. Терехов, В.И. Экспериментальное исследование смешения газового потока с пристенной газокапельной струей / В.И. Терехов, К.А. Шаров, **Н.Е. Шишкин** // Теплофизика и аэромеханика. - 1999. - № 3. - С. 331 – 341.
10. Volchkov, E.P. An Experimental Study of the Flow Stabilization in a Channel with a Swirled Periphery Jet / E.P. Volchkov, V.P. Lebedev, V.I. Terekhov, **N.E. Shishkin** // Int. J. Heat and Mass Transfer. - 2000. - V. 49. - P. 375 - 386.
11. Лебедев, В.П. Массообмен при десорбции газа с поверхности жидкой пленки при наличии спутного потока / В.П. Лебедев, В.И. Терехов, **Н.Е. Шишкин** // ПМТФ - 2000. - Т. 41, № 4. - С. 131 – 138.
12. Volchkov, E.P. Modelling of flow stabilization by the peripheral flow as applied to plasma reactors / E.P. Volchkov, V.P. Lebedev, V.I. Terekhov, **N.E. Shishkin** // Thermal Plasma Torches and Technologies. - 2000. - V. 44. - P. 335 – 351.
13. Terekhov, V.I. No isothermal Mixing of Near wall Gas-Liquid Jets with a Flow in a Tube / V.I. Terekhov, K.A. Sharov, V.P. Lebedev, **N.E. Shishkin** // Heat Transfer Research. - 2001. - Vol. 32. Issue 4 – 6, 7 p.
14. Терехов, В.И. Теплозащитные свойства двухфазных газокапельных завес в вертикальном цилиндрическом канале / В.И. Терехов, К.А. Шаров, **Н.Е. Шишкин** // Изв. РАН, Энергетика. - 2003. - № 6. - С. 135 - 143.
15. Terekhov, V.I. The thermal efficiency of near wall gas-drop screens. Part II. Experimental study and comparison with numerical results / V.I. Terekhov, M.A. Pakhomov, K.A. Sharov, **N.E. Shishkin** // Int. J. of Heat and Mass Transfer. - 2005. - Vol. 48, No. 9. - P. 1760 - 1771.
16. Терехов, В.И. Адиабатическое испарение бинарных смесей жидкости на поверхности пористого шара / В.И. Терехов, **Н.Е. Шишкин** // Теплофизика и Аэромеханика. - 2009. - Том 16. № 2. - С. 253 – 259.
17. Терехов, В.И. Температура поверхности испаряющихся капель бинарных растворов / В.И. Терехов, **Н.Е. Шишкин** // Ползуновский вестник. - 2010. - № 1. - С. 55 – 59.
18. Терехов, В.И. Экспериментальное и численное исследование нестационарного испарения капель жидкости / В.И. Терехов, В.В. Терехов, **Н.Е. Шишкин**, К.Ч. Би // ИФЖ. - 2010. - Т. 83, № 3. - С. 829 - 836.
19. Назаров, А.Д. Емкостной метод измерения концентрации компонентов в каплях бинарных растворов / А.Д. Назаров, В.И. Терехов, **Н.Е. Шишкин** // ЖТФ. - 2011. - Том 81. Вып. 4. - С. 45 - 49.
20. Терехов, В.И. Испарение капель воды с углеродными нанотрубками / В.И. Терехов, **Н.Е. Шишкин** // Письма в ЖТФ. - 2012. - Том 38. Вып.1. - С. 51 - 57.
21. **Shishkin, N.E.** Laws of Jet Mixing of the Swirled Flows in a Pipe / N.E. Shishkin // Journal of Energy and Power Engineering. - 7 (2013). - P. 1223 - 1230.
22. Терехов, В.И. Способы повышения эффективности пленочного охлаждения с помощью вихревых пристенных струй / В.И. Терехов, **Н.Е.**

**Шишкин** // Теплофизика и Аэромеханика. - 2013. - Том 20, № 6. - С. 739 - 747.

23. **Шишкин Н.Е.** Влияние высоты щели и разной плотности коаксиальных струй на смешение в ограниченном закрученном потоке / Н.Е. Шишкин // Теплофизика и Аэромеханика. - 2015. - Том 22, № 4. - С. 445 – 451.

*Публикации в других периодических изданиях и сборниках научных трудов:*

24. **Шишкин, Н.Е.** Эффективность газовой завесы при подаче через щель закрученного вторичного потока / Н.Е. Шишкин, Н.А. Дворников // Некоторые задачи гидродинамики и теплообмена: Сб. науч. тр. - Новосибирск, 1976. - С. 149 - 157.

25. **Шишкин, Н.Е.** Эффективность газовых завес при закрученном вдуве воздуха, аргона и гелия / Н.Е. Шишкин // Исследования по гидродинамике и теплообмену: Сб. науч. тр. - Новосибирск, 1976. - С.124 - 130.

26. **Шишкин, Н.Е.** Влияние закрутки периферийного потока на смешение разноплотностных газов в трубе / Н.Е. Шишкин // Теплофизика и физическая гидродинамика: Сб. науч. тр. – Новосибирск, 1978. – С.141 – 145.

27. Дворников, Н.А. Закрученная газовая завеса в цилиндрическом канале / Н.А. Дворников, В.П. Лебедев, **Н.Е. Шишкин** // Структура пристенного пограничного слоя (вынужденное течение, тепловая конвекция): Сб. науч. тр. - Новосибирск, 1978. - С. 81 - 100.

28. Лебедев, В.П. Влияние толщины выходной кромки тангенциальной щели на эффективность закрученной завесы / В.П. Лебедев, **Н.Е. Шишкин** // Пристенные струйные потоки: Сб. науч. тр. - Новосибирск, 1984. - С.14 - 20.

29. Назаров, А.Д. Экспериментальное исследование концентрации и тепло-массообмена при испарении капель бинарных жидкостей в воздушном потоке / А.Д. Назаров, В.И. Терехов, **Н.Е. Шишкин** // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Сб. науч. тр. Вып. 1(1). - Киев: «НПВК Триакон», 2009. - С. 63 - 66.

30. Терехов, В.И. Испарение капель водных смесей легко – и высококипящих жидкостей в воздушном потоке / В.И. Терехов, **Н.Е. Шишкин** // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Сб. науч. тр. Вып. 2(4). - Киев: «НПВК Триакон», 2010. - С. 220 – 225.

31. **Шишкин, Н.Е.** Адиабатическое смешение в закрученной пристенной струе / Н.Е. Шишкин // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Сб. науч. тр. Вып. 2(4). - Киев: «НПВК Триакон», 2010. - С. 226 – 230.

32. Терехов, В.И. Экспериментальное исследование испарения капель наножидкости в потоке сухого воздуха / В.И. Терехов, **Н.Е. Шишкин** // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Сб. науч. тр. Вып. 2(7). - Киев: «НПВК Триакон», 2011. - С. 197 – 200.

33. Терехов, В.И. Влияние поверхностно активного вещества на испарение водяных капель / В.И. Терехов, **Н.Е. Шишкин**, Х.К. Ли // Современная

наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Сб. науч. тр. Вып. 2(7). – Киев: «НПВК Триакон», 2011. С. 215 – 219.

34. **Шишкин, Н.Е.** Эффективность пристенной завесы при газокапельном охлаждении / Н.Е. Шишкин // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Сб. науч. тр. Вып. 1(12). - Киев: «НПВК Триакон», 2013. - С. 340 – 345.

35. Терехов, В.И. Методы интенсификации пленочного охлаждения рабочих поверхностей в энергетических устройствах. / В.И. Терехов, А.А. Халатов, **Н.Е. Шишкин** // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Сб. науч. тр. Вып. 1(16). - Днепропетровск: «НПВК Триакон», 2015. - С. 67 – 73.

Подписано к печати 16.05.16 г. Заказ № 7  
Формат 60×84/16. Объем 2,0 уч.-изд. л. Тираж 120 экз.

---

Отпечатано в Институте теплофизики  
им. С.С. Кутателадзе СО РАН  
630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1