

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертационной работе Слесаревой Екатерины Юрьевны «Экспериментальное исследование теплообмена при вынужденном течении газа в каналах сложной формы», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Диссертационная работа Слесаревой Е.Ю. посвящена экспериментальному исследованию течений газа в каналах сложной формы, моделирующих элементы теплообменников и стержневых тепловыделяющих сборок. Эти элементы являются ключевыми составными частями многочисленных технических устройств, от систем кондиционирования воздуха до химических реакторов и тепловыделяющих сборок АЭС. Особое внимание в диссертации уделено течениям в коротких каналах при наличии тепловыделения. Для течения в таких каналах характерно наличие переходного участка, в котором в условиях взаимодействия с турбулентностью входного потока формируются тепловой и динамических пограничные слои. В таких условиях существующие расчетные формулы, большинство которых пригодно для случаев полностью развитого турбулентного либо ламинарного течения, часто оказываются ненадежным средством оценки параметров течения, что вызывает необходимость широких экспериментальных исследований. Вместе с тем именно системы коротких каналов являются перспективными в целом ряде приложений, т.к. они позволяют произвести существенную интенсификацию теплообмена. **Актуальностью** данных систем в приложениях и их относительно слабой теоретической изученностью обусловлено проведение диссертационного исследования Слесаревой Е.Ю.

### **Оценка содержания диссертации.**

Рецензируемая диссертационная работа характеризуется полнотой и завершенностью. Текст диссертации состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Во введении обосновывается актуальность исследуемой темы, формулируются цель и задачи работы. В конце введения описаны структура диссертации, кратко изложено содержание четырех глав, приведены сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертации.

**Первая глава** диссертации посвящена определению основных параметров, характеризующих геометрию каналов сложной формы, анализу литературы, расчетам пространственного распределения скорости в каналах для случая стабилизированного установившегося течения с использованием пакетов программ OpenFoam. Отмечено, что существующие в литературе рекомендации и формулы в подавляющем большинстве случаев относятся к случаям стабилизированных течений вдали от входа. Для случая коротких каналов необходимы специальные исследования как для определения их гидравлического сопротивления, так и для расчета теплообмена. Описаны теплофизические свойства газовых теплоносителей, в частности, бинарных газовых смесей, характеризующихся низкими значениями числа Прандтля. В заключительной части первой главы описаны существующие методы исследования температурных полей в газовых потоках, сформулирована постановка задач исследования.

**Вторая глава** диссертации посвящена описанию экспериментальных установок для исследования течений в сложных каналах при наличии теплообмена с использованием в качестве рабочей среды либо воздуха, либо смеси инертных газов (в последнем случае применена система закрытого типа). Дано описание панорамного метода определения распределения температуры в потоке газа на выходе из канала и

методики обработки термограмм с учетом характеристик сетки-термоприемника. Отдельное внимание уделено анализу эффектов конденсации влаги в потоке, что является весьма важным, поскольку часть опытов была проведена вблизи точки росы. Вторая глава диссертации заканчивается исчерпывающим анализом погрешностей измерения основных величин и определенных с их помощью величин безразмерных критериев. На основании приведенных данных можно сделать вывод о высокой достоверности полученных экспериментальных данных. Следует отметить высокую ценность и оригинальность методической части диссертационной работы, о чем свидетельствует получение патента на сетчатый термоприемник и способ измерения температурного поля газового потока.

**Третья глава** посвящена описанию результатов экспериментального исследования теплообмена при течении газа в коротких каналах и сборке тепловыделяющих элементов. В начале третьей главы приведены результаты для случая течения в горизонтальной круглой трубе, что позволило провести верификацию используемой методики путем сравнения с известными с литературы данными и зависимостями для стабилизированного течения вдали от входа в канал. Далее описаны результаты исследования течения в квазитреугольном канале, получена экспериментальная зависимость коэффициента трения от числа Рейнольдса, причем показано, что сопротивление трения слабо зависит от условий теплообмена. Получены зависимости среднего по длине числа Нуссельта от числа Рейнольдса и обратного числа Пекле, показано, что зависимость от числа Нуссельта от обратного числа Пекле для квазитреугольного канала проходит существенно выше известной из литературы зависимости для круглого канала. Выполнено исследование нестационарного режима течения при обтекании сборки тепловыделяющих элементов как при постоянном массовом расходе газа и переменной тепловой нагрузке на нагреватели, так и при постоянной тепловой нагрузке и переменном массовом расходе. В частности, получены интересные данные о влиянии малого разброса геометрических параметров каналов в сборке на их теплотехнические характеристики, что представляется весьма важным в приложениях к конкретным техническим устройствам.

**Четвертая глава** посвящена описанию экспериментального исследования теплообмена в газовых смесях при малых числах Прандтля в круглых и треугольных каналах. Выполнен обзор посвященной данному вопросу литературы, приведены данные, говорящие о слабом влиянии числа Прандтля на коэффициент сопротивления. Зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса существенным образом зависит от числа Прандтля газовой смеси. Однако, при введении специального критерия типа обратного числа Пекле данные можно представить в универсальном виде. Особенностей влияния значения числа Прандтля газовых смесей на интенсификацию теплообмена в каналах различного поперечного сечения не обнаружено.

**В заключении** диссертации сформулированы основные результаты исследований.

Следует отметить полученные в диссертации **основные результаты**:

- Модифицирован и адаптирован к задачам исследования панорамный малоинерционный тепловизионный метод определения температурных характеристик потока на выходе из каналов. На способ измерения и устройство получен патент;
- Разработаны и изготовлены экспериментальные стенды для изучения теплообмена в газовых потоках в каналах сложной формы;

– Получена обобщающая зависимость для среднего числа  $Nu$  от  $1/Re \cdot x/Dг$  в канале квазитреугольного поперечного сечения при граничных условиях первого рода в диапазоне чисел  $Re$  от 700 до 5000.

– Предложена обобщающая зависимость для теплообмена в каналах круглой и треугольной формы для смесей газов, имеющих низкие значения чисел Прандтля ( $Pr = 0,2 \div 0,7$ ) при постоянной плотности теплового потока на стенке канала. Обнаружено, что свойства смеси не оказывают заметного влияния на интенсификацию теплообмена в каналах.

– Большой интерес представляет показанная в работе возможность своевременного обнаружения гидравлических и тепловых разверок в теплообменниках при наличии малых отклонений геометрических размеров каналов.

Все результаты были получены впервые и не имеют аналогов в других работах.

**Научная и практическая значимость работы** заключается в первую очередь в разработке и усовершенствовании методики тепловизионной диагностики газовых потоков и ее приложении к конкретным вариантам геометрии теплообменных устройств. Диссертационная работа убедительно показала универсальность и гибкость выбранного подхода, высокую информативность получаемых с его помощью данных. Полученные в работе результаты и методики могут быть применены для проектирования новых теплотехнических теплообменных устройств и экспресс-анализа параметров существующих устройств.

**Достоверность результатов** обосновывается тщательной разработкой методик проведения экспериментов, подтверждается сравнением полученных результатов с известными данными других теоретических и экспериментальных работ, тщательным анализом погрешностей измерений.

#### **По содержанию диссертационной работы имеется несколько замечаний:**

1. Некоторые обозначения в автореферате введены без определения. Например, на странице 7 автореферата написано, что «Во второй главе описываются экспериментальные установки для исследования теплообмена при граничном условии  $q_{ст} = const$  и  $T_{ст} = const \dots$ ». Конечно, читатель может догадаться, что речь идет о тепловом потоке и температуре, но было бы лучше расшифровать обозначения словами.
2. На странице 90 диссертации в таблице 1.1. данные для длины участка тепловой стабилизации (в метрах) приведены до 5 знака после запятой. Вряд ли такая точность имеет смысл.
3. В работе в качестве мотивации указаны возможные приложения к стержневым тепловыделяющимся сборкам типа используемых в реакторах АЭС. В этой связи в тексте диссертации было бы уместно краткое обсуждение того, какие результаты, полученные в опытах с газовыми смесями, применимы и в случае жидких теплоносителей, в частности, с учетом того, что вязкость газов (жидкостей) растет (убывает) с ростом температуры.
4. В перспективе было бы полезно количественное исследование зависимости полученных в диссертации результатов от степени турбулентности потока на входе в канал.

## Заключение

Диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу в области экспериментального исследования теплообмена в газовых течениях в каналах сложной формы.

Диссертация и автореферат написаны ясным научным языком, хорошо иллюстрированы. **Автореферат** достаточно полно отражает содержание диссертации.

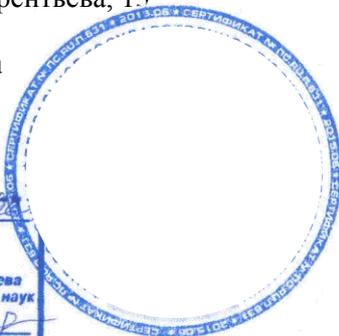
**Основные результаты** исследований опубликованы в 16 работах, включая 4 статьи в журналах из списка ВАК, получен патент на изобретение. Работа прошла апробацию на многочисленных конференциях российского и международного уровня и соответствует специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Диссертационная работа «Экспериментальное исследование теплообмена при вынужденном течении газа в каналах сложной формы» удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Слесарева Екатерина Юрьевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Заведующий лабораторией  
«Экспериментальной прикладной гидродинамики»,  
заместитель директора ИГиЛ СО РАН по научной работе  
доктор физико-математических наук  
Евгений Валерьевич Ерманык

630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15  
тел.: +7 (383) 330 12 41;  
e-mail: ermanyuk@hydro.nsc.ru

05.09.2017 г.



Отсутствует в Совете 05.09.17  
Уч. секретарь Д.С. Жуков / Член Ученого совета  
С.И. Иванов / ознакомлена 05.09.17.  
Ермолов / Слесарева Е.Ю.