

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу **Миронова Александра Александровича** «Теплообмен и гидродинамика при течении однофазного теплоносителя в щелевых каналах с поверхностными вихрегенераторами различной формы», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6 - Теоретическая и прикладная теплотехника.

Работа выполнялась в известной научной школе казанских теплотехников, возглавляемой академиком АНТ Гортышевым Ю.Ф. и членом – корреспондентом АНТ Поповым И.А. Этой школе принадлежит ряд новых и принципиальных результатов в области интенсификации теплообмена. В ней подготовлена целая плеяда научных кадров высшей квалификации, специалистов в области теплофизики и, особенно, в части решения актуальных прикладных задач.

Работы казанской школы всегда отличала ясность постановки, оригинальность решения и достоверность полученных результатов. Это заключение в полной мере можно отнести и к диссертационной работе А.А. Миронова. Она посвящена решению задачи интенсификации конвективного теплообмена с помощью цилиндрических траншей-впадин конечной длины, но трех различных конфигураций:

1. Одно и - многорядной системы прямолинейных траншей, ориентированных под углом к направлению потока;
2. Траншея дуговой формы, представляющая собой часть усеченного тора;
3. Вихрегенераторы типа бумеранга с различным соотношением длин прямолинейных участков. В поперечном сечении это также сегмент круга.

Первые две задачи изучались экспериментально, а третья – с помощью численного моделирования. Наиболее детальное исследование было проведено для прямолинейных траншей на различных опытных установках.

Следует признать, что большое влияние на постановку задач в целом в диссертационной работе и ее идеологическое наполнение оказал профессор Исаев С.А., который работал в Казани в качестве ведущего ученого. Анонсированные им аномально высокие тепловые показатели при использовании траншейных канавок, полученные численно, требовали экспериментального подтверждения. Это составило в итоге существо работы, что отражено в целях работы и в разделе научной новизны. Забегая вперед, отметим, что провести корректного сопротивления расчета и эксперимента не удалось. Качественные оценки полученной базы данных не показали аномальных свойств всех использованных в работе вихрегенераторов, кроме многорядного их расположения. Однако условия проведения опытов с многорядными системами резко отличаются от однорядных, что вызывает много вопросов и о чем ниже будет говориться более подробно.

Актуальность диссертационной темы не вызывает сомнений. Этой проблеме уже более ста лет и интерес к ней только возрастает. Что касается использования кольцевых канавок – траншей, то пионером здесь была советская команда из МАИ под руководством Г.А. Дрейцера и Э.К. Калинина. Предложенные конфигурации с чередующимися канавками стали основой новой энергоэффективной технологии интенсификации теплообмена в трубах. Что касается канавок конечной длины и наклоненных к оси канала, а также V – образных вихрегенераторов, то они нашли широкое применение в пластинчатых теплообменниках, в частности, фирмы «Альфа Лаваль» и других производителей. Новую жизнь эта тематика получила в многочисленных работах Исаева С.А.

Рассматриваемая задача является не простой. Для сравнения, луночная эпопея, посвященная изучению особенностей течения и теплоотдачи на поверхностях с полусферическими кавернами, несмотря на определенные успехи, продолжается вот уже более сорока лет. Для траншей дополнительными параметрами являются их относительная длина, угол наклона и форма. Это не позволяет в рамках одной работы получить исчерпывающую информацию о характере влияния перечисленных факторов. Поэтому полученные автором результаты опытов и есть предмет **новизны исследований**, поскольку они получены впервые. При этом следует подчеркивать, что экспериментальная часть была ориентирована на получение средних параметров как по гидравлическим потерям, так и теплопереносу.

Перейдем к краткому анализу содержания работы. Диссертация общим объемом 179 стр. состоит из пяти глав, введения и заключения, а также списка литературы, содержащим 166 наименований. Больших претензий к оформлению нет, как и к иллюстративному материалу. Единственно, картинки визуализаций и особенно в автореферате можно было сделать крупнее.

Обзорная часть (глава 1) написана обстоятельно и с хорошим знанием предыстории вопроса. Особое внимание привлекли Таблицы 1.1 (11 страниц) и Таблицы 1.2 (6 страниц), где наглядно показаны имеющиеся достижения как в области исследований (1.1), так и инженерных приложений (1.2). В итоге автором делается правильный вывод об ограниченности экспериментальной информации в данной области и необходимости детального изучения.

Во второй главе описаны экспериментальные установки, методы измерений и анализ неопределенностей измерений. Число экспериментальных стендов и рабочих участков к ним впечатляет. Для визуализации используется водяной стенд. Часть экспериментов по гидравлическим потерям также проведена на воде, а термографическая

визуализация – на воздушном стенде. Основная же серия экспериментов по теплоотдаче и сопротивлению проводилась по - существу в мини – каналах высотой 1-3 мм с различной шириной. При этом конфигурации каналов для изучения одно и – многорядного расположения траншей принципиально отличались между собой, что затрудняет сопоставление характеристик таких каналов. Используемые методы измерений и визуализации являются традиционными и хорошо опробованными. Сделанные оценки неопределенностей измерения правдоподобны, что является дополнительным **обоснованием достоверности** полученных данных. Отметим, что для тепловых параметров эта величина может достигать почти 15%.

Базовое место в диссертации занимает третья глава. В ней представлены результаты жидкостной и термографической визуализации, теплообмена и гидравлических потерь прямолинейных наклоненных на 45° траншей при вариации числа Рейнольдса. Главу предваряет подробный обзор, посвященный глубокому анализу результатов численных исследований С.А. Исаева. Методологически это представляется неверным и складывается такое ощущение, что автор изначально был настроен на полное подтверждение результатов численного расчета. Многие выводы, следуемые из расчета и которые автор использует для интерпретации опытных данных, являются ошибочными и не подтверждаются прямыми измерениями. Это в частности относится к утверждению о мощном вихревом движении среды внутри траншеи, которые по литературным данным практически полностью исчезают на протяжении $2/3$ ее длины. Другое дело, если бы обзорный анализ был помещен при обсуждении опытных данных с соответствующими конкретными выводами о согласии расчета и эксперимента.

Визуализация течения сделана блестяще. Эта база данных огромна и она, по мнению рецензента, ждет своей основательной доработки. Данные

по термографической визуализации выглядят менее убедительно. Причины этого будут отмечены в разделе замечаний.

Результатами, представляющими **основной элемент новизны и практической значимости** диссертации являются корреляционные соотношения для средней теплоотдачи и сопротивлению систем траншей, используемых в качестве поверхностных вихрегенераторов.

Четвертая глава является как бы аналогом третьей, с той лишь разницей, что в ней экспериментально изучается дуговая траншея. Не вдаваясь в тонкости, отметим главное: термогазодинамические характеристики дуговых траншей слабо отличаются от прямолинейных и каких-то сильных эффектов изменение формы траншеи эксперимент не выявил.

Такое же заключение можно сделать и по результатам главы 5. Здесь рассматривается третья конфигурация – траншея типа бумеранг. Эта часть работы выполнена численно, что говорит в пользу высокой квалификации автора и как специалиста в области численных исследований. Можно отметить высокий уровень исследований, а полученные данные вполне **надежными**. Лунки - бумеранги слабо интенсифицируют теплообмен – порядка 10%.

Сформулированные выводы в целом дают правильное представление о сущности полученных результатов, их обоснованность и, что немаловажно, практическую ценность. Методами машинного обучения получены обобщающие зависимости, рекомендуемые для практических оптимизационных расчетов. При этом поставленные цели достигнуты в работе в полной мере, а необходимые задачи для достижения цели решены.

Следует отметить, что работа не лишена недостатков. Основные замечания могут быть сформулированы следующим образом:

1. Не очень детально описаны экспериментальные стенды. В частности, для основного стенда, на котором получены данные по сопротивлению

и теплоотдаче не указан характер тепловых граничных условий. Медная нагреваемая фольга обеспечивает постоянство теплового потока по рабочей поверхности. Сверху фольга накрывается стальной пластиной (толщина которой не указывается) приводит к сглаживанию температур, приводя в итоге к некоему среднему между $q_w = \text{const}$ и $T_w = \text{const}$. По – видимому, поэтому тепловизионные картинки у автора получились такими не выразительными и они не в полной мере отражают особенности распределения температур в траншеях и их окрестности.

2. Вызывает вопрос эффект сильной интенсификации теплообмена (в разы) для многорядного расположения траншей по сравнению с однорядным. Не является причиной этого ультра малая высота канала, сравнимая с глубиной траншеи, учитывая при этом, что противоположная стенка не нагревалась?
3. Осталось непонятным, что автор подразумевает под вторичным течением? Это рециркуляционное возвратное течение внутри лунки, вызванное отрывом потока или поток газа вдоль траншеи? Либо что то иное?
4. В экспериментах по сопротивлению детально исследованы и ламинарный, и турбулентный режимы течения. Возникает вопрос, а что автору помешало получить такие же данные и для теплоотдачи, ограничившись лишь турбулентным режимом? Отсутствуют при этом и данные автора по теплогидравлической эффективности, которые бы существенно усилили полученную базу данных.
5. Автор сделал прекрасный обзор – глубокий и детальный. Но почему то в нем отсутствуют опытные данные Института теплофизики СО РАН, имеющие непосредственное отношение к данной проблеме.
6. Как то странно видеть на рис. 3.19 диссертации и рис. 10а в автореферате график из известной работы Лиграни, трактуемый как методика Халатова. Может перепутаны подписи к этому рисунку?

7. Диссертация написана строгим и понятным языком. Однако в нем есть досадные неточности и ошибки. К примеру: на стр. 87 и далее в нескольких местах, что означает «...в области крайней по ходу течения кромки овально-траншейного выемки,..) – это где? Стр. 87 – тепловой поток 90 Вт? Это не поток, а мощность. Почему расчетные линии на рис. 3.14 заметно ниже на подобном рис. 3.15. Работа [52] приводится в списке литературы еще дважды, как [91] и [97].

Перечисленные замечания не снижают в целом **высокой оценки** представленной к защите работы. Она полностью **отвечает номенклатуре специальности** и носит завершённый характер. Результаты работы добротны опубликованы как в российской, так и зарубежной научной печати и они получили **основательную апробацию** на большом числе научных форумов. **В автореферате в полной мере обоснованы положения**, выносимые на защиту и детально отражены результаты, по которым сформулированы выводы.

Диссертационная работа Миронова А.А. была доложена в полном объеме в он-лайн режиме на научном семинаре «Термогазодинамика и турбулентность» Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН 21.11.2024 г. В целом исследование получило положительную оценку семинара, а некоторые вопросы и замечания нашли отражение в данном отзыве.

Таким образом, можно констатировать, что диссертационная работа **Миронова Александра Александровича «Теплообмен и гидродинамика при течении однофазного теплоносителя в щелевых каналах с поверхностными вихрегенераторами различной формы»**, в которой представлено решение актуальной и практически важной задачи поиска новых методов интенсификации конвективного теплообмена в элементах энергетических установок, выполнена на **высоком научном уровне** и она имеет завершённый вид. Полученные автором данные имеют существенное значение как для создания фундаментальных основ интенсификации

теплообмена, так и решения ряда важных инженерных задач энергетики, ракетно – космической техники и химических технологий.

Работа соответствует критериям, установленным в п.п. 9 – 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г № 842), а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6 - Теоретическая и прикладная теплотехника.

Официальный оппонент:

Главный научный сотрудник лаборатории
термогазодинамики Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук
630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева 1;
+7383-330-84-80, director@itp.nsc.ru, <http://www.itp.nsc.ru>),
доктор технических наук -
01.04.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника),
профессор

Терехов Виктор Иванович

Дата

16.12.2021

Подпись В.И. Терехова удостоверяю:

Ученый секретарь Института теплофизики,

к.ф.-м.н.



Макаров Максим Сергеевич