

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Шакирова Руслана Айваровича
«Оптимальные теплогидравлические характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертационная работа посвящена исследованию способов повышения теплогидравлической эффективности теплообменных устройств при пассивной поверхностной интенсификации теплообмена. Данное направление исследований соответствует энергетической стратегии развития РФ. Кроме того, исследования, направленные на интенсификацию теплообменных процессов, включены в перечень приоритетных направлений развития науки, технологий и техники, а также в перечень критических технологий РФ, что доказывает **актуальность** работы. Предложенная методика исследования однофазной вынужденной конвекции и полученные в результате её применения результаты позволяют проектировать энергоэффективное теплообменное оборудование, а предложенный автором способ интенсификации теплообмена позволяет эксплуатировать поверхностные теплообменные устройства с обеспечением теплогидравлической эффективности.

Диссертационная работа полностью соответствует паспорту специальности 01.04.14 - «Теплофизика и теоретическая теплотехника» по формуле специальности: исследования по процессам переноса тепла и массы в сплошных средах; имеющие целью обоснование методов расчета термодинамических и переносных свойств в различном агрегатном состоянии, выявление механизмов переноса массы, импульса и энергии при конвекции; обоснование и проверка методов интенсификации тепло- и массообмена и тепловой защиты.

Для решения задач диссертационного исследования использованы методы системного анализа, математического моделирования, искусственной нейронной сети (ИНС), методы оптимизации путём бутстрэпирования, ROC-анализа, объектно-ориентированного программирования. Построение модели ИНС осуществлялось посредством написания программного кода на языке Python 3.7, с применением библиотек Keras и TensorFlow.

В первой главе автором проведена серьёзная работа по анализу исследований интенсификации теплообмена различными типами пассивных интенсификаторов. По результатам аналитического обзора сформирована обширная база данных по режимным и геометрическим характеристикам, влияющим на тепловую эффективность, гидравлическое сопротивление и теплогидравлическую эффективность при пассивной интенсификации трубчатых и пластинчатых теплообменных поверхностей с интенсификаторами в виде сферических, V-образных, эллиптических,

цилиндрических и подковообразных выемок, а также полусферических, кольцевых и спиральных выступов.

Во второй главе разработаны методики подготовки исходных данных к анализу и обобщению результатов экспериментальных исследований в среде искусственных нейронных сетей. На основе предложенных методик и сформированной базы параметров экспериментальных исследований произведено нейросетевое моделирование поверхностной интенсификации теплообмена, что позволило установить характерные логические взаимосвязи между режимными и геометрическими характеристиками поверхностных интенсификаторов теплообмена. Установленные взаимосвязи использованы для обобщения результатов экспериментальных исследований, оценки их достоверности и возможности исследования тепловой, гидравлической и теплогидравлической эффективности за пределами диапазонов экспериментальных исследований. Обобщающие зависимости представлены в виде нейросетевой модели.

В третьей главе описано программное обеспечение, реализующее метод, произведена верификация результатов нейросетевого моделирования поверхностной интенсификации с результатами экспериментальных исследований. Полученные обобщающие характеристики и установленные характерные взаимосвязи между режимными и геометрическими характеристиками поверхностных интенсификаторов теплообмена позволили создать метод исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических характеристик трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы.

В четвёртой главе показано применение разработанного программного обеспечения для исследования эффективности теплообменных поверхностей с вихреобразователями рассмотренных типов и приведён пример практического использования методики для оптимизации работы аппарата воздушного охлаждения компримированного природного газа.

Созданное автором программное обеспечение позволяет прогнозировать значения тепловой, гидравлической и теплогидравлической эффективности, а также подбирать оптимальные значения параметров режимных и геометрических характеристик для исследованных типов поверхностных интенсификаторов в трубчатых и пластинчатых теплообменниках по заданным пользователем параметрам.

Предложенный способ интенсификации теплообмена путём интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования убедительно демонстрирует **научную новизну** диссертации, а также ее **теоретическая и практическая значимость**.

Ещё одним доказательством научной новизны работы является то, что она находится на стыке несколько научных направлений: теплофизики, теплотехники, автоматизации, нейросетевого программирования.

Достоверность и обоснованность полученных результатов полностью подтверждается использованием апробированных методов компьютерного и математического моделирования и сравнением результатов моделирования с фактическими значениями экспериментальных исследований.

К работе можно высказать некоторые **замечания**.

Поскольку первая глава посвящена обзору и систематизации литературных данных по пассивной интенсификации теплообмена с интенсификаторами в виде выемок и выступов различной геометрии, в тексте встречаются различные обозначения, введённые авторами рассматриваемых работ, не все из которых объяснены в тексте диссертации. Например, на рис.1.8 приводятся зависимости $St/St_{гр}$ от геометрических параметров системы сферических выемок, при этом число Стантона вводится значительно позже формулой (1.4); в табл.1.2. приведена взятая из [19] зависимость $Nu(Re)$ с коэффициентом пропорциональности k , без пояснений, что это за коэффициент; не понятно, что такое H^+ и h^+ на рис.1.22 и 1.23; чем отличаются d и d_1 и что такое p в (1.1); что такое показатель давления на рис.1.31.

Кроме того, имеются, в небольшом количестве, опечатки. Например, в табл.1.3 ошибочно указана граница переходного режима; на стр.32 сомнения вызывают формулы $Nu=(d/D)^{-1.93}$ и $\xi=(d/D)^{-1.45}$; на рис.1.18б стрелки на графиках, судя по размерности, указывают области определённых значений коэффициента теплоотдачи α , а не h .

В главе 1 рассматривается, кроме прочего, влияние на теплоотдачу различных типов выемок в расширяющихся и сужающихся каналах (рис.1.17, по данным работы [77]), т.е. в градиентных течениях. Не совсем понятно, почему в перечне режимных и геометрических параметров при разработке метода исследования не фигурирует степень расширения / сужения канала или градиент давления. Если каналы с переменной геометрией не рассматривались, зачем приведены данные [77]?

Подробно описаны пассивные интенсификаторы в виде сферических, V-образных, эллиптических, цилиндрических и подковообразных выемок, а также полусферических, кольцевых и спиральных выступов. Однако, начиная со стр.60 (табл.2.9) появляются капельные углубления, без объяснения, чем они отличаются от полусферических или эллиптических.

Высказанные замечания ни в коей мере не уменьшают ценности работы и не влияют на её высокую оценку.

К достоинствам работы можно добавить отличный стиль изложения, инфографику рисунков и диаграмм во 2 – 4 главах, что позволяет воспринимать информацию, изложенную в этих главах человеку, не

знакомому с программным кодом Python и не являющемуся специалистом в нейросетевом моделировании.

Методика, изложенная в работе, уже нашла практическое применение: интеллектуальное управление режимными характеристиками аппарата воздушного охлаждения (АВО) компримированного природного газа, реализованное в предложенном способе интенсификации теплообмена, позволило значительно минимизировать затраты при магистральном транспорте природного газа и сократить потребление электроэнергии от 34 до 77 % в зависимости от режима работы КС и температуры окружающей среды.

Хочется пожелать автору продолжить работу, начатую в представленном диссертационном исследовании, и, возможно, включить в сферу своих исследований двухфазную вынужденную конвекцию, поскольку конденсаторы, парогенераторы и подобные им теплообменные устройства также нуждаются в оптимизации режимных и геометрических характеристик для достижения наилучшей энергоэффективности.

Диссертационная работа представляет собой законченное исследование, полностью соответствующее требованиям пунктов 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Шакиров Руслан Айварович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Ротинян Елена Михайловна,
к.т.н., доцент кафедры «Теплотехника и теплоэнергетика»
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Юридический адрес: 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д.2.

Телефон составившего отзыв: 8-952 398 1508,

e-mail составившего отзыв: Rotinyan_EM@spmi.ru

Подпись Ротинян Елены Михайловны удостоверяю

