

ОТЗЫВ

на работу докторанта Бондарцева Давида Юрьевича, выполнившего диссертационную работу на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по профилю 6D071700 – Теплоэнергетика, специальность «Тепловые энергетические установки» на тему: «Разработка и исследование высокофорсированной системы охлаждения элементов газотурбинных установок тепловых электростанций»

Докторант Бондарцев Д.Ю. закончил АУЭС в 2012 г. по специальности «Бакалавр – Теплоэнергетик тепловых электростанций (ТЭС) и магистратуру по специальности «Теплоэнергетика» по кафедре «Тепловые Энергоустановки (ТЭУ)» в 2014 г. Поступил в докторантуру по профилю 6D071700 на кафедру ТЭУ в 2016 г.

В период обучения в докторантуре следовал индивидуальному плану, согласно которому сдал базовые и профилирующие дисциплины. Прошел практику в АУЭС на кафедре ТЭУ и научную стажировку за рубежом в Bulgaria, Ruse City, University of Ruse.

Докторант Бондарцев Д.Ю. активно участвовал в проведении научно-исследовательской работы по данной тематике в бакалавриате с 3-го курса обучения и опубликовал научную статью. Он продолжил исследования в магистратуре по данной теме, опубликовав еще четыре статьи. В докторантуре продолжил научные исследования, провел критический обзор по созданию новой охлаждающей системы применительно к газотурбинным установкам (ГТУ) и поставил задачу по разработке капиллярно-пористой системы для отвода высоких тепловых нагрузок (форсированных) от теплонагруженных элементов ГТУ. Исследовал новую конструктивную схему охлаждения с применением капиллярно-пористых структур и покрытий, в которой применил совместное действие капиллярных и массовых сил. Это позволило расширить пределы отвода тепловых потоков для высокофорсированных режимов работы ГТУ.

Диссертант провел исследования процессов теплопереноса в капиллярно-пористых структурах и покрытиях новых камер сгорания и сопел ГТУ, работающих в детонационном режиме. Создал математическую и физическую модели, обобщил опытные данные, оптимизировал структуры, исследовал термоупругостную задачу и выявил прочностные характеристики покрытий. В итоге им получены простые инженерные зависимости для расчета отводимых удельных тепловых потоков и определения предельных возможностей покрытий. Раскрыт механизм кризиса кипения в капиллярно-пористых структурах и покрытиях с помощью физико-математических моделей с подтверждением результатов расчета опытными исследованиями с помощью интегральных и оптических методов. Предложены методика расчета и области применения пористых систем.

Эксперименты докторантом проводились на стенде АУЭС по изучению теплообмена в капиллярно-пористых структурах, в испытательной лаборатории АО «Трест Средаэнергоустановка» на разрывной машине по определению

прочностных характеристик покрытий. Покрытия из минеральной среды диссертант напылял с помощью огнеструйных горелок по разработанной им методике на огневом полигоне.

В настоящее время на лучших турбостроительных заводах мира стремятся к созданию конструкций ГТУ, которые могли бы выдержать высокие начальные температуры газов. Подавляющее большинство ГТУ работают всего лишь при начальных температурах газа (750÷800) °С, и даже в этом случае приходится применять весьма дорогостоящие аустенитные стали, которые резко снижают прочность уже при температуре 1100 °С.

Однако для повышения КПД ГТУ требуются температуры 1300, 1400, 1500, 1600 и даже 1700 °С, над чем и работают передовые заводы мира. Для этих случаев весьма перспективными являются разработанные диссертантом капиллярно-пористые покрытия из хрупких естественных минеральных сред, содержащих цирконий, и работающих с охлаждением (природоподобные технологии (нанотехнологии)). Эти системы разработаны и исследованы диссертантом. Такой синергетический подход позволяет создавать структурированные поверхности из природных материалов и может служить третьей альтернативой в данной разработке.

Исследования докторанта Бондарцева Д.Ю. позволяют стыковать два предельных случая: кризис кипения в капиллярно-пористых сетчатых структурах и разрушение капиллярно-пористых покрытий, находящиеся в предельном состоянии. Для этого создана физико-математическая модель, определяющая предельные величины термических напряжений сжатия и растяжения, и объяснен механизм этого явления. Эксперименты диссертанта подтверждают созданные им модели.

Заслуживает внимание решение задачи термоупругости, когда подобрано такое решение в виде сходящегося ряда (уже на третьем члене ряда), представляющее собой произведение тригонометрической и экспоненциальной функций. Считалось, что существует принцип суперпозиции напряжений сжатия и растяжения. Данное решение распространено по принципу аналогии на металлическую поверхность и плохотеплопроводное покрытие из естественных минеральных сред (закон двойственности). Для металла – это глубина распространения температурной волны, а для покрытия – размер образующихся частиц в момент разрушения покрытия. Этот подход выявил зависимости тепловых потоков от времени их действия и глубины проникновения температурных возмущений.

Данная аналогия позволила раскрыть механизм теплопередачи и установить зоны возникновения и развития усталостных трещин деталей ГТУ в центрах активации паровых зародышей. Это важно для переходных режимов работы ГТУ, т.е. в момент пуска и останова оборудования. Учет временного фактора и наличие усталостных напряжений имеет большое практическое значение при эксплуатации ГТУ.

Диссертантом исследовано предельное состояние пористых покрытий с подложкой (парогенерирующей поверхностью), которое возникает в момент кризиса теплообмена при кипении охладителя, т.е. определена плотность потока энергии в упругой среде Q методом термоупругости. Такое состояние (как и

максимальная температура рабочего тела) определяет в то же время предельную мощность генераторов полезной энергии (ГТУ) как произведение скорости распространения деформаций в упругой среде (глубину проникновения температурной волны h в пористое покрытие или размер отрывающихся частиц δ при разрушении покрытия) на объёмную плотность энергии Q (удельную энергию разрушения покрытий), которую детально исследовал автор. Поэтому в настоящее время предельная мощность, например, поршневых двигателей в одном цилиндре составляет 5 МВт, в морском флоте – 300 кВт, в авиации – 450 кВт, в паровых турбинах – 150 МВт, а в газовых – лишь 100 МВт. Таким образом, увеличение КПД ГТУ возможно путем дальнейшего повышения температуры рабочего тела за счет исследованной новой пористой системы охлаждения, так и за счет расширения предела отвода тепловых потоков с помощью хрупких плохотеплопроводных малопористых капиллярно-пористых покрытий.

Графическое представление результатов решения задачи термоупругости по предельному состоянию пористых покрытий и теплообменной поверхности показывает на ряд математических аналогий, которые вытекают из исследований академика, дважды Гос. Лауреата Понтрягина Л.С.:

а) с законом двойственности, т.е. теорией характеров непрерывных групп функций и аналогиями в разрушении хрупких пористых покрытий и металлической поверхности охлаждения ГТУ;

б) с асимптотикой релаксационных колебаний, когда предельные потоки тепла и термических напряжений стремятся к асимптоте, поскольку в качестве решения уравнения теплопроводности выбрана сумма произведений тригонометрической и экспоненциальной функций;

в) с оптимальным управлением теплообменом в пористых структурах и покрытиях ГТУ, которое достигается по принципу максимума, т.е. по принципу их предельного состояния, а, следовательно, и по максимальной экономии энергии ГТУ;

г) со сходящимся рядом функций по предельным тепловым нагрузкам, а значит и по предельным термическим напряжениям сжатия и растяжения покрытий, который аналогичен исследованиям по линейным дифференциальным играм убегания.

Предварительные испытания пористых покрытий из плохотеплопроводных малопористых минеральных сред естественного происхождения Заильского и Джунгарского Алатау на полигоне Автодора показали свою работоспособность при воздействии на них высокотемпературным сверхзвуковым детонационным факелом с температурой до 2500°C и скоростью потока до 2500 м/с, причем в самом покрытии был зарегистрирован удельный тепловой поток газов, образующихся при сжигании керосина в кислороде, до величины $\approx 1 \cdot 10^7$ Вт/м². Удельный тепловой поток в стенку камеры сгорания и сверхзвукового сопла, защищаемых сетчатыми капиллярно-пористыми структурами, доходил до $2 \cdot 10^6$ Вт/м².

Итак, диссертация представляет собой законченное научное исследование и имеет теоретическое и практическое значение. Она содержит выжкие научные и практические результаты и свидетельствует о высокой квалификации ее автора. Решена важная научно-техническая проблема по дальнейшей форсировке

тепловых нагрузок при высоких температурах рабочего тела в ГТУ и приближению электростанций к экологически возможному совершенству.

Отмечу большой производственный опыт докторанта Бондарцева Д.Ю. (более 5 лет), который успешно сочетал учебу с трудовой деятельностью в крупном Тресте «Средаэнергомонт» в должности ведущего инженера, что способствовало реализации внедрений его научных разработок в проектной организации АО «Институт КазНИПИЭнергопром» и АО «Трест Средаэнергомонт».

По материалам диссертации автором опубликованы 55 научных трудов: 1 статья в журнале по базе Thomson Reuters (Clarivate analytics): «Thermal Science» (impact factor=1.43); 4 статьи в журналах по базе Scopus: «News of the National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan», «Journal of Machine Engineering», «Bulgarian chemical communications», «E3S Web of conferences»; 26 статей в журналах рекомендуемых Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК; 4 статьи в рецензируемых журналах рекомендованных ВАК РФ, из которых 2 основные журналы по турбинам и прочности машин (компания Web of Science); 18 публикаций в материалах международных и зарубежных научно-практических конференций из них выступление на двух симпозиумах: Plovdiv, Bulgaria и Novi Sad, Serbia. Основные результаты и выводы диссертации обсуждались и докладывались на международных и зарубежных конференциях (1 доклад - в базе данных Scopus) и симпозиумах, на совещаниях и семинарах; 2 научно-исследовательского отчета (ОНИР).

Таким образом, диссертационная работа выполнена на высоком научном и практическом уровне, решает крупную научную проблему в области теплопереноса и термоупругости в капиллярно-пористых структурах и покрытиях ГТУ, имеет важное народнохозяйственное значение для ТЭС, удовлетворяет требование Комитета по контролю в сфере образования и науки Министерства образования и науки Республики Казахстан по актуальности, новизне, научной обоснованности и ценности, предъявляемым к докторским диссертациям. Ее автор, Бондарцев Д.Ю., достоин присуждения ученой степени доктора наук по профилю 6D071700 – Теплоэнергетика.

Научный консультант:

доктор технических наук,
профессор, профессор каф. ТЭУ АУЭС

 А.А. Генбач

Подпись д.т.н., проф.

Генбача А.А. заверяю:

Секретарь Ученого Совета АУЭС



А.С. Бегимбетова