

## ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н., главного научного сотрудника Федерального государственного учреждения науки Объединенного института высоких температур РАН Зейгарника Юрия Альбертовича на диссертацию Тищенко Виктора Александровича «Разработка и реализация методики определения параметров жидкой фазы влажно-парового потока в элементах проточной части турбомашин», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.04.12 «Турбомашин и комбинированные турбоустановки»

Дальнейший прогресс в области проектирования и совершенствования паровых турбин, последние ступени которых работают на влажном паре, связан с получением новых экспериментальных данных и уточнением имеющихся представлений о поведении влаги в концевых элементах машин и характеристиках паракапельных сред в этих зонах. Научный и практический задел в этой области достаточно велик, что позволяло и позволяет создавать достаточно эффективные паровые турбины. Тем не менее, многие детали процессов, протекающих во влажно-паровых ступенях машин, остаются не до конца ясными, более того, о многих из них мы просто не знаем, поскольку имевшийся в прошлом исследовательский инструментарий не позволял их обнаружить. В этом плане диссертационная работа В.А.Тищенко, в которой акцент сделан именно на совершенствовании методов исследования влажно-паровых потоков в турбомашинах, несомненно, является актуальной.

Диссертация состоит из Введения, четырех глав основного текста, выводов и списка литературы из 139 наименований. Объем диссертации 210 страниц, включая 124 рисунка.

Во Введении дана общая характеристика работы, определена ее направленность.

В 1 главе представлен обзор современного состояния проблемы, вопросов, касающихся газодинамики влажнопаровых потоков в проточных частях паровых турбин, поведения капель влаги разного дисперсного состава. Особое внимание уделено методам экспериментальных исследований паракапельных сред. Диссертант совершенно справедливо отмечает, что появившиеся в последние два десятилетия и достаточно хорошо отработанные на сегодняшний день методы лазерной диагностики двухфазных сред в сочетании с потенциалом современной компьютерной техники открывают новые возможности для исследователей, позволяют опытным путем обнаружить новые важные эффекты и существенно уточнить уже известные факты. На основе выполненного анализа обоснованы и сформулированы основные задачи диссертационной работы: адаптация новых PIV-методов к конкретным, весьма сложным, условиям влажно-паровых течений в

лопаточном аппарате турбин и получение на этой базе новых экспериментальных данных.

Во второй главе дается описание экспериментальной установки КВП-2 и используемых в экспериментах рабочих участков: плоского несимметричного сопла Лавала, плоского симметричного суживающегося сопла и плоского модельного пакета из шести сопловых лопаток. Первые два рабочих участка служили для отработки методических вопросов, связанных с адаптацией PIV-методики применительно к конкретным задачам работы диссертанта. Пакет сопловых лопаток предназначался для получения конкретных характеристик парокapельных потоков. Представлено описание «штатных» средств измерений стенда, объединенных в измерительно-вычислительный комплекс МИС-300М, с помощью которых осуществляется измерение газодинамических параметров потока. Визуализация волновой структуры потока производилась автоколлимационным прибором ИАБ-451 в сочетании со скоростной (5 кГц) видеокамерой Видеоспринт-Г6 и фотокамерой Видеоскан-285-2001. Новым в методике измерений являлось применение системы лазерной диагностики «ПОЛИС» (PIV-технология). С ее помощью определялись поля скоростей жидкой фазы, которые служили базой для определения ряда параметров капельного потока.

В третьей главе описана экспериментально-расчетная методика бесконтактного определения средних размеров крупных капель. Используемый диссертантом подход в определенной степени оригинален. В результате обработки данных измерений системой лазерной диагностики «ПОЛИС» находятся траектории движения жидкой фазы-капель (сами капли при этом играли роль трассеров), скорости капель в отдельных точках трассы и ускорения капель. Скорости несущей капли паровой фазы находились расчетным путем с помощью CFD кода Fluent. Зная скорости и ускорения капель и скорости и параметры несущей фазы, из уравнения движения капли находились средние диаметры последней.

Система «ПОЛИС» была адаптирована диссертантом для использования в измерениях в парокapельных потоках. Это касалось как непосредственно измерений (в частности, удаления жидких пленок в измерительном объеме), так и пост-тестовой компьютерной обработки полученных данных (исключение из анализа мелких капель диаметром менее 5 мкм, фоновых эффектов и т.д.), что позволило повысить качество полученной информации и ее достоверность. С целью повышения точности определения параметров несущей паровой среды был также адаптирован к условиям проводимых исследований расчетный код Ansys Fluent 14. Заметим, что в используемая в этом коде модель турбулентности была уточнена в соответствии с результатами исследований Филиппова-Зайчика-Аветисяна о влиянии частиц на турбулентность несущей фазы. Все

это позволило с достаточной уверенностью использовать данную систему в поставленных целях.

В четвертой главе представлены результаты экспериментов по структуре парокапельных потоков за изолированной сопловой решеткой. Получены новые данные по траекториям движения крупных капель в межлопаточном зазоре, коэффициентам скольжения, по изменению размеров капель в процессе этого движения, влиянию влажности и плотности пара на дисперсные характеристики потока капель. Полученные опытные данные представляются достоверными в силу тщательной отработки методики эксперимента.

В результате выполненной работы показана перспективность метода PIV в исследованиях парокапельных потоков в турбинных решетках, определены и отработаны методы его адаптации в указанных целях. Этот итог, как и полученные экспериментальные данные, обладает несомненной научной новизной.

В практическом аспекте полученные данные расширяют и уточняют представления о структуре парокапельных потоков и могут использоваться в практике проектирования последних ступеней конденсационных паровых турбин и влажнопаровых турбин АЭС и ГеоТЭС.

По диссертационной работе В.А.Тищенко можно сделать следующие замечания.

1. В диссертации указывается погрешность экспериментального определения скорости капель – не выше 5% и расчета скорости пара – не более 1%. При коэффициенте скольжения 0,5-0,6 это даст относительную погрешность определения квадрата разности скоростей капель и пара 25-30%. К этому следует добавить погрешность определения ускорения капель и неточность знания коэффициента аэродинамического сопротивления. Полностью разделяю тезис о перспективности использования данного метода в столь сложных газодинамических условиях, как течения в лопаточных аппаратах турбин, хочется предостеречь от переоценки данного метода в плане «количественных» результатов несмотря на блестящее совпадение с результатами измерений зондом инерционного осаждения.
2. Разработанная диссертантом методика дает средний размер капель. Необходимо ее совершенствование в направлении возможности оценки характеристик полидисперсности парокапельной среды (имеются в виду фракции с диаметром капель 10-30 мкм).
3. Полученные в диссертации количественные результаты в какой-то степени «привязаны» к размерам капель, формируемым пароструйными форсунками,

установленными в ресивере экспериментального стенда (25-30 мкм). В принципе, этот размер типичен для вторичных капель, срываемых с образующихся на лопатках пленок, но расширение в последующих экспериментах диапазона дисперсности капель на входе весьма желательно.

В целом представленная В.А.Тищенко диссертация по своей научной новизне и практической значимости, несомненно, заслуживает положительной оценки, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.04.12 «Турбомашин и комбинированные турбоустановки».

Основные результаты работы отражены в научных изданиях, включенных в перечень ВАК, и в трудах конференций.

Автореферат достаточно полно отражает основные положения диссертационной работы.

Официальный оппонент, д.т.н., главный научный сотрудник ОИВТ РАН

Ю.А.Зейгарник

Подпись Ю.А.Зейгарника заверяю

Ученый секретарь ОИВТ РАН  
д.ф.-м.н.

Р.Х.Амиров

