

ПАРОТУРБИННЫЕ, ГАЗОТУРБИННЫЕ,
ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ
И ИХ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ В ПОСЛЕДНИХ СТУПЕНЯХ ЦНД
С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННОЙ СИСТЕМЫ ТРАВЕРСИРОВАНИЯ
ПОТОКА ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ НА НАТУРНОМ СТЕНДЕ

© 2023 г. А. В. Москаленко^а, *, А. М. Тюхтяев^а, Д. М. Ковалёв^а, А. Г. Долганов^а,
А. А. Ивановский^а, В. А. Черников^б, В. А. Рассохин^б

^а АО «Силовые машины – Ленинградский металлический завод»,
ул. Ватутина, д. 3, лит. А, Санкт-Петербург, 195009 Россия

^б Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Политехническая ул., д. 29, Санкт-Петербург, 195251 Россия

*e-mail: moskalenko_av@power-m.ru

Поступила в редакцию 06.10.2022 г.

После доработки 11.12.2022 г.

Принята к публикации 23.12.2022 г.

Показана необходимость траверсирования газодинамических параметров потока при отработке новых последних ступеней цилиндров низкого давления (ЦНД) паровых турбин. Изложены особенности измерения давлений с помощью зондов пневмометрическим методом в последних ступенях, работающих на влажно-паровой (двухфазной) среде, при забивании конденсатом приемных отверстий зондов и пневмолиний. Обоснован переход на малогабаритные насадки зондов, обладающие, по сравнению с крупногабаритными, большей точностью измерений. Предложен универсальный алгоритм периодической продувки пневмолиний атмосферным воздухом для различных зондов с приемными отверстиями определенных диаметров. Универсальный алгоритм заключается в добавлении в систему подпрограммы, отвечающей за автоматический контроль выдержки времени после закрытия продувочных клапанов перед измерениями в точке траверсирования. При этом исключаются неполнота удаления остаточного продувочного воздуха с конденсатом из пневмолиний и избыточная выдержка времени перед измерениями. Алгоритм реализован при усовершенствовании ранее разработанной системы траверсирования. Повышена точность измерения давлений и меридиональных углов потока благодаря применению высокоточных преобразователей на каждом измерительном канале зонда при диапазоне абсолютного давления 0–30 кПа с точностью 0.05% верхнего предела измерений. Сокращено время на обработку результатов траверсирования за счет добавления в систему трех измерительных каналов, функционирующих синхронно с зондом и характеризующих режим работы турбины. Создана современная система для траверсирования в межвенцовом зазоре последних ступеней. Результаты данной работы применяются при исследованиях отсека ЦНД перспективной паровой турбины на натурном стенде АО «Силовые машины».

Ключевые слова: паровая турбина, цилиндр низкого давления, влажно-паровой поток, последняя ступень, зонд, пневмометрический метод измерений, система траверсирования, периодическая продувка, автоматизированный контроль выдержки времени после продувки, выборка

DOI: 10.56304/S004036362305003X

Одно из направлений повышения эффективности паротурбинных установок основано на увеличении внутреннего относительного КПД η_{oi} , который, наряду с другими параметрами, зависит от уровня достигнутого аэродинамического совершенства проточных частей турбины, прежде всего проточной части ЦНД, на который приходится значительная доля общего располагаемого перепада энтальпий на турбину.

Последние ступени большой веерности конденсационных турбин и турбин АЭС работают на

влажно-паровой (двухфазной) среде в условиях глубокого вакуума и характеризуются пространственно-градиентным потоком, главными особенностями которого являются продольный, радиальный и поперечный градиенты давления, интенсивное изменение газодинамических параметров по радиусу ступени, в окружном и осевом направлениях, неравномерное распределение потерь энергии в каналах и за решеткой.

Для отработки проточных частей ЦНД АО «Силовые машины» располагает уникальным натур-

ным стендом, позволяющим исследовать ступени в масштабах 1 : 1 и 1 : 2 на экспериментальной турбине при максимальном расходе пара и частоте вращения ротора $\omega = 50 \text{ с}^{-1}$.

Главной задачей при проведении физического эксперимента является повышение объема достоверных данных о параметрах потока в проточной части и точности измерений при сокращении времени исследований. В связи с этим необходимо совершенствовать применяемые методы измерений и используемую измерительную оснастку, к которой относятся и системы траверсирования.

ОПИСАНИЕ ПНЕВМОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

К локальным (в каждой точке) газодинамическим характеристикам пространственного потока по высоте последних ступеней относятся: полное давление p^* (давление торможения), температура торможения t^* , статическое давление $p_{ст}$ (давление в потоке), углы выхода потока из каналов сопловых и рабочих лопаток α и меридиональные углы направления потока γ . Наиболее полная картина их распределения может быть получена путем траверсирования подвижными комбинированными зондами со сменными насадками, устанавливаемыми в контрольных измерительных сечениях (ИС) перед ступенью, например пятой (ИС 5-0), в межвенцовом зазоре (ИС 5-1) и за ступенью (ИС 5-2). Для оценки окружной неравномерности в сечении устанавливаются несколько зондов. При траверсировании основным параметром является давление, которое измеряется с помощью приемников насадка зонда, в частности по дисковому пятиканальному зонду трубками Пито и отбором в центре диска [1]. По показаниям приемников насадка и тарировочным характеристикам определяют полное и статическое давление, а также меридиональные углы потока.

Главная задача при траверсировании – повышение точности измерения давлений.

Насадки зондов относятся к специальным измерительным приборам, которые по внутреннему диаметру приемных отверстий $d_{вн}$ можно условно разделить на крупногабаритные ($d_{вн} = 1.4–2.0 \text{ мм}$) и малогабаритные ($d_{вн} = 0.6–1.3 \text{ мм}$). При исследовании на натурном стенде наибольшее применение нашли зонды с насадками дисковой, цилиндрической и конической форм. Каждый насадок имеет индивидуальные систематические погрешности, учет которых выполняется при их тарировке. Чем точнее изготовлен насадок и чем меньше он возмущает поток, тем лучше его аэродинамические характеристики и однозначнее тарировочные кривые. Тарировка зондов в дозвуковой области проводится в Лаборатории турбинострое-

ния им. И.И. Кириллова СПбПУ на специальном воздушном тарировочном стенде ТС1.

При исследованиях ЦНД давление пара измеряется с использованием пневмометрического метода, при котором давление, воспринимаемое приемниками насадка зонда в проточной части, передается чувствительным элементам датчиков (преобразователей), расположенных в машинном зале, по пневмолиниям значительной протяженности. В качестве пневмолиний применяют трубки из антикоррозионной стали, которые после выхода из штанги зонда до разъемных соединений в шкафу с преобразователями удлиняются более гибкими трубками (из неметаллических материалов). Длина образованного таким образом каждого измерительного канала давления (ИКД) составляет примерно 9 м. Это расстояние обусловлено габаритами ЦНД и применяемыми преобразователями давления, которые в силу конструктивных особенностей могут быть размещены только за пределами проточной части. В связи с этим такая длина каналов не может быть существенно уменьшена. При сборке по каждому насадку зонда стремятся обеспечить одинаковое гидравлическое сопротивление пневмолиний.

При паровых исследованиях проточной части, в отличие от обработки ступеней на воздушных стендах, технология измерений сопряжена с трудностями, обусловленными забиванием приемных отверстий зондов взвешенной в потоке жидкой фазой и конденсацией пара на внутренних стенках пневмолиний. Это приводит к закупориванию трубок жидкостными пробками и искажению показаний приборов регистрации давлений.

Особенности измерения параметров потока с помощью пневмометрических зондов изучаются на протяжении длительного времени [2, 3], тем не менее однозначного представления о возможных неопределенностях при измерениях нет. В настоящее время такие зонды продолжают широко применяться при исследованиях, так как пневмометрический метод является наиболее надежным при измерении давлений.

Для ликвидации жидкостных пробок из пневмолиний использовали уравнивательные бачки, постоянную и периодическую продувки, заполнение трубок водой, внешний обогрев пневмолиний. Тем не менее опубликованных данных по продувкам мало. При экспериментальных исследованиях наибольшее практическое применение получили постоянные и периодические продувки воздухом [1, 4–6].

В то же время разработанный ранее для зонда с трубками Пито ($d_{вн} = 2.0 \text{ мм}$) способ постоянной продувки каждой пневмолинии через дроссельные шайбы с отверстиями малого диаметра приводил к необходимости введения поправки до

10% давления, измеряемого каждой приемной трубкой [4]. При траверсировании происходило неравномерное засорение дроссельных шайб, что могло вызвать ошибки при назначении поправок. В связи с этим данный способ имел ограниченное применение.

Опыт измерений с помощью зондов влажно-парового потока показал, что крупногабаритные насадки, по сравнению с малогабаритными, менее подвержены забиванию влагой и быстрее продуваются от конденсата. Основным их недостатком является то, что они больше возмущают поток. Другое их слабое место, относящееся главным образом к зондам дисковой формы, — значительный разброс в пространстве точек отборов давления (трубок Пито) в зонах с высокой веерностью потока и кривизной струек тока. В связи с этими обстоятельствами измерения малогабаритными насадками являются более предпочтительными при применении отработанной технологии продувки пневмолиний малых внутренних диаметров.

Помимо аэродинамических характеристик насадки зондов должны удовлетворять условиям прочности и надежности. Эти условия обеспечиваются технологией производства зондов, заключающейся в изготовлении на токарно-фрезерной группе оборудования отдельных деталей из нержавеющей стали и соединении их между собой и с трубками посредством пайки высокотемпературным припоем. Зонды создаются в единичном экземпляре, при этом наиболее сложными в изготовлении являются малогабаритные насадки.

В настоящее время передовым способом изготовления является аддитивное производство — 3D-печать на принтерах, использующих технологию SLM [Selective Laser Melting — селективное (выборочное) лазерное плавление металла], которая позволяет создавать малогабаритные изделия сложной формы по математическим CAD-моделям из металлических порошков, в том числе отечественного производства (жаропрочных, никелевых и титановых сплавов в защитной атмосфере и др.) [7]. Эти технологии стремительно развиваются, и поэтому изготовление насадок зондов с помощью аддитивного производства становится перспективным направлением для систем траверсирования.

Получение достоверных данных о локальных и осредненных параметрах потока обеспечивается выполнением следующих мероприятий:

использованием зондов, оказывающих меньшее влияние на поток и прошедших предварительную тарировку;

усовершенствованием ранее разработанных систем траверсирования, включая технологию продувки от конденсата;

обработкой результатов.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ТРАВЕРСИРОВАНИЯ

Для перехода от локальных параметров, полученных при траверсировании, к их средним значениям необходимо выполнить осреднение по расходу потока. Для этого по каждому из контрольных сечений применяются следующие уравнения сохранения [8]:

массы (расхода) G

$$G = \int_0^{2\pi} \int_{r'}^{r''} \rho c_z r dr d\theta; \quad (1)$$

энергии в потоке E

$$E = \frac{kR}{k-1} \int_0^{2\pi} \int_{r'}^{r''} t^* \rho c_z r dr d\theta; \quad (2)$$

момента количества движения M относительно оси oz

$$M = \int_0^{2\pi} \int_{r'}^{r''} \rho c_z c_u r^2 dr d\theta; \quad (3)$$

потока энтропии S

$$S = R \int_0^{2\pi} \int_{r'}^{r''} \ln \frac{t^* \left(\frac{k}{k-1}\right)}{p^*} \rho c_z r dr d\theta; \quad (4)$$

потока импульса в радиальном направлении

$$\bar{c}_r G = \int_F \rho c_r^2 \sin \alpha \cos \gamma dF, \quad (5)$$

где r — радиус траверсирования; ρ — местная плотность пара; c_z, c_u, c_r — проекции вектора скорости на оси oz, ou и or в абсолютном движении; r', r'' — радиусы корневого и периферийного меридиональных обводов проточной части; θ — угловая координата траверсы; F — торцевая площадь в контрольном сечении; R — газовая постоянная пара; k — показатель изоэнтропы влажного пара ($k = 1.115$ [9]); G — расход пара через проточную часть.

Получив интегральные характеристики потока (G, E, M, S и $\bar{c}_r G$), можно определить средние значения $\bar{p}^*, \bar{p}_{ст}, \bar{c}_u, \bar{c}_z, \bar{c}_r$ по зависимостям, представленным в [8].

По результатам траверсирования в ИС 5-0, ИС 5-1, ИС 5-2 и контрольном сечении за осердиальным диффузором и измерений давления и температуры при входе в отсек, а также внутренней мощности ступеней отсека и расхода пара, зная средние параметры потока, можно вычислить распределение местных коэффициентов и определить средние значения коэффициентов скорости в направляющем аппарате и рабочем колесе, термодинамической степени реактивно-

сти, коэффициента восстановления давления выходного патрубка и η_{0j} . Это позволяет оценить аэродинамическую эффективность отсека ступеней в целом и последней ступени в частности.

ОСОБЕННОСТИ РАННЕЕ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ ТРАВЕРСИРОВАНИЯ

Ранее разработанная автоматизированная измерительная система траверсирования потока (АИСТП) [1] состояла из пяти систем (подсистем): персонального компьютера (ПК) оператора, газодинамического зонда, координатного устройства с механизмами перемещения зонда, системы преобразователей для регистрации параметров потока (системы преобразователей) и системы управления.

Применявшийся в [1] дисковый насадок зонда с трубками Пито ($d_{\text{вн.}} = 2.0$ мм) использовали для измерений перед последней ступенью и за ней (рис. 1). После продувки пневмолиний в системе была предусмотрена уставка выдержки времени перед измерениями. Длительность уставки определяли опытным путем и вводили на мнемосхеме ПК. Во избежание неполноты удаления воздуха и конденсата из пневмолиний, вследствие того что по высоте ступени забивание трубок может проходить по-разному, уставка была несколько завышена и предусматривалось по три измерения в точке траверсирования. После исследований для обработки данных отбирали только одно наименьшее давление. Такой подход исключал ошибки в измерениях, но при этом траверсирование было избыточным по времени.

Другая особенность системы – оснащение ее одним преобразователем давления. В связи с этим пневмолинии пятиканального зонда под-

ключались к специальному общему коллектору и опрашивались преобразователем путем поочередного открытия клапанов на каждой пневмолинии. В результате на показания преобразователя мог влиять “присоединенный объем”, т.е. внутренний объема коллектора, в котором при переключении на другой канал измерения сохранялся пар, поступивший из предыдущего канала. Такая схема не позволяла одновременно измерять давления всеми трубками Пито, что снижало точность определения γ .

СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ТРАВЕРСИРОВАНИЯ

Современная система траверсирования (АИСТП-1м), выполненная путем усовершенствования двух из пяти подсистем [1], была установлена в экспериментальную турбину согласно схеме, показанной на рис. 2.

Заложенный в [1] модульный принцип построения подсистем при совершенствовании всей системы позволил, с одной стороны, сохранить без изменения базовые алгоритмы работы (калибровку, перемещение зонда по высоте ИС в координату x , и выравнивание его в потоке по углу α). С другой стороны, дал возможность расширить функциональные возможности систем преобразователей 4 и управления 5, включая усовершенствование метода периодической продувки пневмолиний от конденсата воздухом атмосферного давления.

В системе преобразователей 4 схема с поочередным подключением каналов давления зонда через коллектор к одному датчику была заменена на схему с отдельными преобразователями давления 5 на каждом канале ИКД I – ИКД V (рис. 3). В систему к зонду было добавлено четыре дополнительных канала для контроля режима работы турбины: один для измерения давления в конденсаторе приемником 9 через пневмолинию 7 (см. рис. 2), подключенным к преобразователю на ИКД VI, один резервный канал по температуре и

два канала для определения p_{1-0}^* и t_{1-0}^* в ИС 1-0. Эти параметры торможения определяются комбинированной гребенкой (рис. 4) [6], присоединенной по давлению через пневмолинию 8 к преобразователю на ИКД VII, по температуре – от термодатчика в гребенке с помощью кабельной хромель-копелевой термопары 23 типа КТХК к преобразователю температуры НПТ-1 (см. рис. 2). Для измерения на ИКД I – ИКД VII применены преобразователи абсолютного давления РАА-33Х (включены в перечень средств измерений и проходят периодическую поверку) с погрешностью 0.05% верхнего предела измерений на соответствующий диапазон: для зонда и конденсатора 0–30 кПа, для сечения перед отсеком



Рис. 1. Измерительное сечение ИС 5-2.
1 – дисковый насадок зонда с трубками Пито ($d_{\text{вн.}} = 2.0$ мм); 2 – рабочее колесо пятой ступени

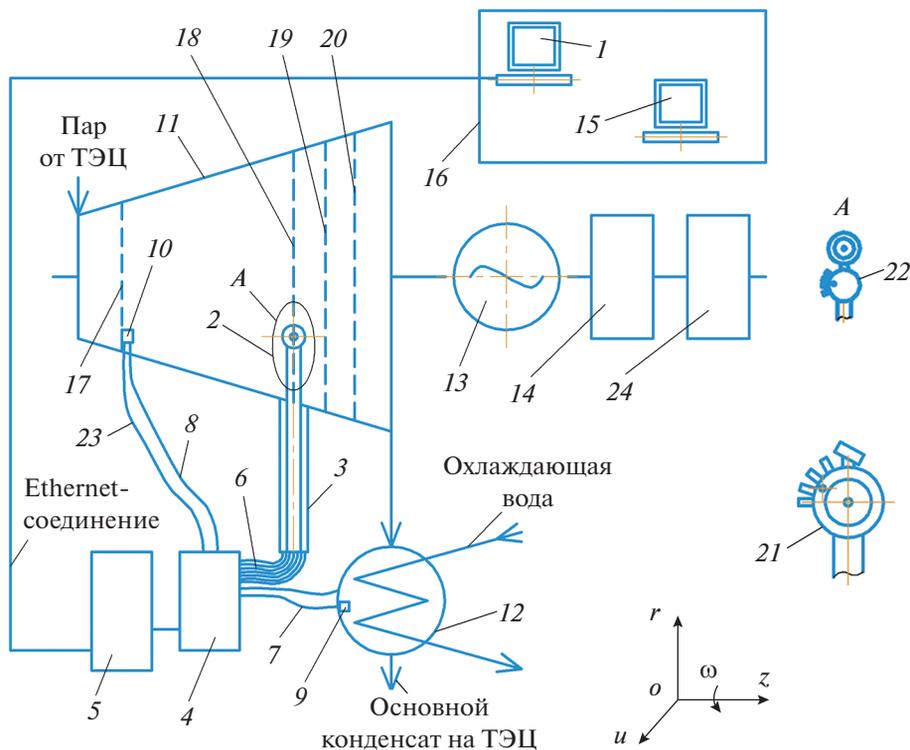


Рис. 2. Схема установки АИСТП-1м.

1, 15 – ПК для управления траверсированием и АСУ турбиной; 2 – газодинамический зонд; 3 – координатное устройство; 4, 5 – системы преобразователей и управления траверсированием; 6 – пневмолинии зонда; 7, 8 – пневмолинии дополнительных каналов ($d_{\text{вн}} = 2.0$ мм); 9 – приемник давления ($d_{\text{вн}} = 2.0$ мм); 10 – комбинированная гребенка; 11 – экспериментальная турбина; 12 – конденсатор; 13 – турбогенератор; 14, 24 – гидродинамометры; 16 – помещение пульта АСУ турбиной; 17–20 – контрольные сечения ИС 1-0, ИС 5-0, ИС 5-1 и ИС 5-2; 21 – крупногабаритный насадок; 22 – малогабаритный насадок; 23 – кабельная термопара

0–350 кПа. Каждый ИКД помимо преобразователя и пневмолинии включает в себя ФТО, продувочный и внутренний (перед преобразователем) электромагнитные клапаны (см. рис. 3, а) нормально-закрытого типа (изначально закрыты, открываются подачей электропитания), предназначенные для работы в условиях вакуума.

Переход на схему с отдельными преобразователями позволил выполнять измерения всеми приемниками зонда одновременно. Это исключило негативное влияние “присоединенного объема” коллектора и повысило точность измерения полного давления, давления в потоке и меридионального угла потока γ .

Синхронные измерения давления в конденсаторе и параметров торможения перед отсеком позволяют при анализе результатов траверсирования отбрасывать данные, полученные при нестабильных режимах работы турбины. Это снижает время на обработку результатов эксперимента примерно на 5–10%.

Схема с отдельными преобразователями на каждом ИКД повышает надежность и ремонтнопригодность системы по сравнению с системами

траверсирования, в которых применяются многоканальные сканеры давления. В случае поломки какого-либо преобразователя он может быть заменен на аналогичный за короткий промежуток времени силами оператора зонда.

В систему управления 5 добавлена подпрограмма периодической продувки и выравнивания давления в пневмолиниях с давлением потока в точке траверсирования, реализующая универсальный алгоритм работы системы преобразователей 4 в части автоматизированного контроля выдержки времени, необходимого для удаления конденсата и воздуха из измерительных каналов после закрытия продувочных клапанов. Универсальность алгоритма состоит в том, что он может работать с различными зондами, каждый из которых характеризуется своим, определенным диаметром приемных отверстий для измерений давления.

Работу подпрограммы периодической продувки и выравнивания давления всей системы можно пояснить, опираясь на схему ИКД IV (см. рис. 3, а). После завершения оператором в координате x , выравнивания зонда по потоку кнопкой

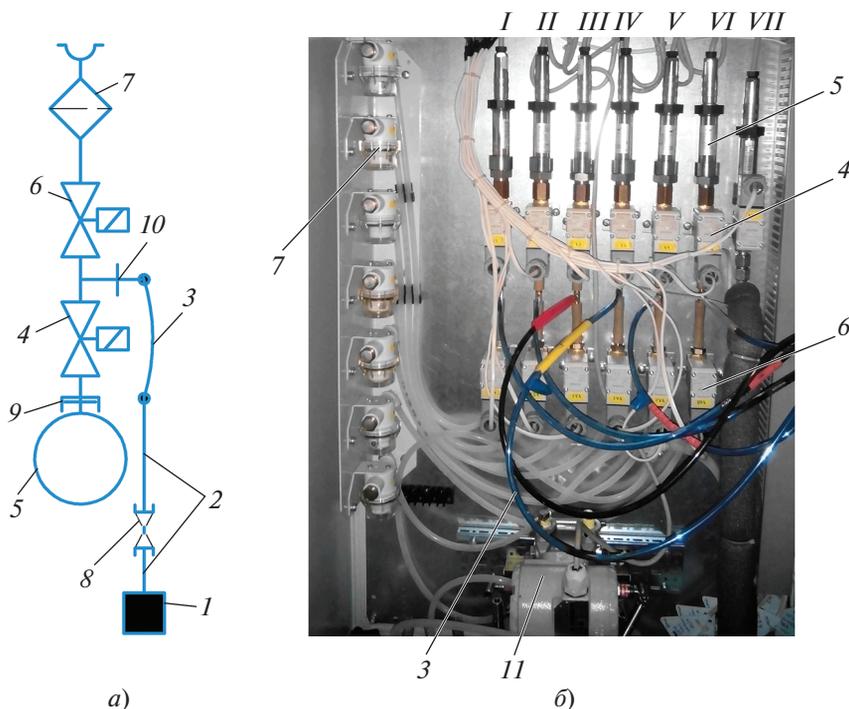


Рис. 3. Схема ИКД IV (а) и внешний вид системы преобразователей (б). I–V – ИКД зонда; VI – ИКД конденсатора; VII – ИКД на входе в проточную часть; 1 – приемник давления зонда в турбине; 2, 3 – участки пневмолинии из нержавеющей стали и полиуретановых трубок; 4, 6 – внутренний и продувочный электромагнитные клапаны; 5 – преобразователь абсолютного давления РАА-33Х; 7 – фильтр тонкой очистки воздуха (ФТО); 8–10 – паяное, штуцерное, резьбовое и разъемное соединения; 11 – преобразователь дифференциального давления

“Пуск” подается команда на автоматическое открытие продувочных клапанов 6 на каждом из шести ИКД (пять каналов от зонда и один от приемника в конденсаторе) для впуска воздуха в пневмолинии через ФТО 7, что означает начало процесса вытеснения конденсата из пневмолиний из-за разницы давлений. Длительность продувки задается уставкой, определенной опытным путем. После впуска воздуха клапаны 6 закрываются, что является сигналом для открытия одного клапана 4 на ИКД IV для постоянной регистрации текущего давления в измерительном канале с помощью преобразователя 5. После выполнения условия завершения продувки, т.е. когда в ИКД IV скорость падения давления перестает изменяться во времени, происходит автоматическое (без участия оператора) открытие клапана 4 перед преобразователями давления 5 на ИКД I – ИКД III и ИКД V – ИКД VII, что является сигналом для регистрации давлений.

При перемещении зонда по высоте ступени периодическая продувка выполняется перед каждым измерением в точке траверсирования, что уменьшает количество конденсата в пневмолиниях, обеспечивает одинаковые условия при измерениях в каждой точке и положительно влияет на точность измерений параметров влажно-

парового потока. При переходе между режимами работы турбины траверсирование не проводится. Для исключения скопления конденсата в пневмолиниях система переводится на длительную продувку путем изменения соответствующей уставки.



Рис. 4. Контрольное сечение ИС 1-0. 1 – комбинированная гребенка; 2 – кольцевая направляющая решетка; 3 – диафрагма первой ступени

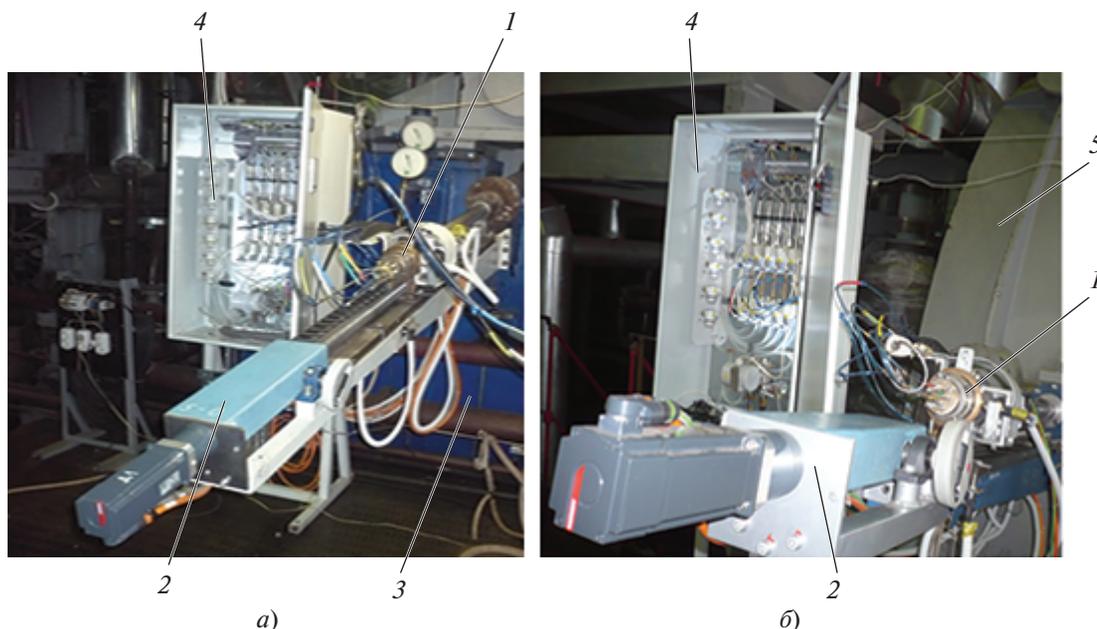


Рис. 5. Элементы автоматизированных измерительных систем АИСТП-1м (а) и АИСТП-2 (б).

1 – штанга зонда; 2 – координатное устройство с механизмами перемещения зонда; 3 – корпус экспериментальной турбины; 4 – система преобразователей; 5 – крышка экспериментальной турбины

Расход продувочного воздуха, поступающего в проточную часть через пневмолинии зонда, незначителен и не оказывает негативного влияния на работу экспериментальной турбины. Продувка пневмолинии ИКД VII, где давление выше атмосферного, выполняется по направлению от комбинированной гребенки в конденсатор по отдельному алгоритму без подачи воздуха и с меньшей периодичностью, чем для зонда.

Такой алгоритм продувки позволил перейти на однократные измерения вместо трехкратных, отказаться от уставки выдержки времени и исключить влияние человеческого фактора, присутствующего в [1]. Эти мероприятия сократили время на измерения в точке траверсирования на 25–30%.

В итоге, при фиксированном времени исследований появилась возможность увеличить выборку (количество точек измерений) по высоте ступени, что, согласно критерию Пирсона, повышает обоснованность неопределенности результатов опытов. Для сокращения времени обработки результатов траверсирования обеспечена возможность выгрузки из ПК данных измерений в файл за любой запрашиваемый оператором период. Сокращение времени измерений снижает стоимость эксперимента.

По аналогии с АИСТП-1м была создана автоматизированная измерительная система на пять каналов давления АИСТП-2. Координатные устройства систем были установлены по радиусам ступени в ИС 5-0 и ИС 5-1 (рис. 5). Измерения в межвенцовом зазоре, где числа Маха достига-

ют сверхзвуковых значений, являются непростой задачей и требуют применения соответствующих малогабаритных насадков зондов. Управление АИСТП-1м выполняется с персонального компьютера, размещенного в помещении пульта АСУ экспериментальной турбины с передачей данных с системы управления на ПК по Ethernet-соединению.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ

При исследованиях отсека последних ступеней ЦНД перспективной турбины современными системами траверсирования с дисковым насадком зонда 1 (см. рис. 1) с коническим (рис. 6) и двухдисковым (рис. 7) насадками, установленными в различных контрольных сечениях, были построены диаграммы выдержки времени перед измерениями давления после закрытия продувочных клапанов при различных противодавлениях $p_{\text{п}}$ (рис. 8).

Каждая диаграмма, на примере зонда 3, по оси времени делится на три участка: отрезок АБ – перевод внутреннего электромагнитного клапана на ИКД IV перед преобразователем из закрытого положения в открытое длительностью $\tau_{\text{отк}} = 2-3$ с (постоянное значение), отрезок БЖ – падение давления в пневмолиниях от атмосферного значения до давления в точке траверсирования длительностью $\tau_{\text{п}} = 32$ с (характеризуется интенсивным падением и длительным выравниванием), отрезок ЖК – измерение давления в координате

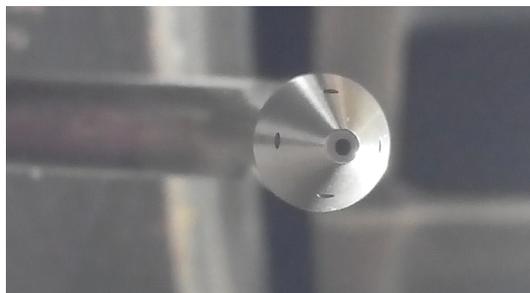


Рис. 6. Конический насадок с приемными отверстиями ($d_{вн} = 0.66$ мм)



Рис. 7. Двухдисковый насадок с трубками Пито ($d_{вн} = 0.70$ мм)

траверсирования по каждому каналу длительно-стью $\tau_{п} = 4$ с (значение задается уставкой).

При сравнении зондов с приемными отверстиями одинаковых диаметров с уменьшением противодавления для крупногабаритных насадков длительность выдержки времени после продувки $\tau_{выд} = \tau_{отк} + \tau_{п}$ возрастает незначительно – для насадка 1 $\tau_{выд} = 14$ с, тогда как для насадка 2 $\tau_{выд} = 16$ с. Для малогабаритных насадков $\tau_{выд}$ увеличивается более существенно – с $\tau_{выд} = 36$ с (насадок 4) до $\tau_{выд} = 52$ с (насадок 5), т.е. в 1.44 раза.

Диаграммы подтвердили работоспособность универсального алгоритма, который без задержек в автоматическом режиме начинает регистрацию давления в точке траверсирования только после окончательного удаления продувочного воздуха с конденсатом из пневмолиний. При этом для каждого зонда длительность $\tau_{п}$ всегда имеет переменное значение и зависит не только от диаметра приемных отверстий насадка, но и от давления в точке измерения, которое определяется как контрольным сечением, так и положением насадка по высоте ступени.

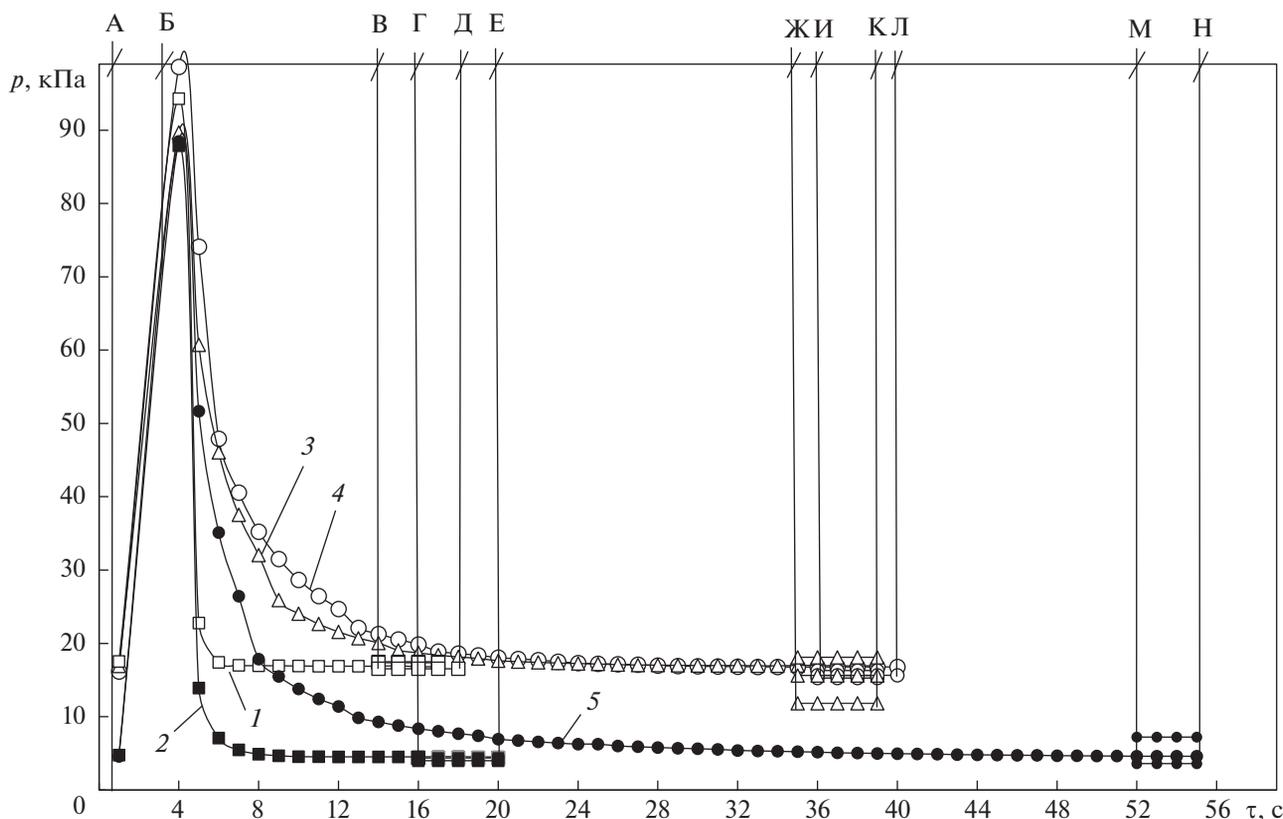


Рис. 8. Диаграммы выдержки времени τ перед измерениями давления p с помощью дискового (1, 2), двухдискового (3) и конического (4, 5) насадков.
 $d_{вн}$, мм: 1, 2 – 2.0; 3 – 0.70; 4, 5 – 0.66; $p_{п}$, кПа: 1, 3, 4 – 16.0; 2, 5 – 4.75. Перевод внутреннего электромагнитного клапана на ИКД IV из закрытого в открытое положение: АБ – 1–5; длительности падения давлений в пневмолиниях: БВ – 1; БГ – 2; БЖ – 3; БИ – 4; БМ – 5; длительности регистрации давлений на каждом ИКД: ВД – 1; GE – 2; ЖК – 3; ИЛ – 4; МН – 5

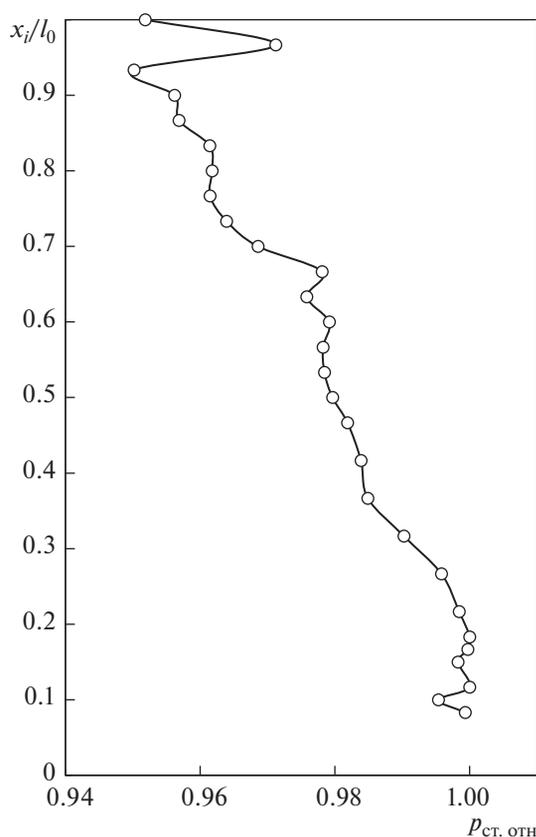


Рис. 9. Распределение $p_{\text{ст.отн}}$ по относительной высоте x_i/l_0 ИС 5-0

Некоторые результаты применения современной системы траверсирования в проточной части перспективной влажно-паровой турбины на примере распределения относительного статического давления $p_{\text{ст.отн}}$ по относительной высоте x_i/l_0 (здесь l_0 – высота ступени) перед пятой ступенью в режиме течения при относительном объемном расходе 1.0 показаны на рис. 9. От корневого до периферийного меридионального обвода имеются участки, на которых $p_{\text{ст.отн}}$ постоянно или снижается. Колебания $p_{\text{ст.отн}}$ на периферии ступени на относительной высоте от 0.90 по 0.97 объясняются влиянием струи надбандажной протечки из предыдущей ступени и незначительным повышением давления перед проточной частью, зафиксированным комбинированной гребенкой 1 (см. рис. 4).

Приведенные ранее технические решения, а также применение преобразователей РАА-33Х на диапазон 0–30 кПа обеспечивают снижение погрешности измерения давлений зондами до 0.5–1.4%. Меньшее значение относится к измерению давления перед последней ступенью, большее – к измерениям за ней. Дальнейшее повышение точности за пятой ступенью ЦНД возможно благодаря переходу на преобразователи с диапазоном 0–10 кПа, например такие, как высокоточные датчики давления типа РАА-41х.

Результаты работы применяются при исследованиях (при $\omega = 3000 \text{ мин}^{-1}$) в экспериментальной турбине отсека последних ступеней ЦНД мощной перспективной паровой турбины на натурном стенде АО “Силовые машины”.

ВЫВОДЫ

1. Предлагаемая усовершенствованная технология продувки каналов зонда от конденсата обеспечивает своевременную подачу команды на измерения (сразу после удаления продувочного воздуха из пневмолиний) после каждой продувки и одинаковые условия измерений в каждой точке траверсирования. Технология применяется как с крупногабаритными, так и с малогабаритными зондами.

2. Погрешность определения полного давления и давления в потоке снижена до 0.5–1.4% благодаря применению преобразователей абсолютного давления РАА-33Х на диапазон 0–30 кПа. Одновременные измерения давлений всеми приемниками зонда повышают точность определения меридиональных углов потока.

3. Благодаря снижению погрешности измерения локальных параметров потока повышается точность вычисления газодинамических характеристик решеток и внутреннего относительного КПД отсека.

4. Сокращение времени на измерение давлений в точке траверсирования на 25–30% позволяет увеличить выборку по высоте ступени, что повышает обоснованность неопределенности результатов опытов.

5. Время на обработку результатов траверсирования уменьшено на 5–10% благодаря добавлению трех дополнительных каналов измерения для контроля режима работы турбины по параметрам торможения перед отсеком и давлению в конденсаторе. Уменьшение времени на траверсирование снижает затраты на эксперимент.

6. При применении предлагаемой современной системы траверсирования для межвенцового зазора последней ступени увеличивается объем экспериментальных данных при исследованиях ЦНД.

7. Использование схемы с отдельными датчиками на каждом измерительном канале позволяет повысить надежность и ремонтпригодность систем траверсирования.

8. Дальнейшее повышение точности измерений давлений газодинамическими зондами пневмометрическим методом за последними ступенями турбины возможно благодаря применению преобразователей на диапазон 0–10 кПа.

9. Для улучшения аэродинамических характеристик насадков зондов необходимо применение передовых технологий изготовления, таких как аддитивное производство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Автоматизированная** измерительная система traversирования потока в ступенях мощных паровых турбин / А.В. Москаленко, А.В. Александров, А.Л. Некрасов, С.А. Иванов, А.Г. Долганов, Н.В. Кравцова, О.Д. Гостев, Д.О. Мокринский, А.С. Ласкин // Теплоэнергетика. 2019. № 1. С. 34–43. <https://doi.org/10.1134/S0040363619010053>
2. **Дейч М.Г., Филиппов Г.А.** Двухфазные течения в элементах теплоэнергетического оборудования. М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. **Филиппов Г.А., Стекольников Е.В., Анисимова М.П.** Энергетические характеристики потоков влажного пара и их измерение пневмометрическими зондами // Тр. ЦКТИ. 1966. Вып. 65. С. 38–44.
4. **Ермашов Н.Н.** Комбинированный насадок с постоянной продувкой для измерения газодинамических параметров при работе турбины на влажном паре // Тр. ЦКТИ. 1967. Вып. 80. С. 116–118.
5. **Комбинированные** зонды для измерения параметров потока в межвенцовых зазорах ЦНД / Б.Н. Агафонов, В.Н. Садовничий, Н.П. Агафонова, В.И. Кириллов, П.Ю. Приходько // Тяжелое машиностроение. 1993. № 3. С. 15–17.
6. **Совершенствование** схем и методик измерения параметров потока в ступенях низкого давления модельной паровой турбины / А.Л. Некрасов, А.В. Москаленко, В.К. Епифанов, А.С. Ласкин // Новое в российской электроэнергетике. 2010. № 11. С. 5–20.
7. **Использование** аддитивных технологий для изготовления изделий в машиностроении / Э.Ю. Колпишон, Н.Г. Разумов, Ю.А. Кириллов, А.А. Марченко, М.В. Родин, В.М. Режимчук // Тяжелое машиностроение. 2022. № 5–6. С. 30–36.
8. **Аэродинамические** характеристики ступеней тепловых турбин / Н.Н. Афанасьева, В.Н. Бусурин, И.Г. Гоголев, Р.И. Дьяконов, А.И. Кириллов, А.А. Климов, К.Л. Лапшин, А.С. Ласкин, В.И. Попков, В.А. Черников; под общ. ред. В.А. Черникова. Л.: Машиностроение, 1980.
9. **Кириллов И.И., Яблоник Р.М.** Основы теории влажнопаровых турбин. Л.: Машиностроение, 1968.

Improving the Accuracy of Measurements of Gas-Dynamic Parameters in LPC Last Stages in Studies Using Modern Flow Traversing System on a Full-Scale Test Bench

A. V. Moskalenko^{a, *}, A. M. Tyukhtyaev^a, D. M. Kovalev^a, A. G. Dolganov^a, A. A. Ivanovskii^a, V. A. Chernikov^b, and V. A. Rassokhin^b

^aJSC Power Machines—Leningradsky Metallichesky Zavod, St. Petersburg, 195009 Russia

^bPeter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, 195251 Russia

*e-mail: moskalenko_av@power-m.ru

Abstract—The need of traversing the flow gas-dynamic parameters, when trying out new last stages of a steam turbine's low-pressure cylinders (LPC), is shown. The specific features of pressure measurements according to the pneumometric method by means of probes in the last stages operating in a wet steam (two-phase) medium, with the probe's receiving holes and pneumatic lines becoming blocked with condensate, are shown. The changeover for using small-size probe heads featuring better measurement accuracy in comparison with large-size heads is substantiated. A universal algorithm for purging the pneumatic lines periodically with atmospheric air for various probes with receiving holes of certain diameters is proposed. The universal algorithm is obtained by supplementing the system with a subroutine that automatically monitors the time delay after closing the purging valves prior to carrying out measurements at the traversing point. At that, excluded are incomplete removal of residual purging air with condensate from the pneumatic lines and excessive time delay before measurements. The algorithm is implemented in improving the previously developed traversing system. Better accuracy of measuring the pressures and flow meridian angles is achieved owing to the use of high-precision transducers in each of the probe measurement channels with the absolute pressure range 0–30 kPa with the accuracy equal to 0.05% of the upper measurement limit. The time taken to process the traversing results is decreased by adding three measurement channels to the system, which operate synchronously with the probe and characterize the turbine operation mode. A modern system for traversing the flow in the gap between blade rings of the last stages has been developed. The results of this development are used in studying the advanced steam turbine LPC compartment on the full-scale test bench at JSC Power Machines.

Keywords: steam turbine, low-pressure cylinder, wet steam flow, last stage, probe, pneumometric measurement method, traversing system, periodic purging, automatic monitoring of time delay after purging, sampling