

**ПАРОТУРБИННЫЕ, ГАЗОТУРБИННЫЕ,
ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ
И ИХ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛАЖНО-ПАРОВОГО ПОТОКА
В МОДЕЛЬНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИНАХ**

© 2023 г. В. Е. Михайлов^а, Л. А. Хоменок^а, Н. Ю. Бокучава^а*, А. А. Ивановский^б

^аНаучно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова (НПО ЦКТИ), Атаманская ул., д. 3/6, Санкт-Петербург, 191167 Россия

^бАО «Силовые машины», ул. Ватутина, д. 3, лит. А, Санкт-Петербург, 195009 Россия

*e-mail: VokuchavaNI@ckti.ru

Поступила в редакцию 06.12.2022 г.

После доработки 21.02.2023 г.

Принята к публикации 30.03.2023 г.

Представлен комплекс для исследования структуры влажно-парового потока для стенда с модельной турбиной НПО ЦКТИ. На стенде более 20 лет проводятся испытания проточных частей паровых турбин. Экспериментальная турбина является моделью проточной части цилиндра низкого давления в масштабе 1 : 3. Она оснащена обширной измерительной системой для исследования вибрационной надежности элементов проточной части и структурно-кинематических характеристик потока. Одной из важнейших частей измерительной системы является комплекс для исследования дисперсной структуры влажно-парового потока, позволяющий проводить измерения одновременно в трех контрольных сечениях проточной части и в двух трубах отборов. Он включает в себя оптические зонды, блоки вторичной аппаратуры, систему траверсирования и программное обеспечение. Измерения, выполняемые с помощью оптического метода спектральной прозрачности, дают возможность установить размер и объемную концентрацию капель во влажно-паровом потоке. Описан новый метод определения распределения капель по размерам на основании оптических измерений. Представлены распределения капель по размерам, полученные этим методом в двух контрольных сечениях. Показано, что расчет степени влажности по данным оптических измерений возможен с привлечением результатов независимых измерений как давления пара, так и его температуры, регистрируемой оптическим зондом. Проведено сравнение расчетов степени влажности по данным измерений давления и температуры для модельной и натурной турбин. Результатом работы комплекса являются распределения степени влажности, размеров капель и температуры потока по высоте лопатки. Приведены распределения параметров влаги по высоте лопатки в трех контрольных сечениях.

Ключевые слова: модельная паровая турбина, измерения влажности, процессная влага, структура влажно-парового потока, оптические методы измерений, спектр ослабления излучения

DOI: 10.56304/S0040363623100053

Значительная часть мощности паровых турбин обеспечивается ступенями, работающими в области влажного пара. Надежных методов расчета таких ступеней нет, поэтому важную роль играет их экспериментальная отработка, которая проводится на модельных стендах. В России модельный стенд паровых турбин находится в НПО ЦКТИ.

Важным аспектом отработки проточных частей паровых турбин на модельных и натурных турбинах является исследование структурно-кинематических характеристик влажно-паровых потоков [1, 2]. Исследованиям такого рода с помощью измерительного комплекса и посвящена настоящая статья.

Экспериментальная паровая турбина низкого давления ЭТНД-2 (рис. 1) [3] представляет собой

модель проточной части цилиндра низкого давления в масштабе 1 : 3. В зависимости от технических характеристик и задач исследований она может включать в себя от трех до пяти ступеней.

Ротор турбины состоит из двух независимых частей. Вырабатываемая энергия поглощается с помощью двух нагрузочных устройств – гидротормозов, расположенных с противоположных сторон турбины. Диск с рабочими лопатками предпоследней ступени может быть установлен на передний или задний ротор в зависимости от решаемой задачи.

Модельный стенд с ЭТНД-2 оснащен измерительной системой, одной из важнейших составных частей которой является комплекс для исследования структуры влажно-парового потока.

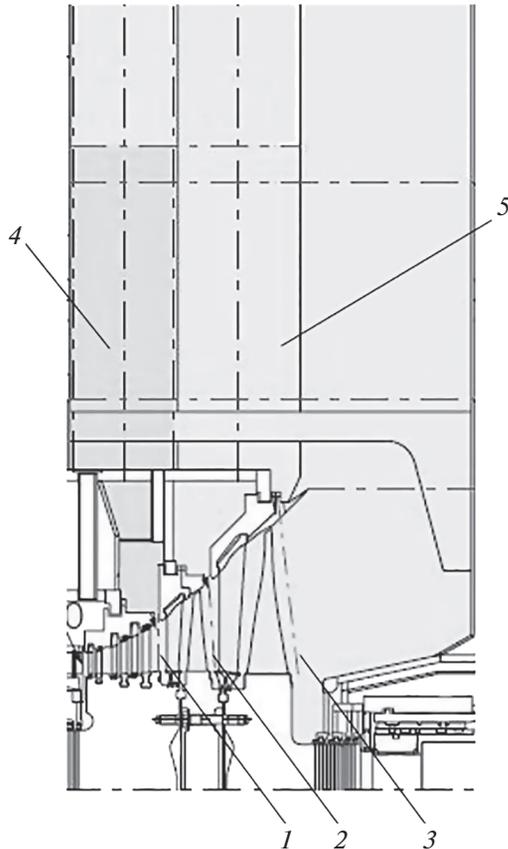


Рис. 1. Продольный разрез модельной турбины ЭТНД-2.

1 – сечение 42 перед предпоследней ступенью; 2 – сечение 52 перед последней ступенью; 3 – сечение 62 за последней ступенью; 4 – камера отбора перед предпоследней ступенью (A2); 5 – камера отбора перед последней ступенью (A1)

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ВЛАЖНО-ПАРОВОГО ПОТОКА

Измерительный комплекс предназначен для определения параметров процессной влаги, образующейся при конденсации пара [4]. Радиус капле процессной влаги составляет 0.05–1.00 мкм при объемной концентрации 10^{-8} – 10^{-4} . В основу исследований, выполняемых с помощью измерительного комплекса, положена зависимость интенсивности ослабленного излучения I в двухфазной среде от размера и концентрации капель:

$$I(r, \lambda) = I_0 \exp \left[\int_0^{\infty} -K(\rho) N(r) r^2 L \pi dr \right], \quad (1)$$

где r – радиус капли; λ – длина волны; I_0 – интенсивность падающего на двухфазную среду излучения; $K(\rho)$ – коэффициент ослабления света отдельной каплей; $\rho = 2\pi r/\lambda$ – параметр дифракции (критерий подобия для эффектов светорассея-

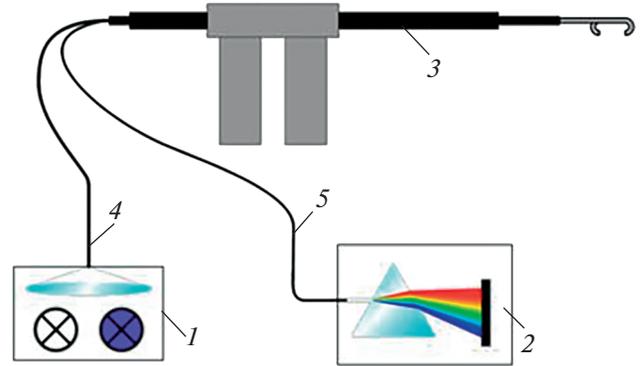


Рис. 2. Принципиальная схема измерительного комплекса.

1 – источник излучения; 2 – приемник излучения; 3 – оптический зонд; 4, 5 – осветительный и приемный световоды

ния); $N(r)$ – распределение капель по размерам; L – база просвечивания в двухфазной среде.

Спектральный состав ослабленного каплями излучения зависит от коэффициента рассеяния одиночной каплей, который может быть рассчитан по дифракционной теории Ми [5].

Принципиальная схема измерительного комплекса представлена на рис. 2. Излучение от источника 1, состоящего из галогеновой и дейтериевой ламп, направляется по осветительному световоду 4 в оптический зонд 3 и, пройдя через влажно-паровой поток, по приемному световоду 5 поступает в приемник излучения 2.

По измеренному спектру ослабления излучения влажно-паровым потоком и формуле (1), можно рассчитать распределение капель по размерам, их средний размер и объемную концентрацию. Метод измерений является абсолютным и не требует калибровок.

Структурная схема измерительного комплекса показана на рис. 3. Комплекс включает в себя две подсистемы (WMS Fix, WMS Move), каждая из которых состоит из зондов, блоков вторичной аппаратуры, программного обеспечения и вспомогательного оборудования.

Подсистема WMS Fix предназначена для измерений в камерах отбора пара A1 и A2 (см. рис. 1) и работает в полностью автоматизированном режиме по команде, поступающей из внешней системы. Сразу после замера система формирует выходной файл с параметрами капель: средним размером и объемной концентрацией.

Подсистема WMS Move предназначена для проведения измерений по высоте лопатки в контрольных сечениях 42, 52 и 62 (два зонда с противоположных сторон турбины) (см. рис. 1). Работа комплекса осуществляется в полуавтоматическом режиме: оператор задает линейные и угловые координаты траверсирования (последние бе-

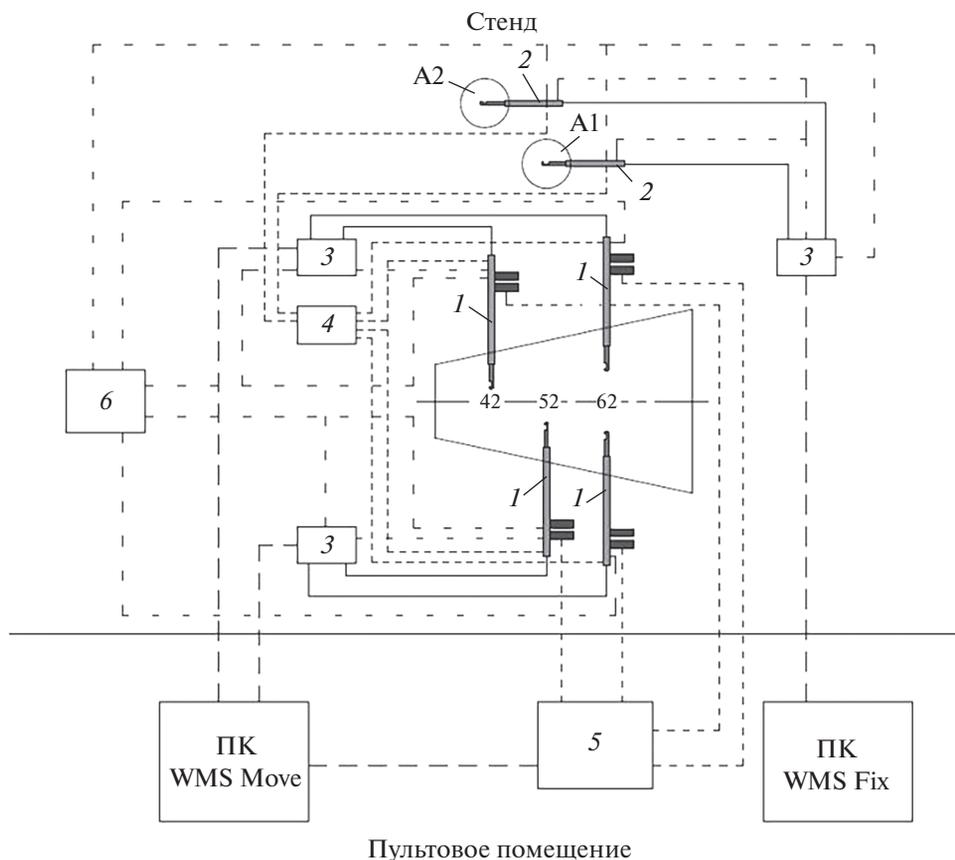


Рис. 3. Общая схема измерительного комплекса.

1, 2 – подвижный и неподвижный зонды; 3 – блок вторичной аппаратуры; 4 – блок измерения температуры; 5 – контроллер шаговых моторов; 6 – пневмораспределительная станция; ПК WMS Move, ПК WMS Fix – управляющие компьютеры подсистем

руются из данных газодинамических измерений), а также данные о геометрической форме проточной части и проводит измерение. Траверсирование происходит достаточно быстро: измерения в 50 точках по высоте лопатки продолжаются в течение 10–15 мин. После проведения измерений полученные данные автоматически анализируются и обрабатываются и формируется файл с результатами.

Все зонды оборудованы унифицированной оптической головкой (рис. 4), выполненной с использованием гибких кварцевых световодов. Осветительный световод 1 диаметром 0,9 мм изготовлен из моноволокна, приемный световод 3 представляет собой жгут из оптических волокон диаметром 2 мм. По осветительному световоду излучение передается в расположенный в оптической головке коллиматор 2, который формирует параллельный пучок лучей, просвечивающий влажно-паровой поток. Ослабленное средой излучение по приемному световоду направляется в регистратор излучения. Осветительный световод располагается в подвижном штоке 4, который перемещается с помощью пневмопривода, установ-

ленного на внешнем конце зонда. В оптической головке зонда установлена термопара 5. Диаметр оптической головки составляет 25 мм, общая длина зонда – до 3 м (в зависимости от места установки), длина оптического тракта (от источника до приемника) равна 10 м.

Оптическая головка, разработанная в НПО ЦКТИ, имеет следующие особенности:

зона измерений отдалена от державки на значительное расстояние (примерно 20 мм), что

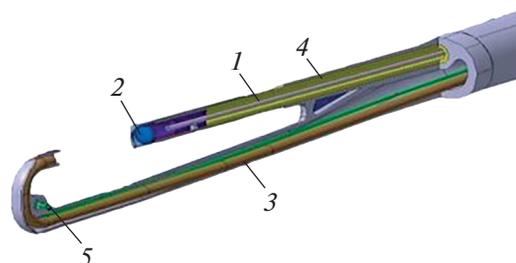


Рис. 4. Оптическая головка зонда.

1, 3 – осветительный и приемный световоды; 2 – коллиматор; 4 – подвижный шток; 5 – термопара

обеспечивает снижение обратного воздействия корпуса зонда на поток в зоне измерений и чувствительности зонда к углу установки. Выполненные на тарировочной установке НПО ЦКТИ измерения показали, что поворот зонда вокруг оси на $\pm 20^\circ$ не влияет на его показания;

базу просвечивания можно изменять от 0 (для регистрации I_0) до 45 мм. Это дает возможность без потери чувствительности выполнять измерения в различных местах установки зонда (в зависимости от плотности потока базу просвечивания L можно задавать в диапазоне 20–45 мм);

ширина головки на расстоянии 120 мм от ее вершины не превышает 12 мм, что позволяет проводить измерения в тесных пространствах между ступенями;

с помощью специально изготовленных световодов с крутым изгибом можно подойти к корневому обводу проточной части значительно ближе, чем в известных конструкциях аналогичных устройств;

одновременно с измерениями ослабления излучения регистрируется температура потока с помощью термопары;

предусмотрена защита с помощью спутных основному потоку тангенциальных струй (в отличие от осевых продувок, приводящих к неопределенности определения базы просвечивания) оптических поверхностей, контактирующих с потоком (коллиматора и торца приемного световода), от появления на них пленок влаги и загрязнений. Для этой цели по специальной пневмолинии в зонд подается осушенный и очищенный воздух от пневмораспределительной станции.

В блоке вторичной аппаратуры располагаются комбинированный источник излучения и приемник, а также пневматические клапаны системы перемещения подвижного штока. Источник излучения обеспечивает стабильное яркое излучение в широком спектральном интервале 200–900 нм. При этом излучение в коротковолновой области осуществляется дейтериевой газоразрядной лампой, а в видимой и инфракрасной областях – галогеновой. Приемником излучения является компактный высокочувствительный спектрограф с матрицей, имеющей повышенную чувствительность в области жесткого ультрафиолета. Матрица спектрографа снабжена системой термостабилизации. Спектрограф защищен светонепроницаемым корпусом от внешней засветки.

Блоки вторичной аппаратуры располагаются в двух стойках в непосредственной близости от турбины. Перемещение зондов в радиальном направлении и установка их по углу натекания потока осуществляются системой траверсирования.

Для проведения измерений и обработки данных разработано специальное программное обеспече-

ние, состоящее из двух частей: одна осуществляет измерение сигналов, перемещение зондов внутри проточной части и связь с измерительной системой ЭТНД-2, другая предназначена для обработки результатов измерений.

Все управление процессом измерения параметров влаги происходит дистанционно из пультового помещения. Измерительный комплекс нечувствителен к температурной неоднородности окружающей среды и внешней засветке. Измерения параметров процессной влаги выполняются при температуре 10–160°C, среднем радиусе капель 0.05–1.00 мкм, объемной концентрации 10^{-8} – 10^{-4} .

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

В данном разделе представлены такие методы обработки результатов измерений, как определение среднего размера капель и их объемной концентрации, а также распределения капель по размерам.

Определение среднего размера капель и их объемной концентрации

Для получения интегральных характеристик влаги (среднего размера и объемной концентрации) можно ограничиться определением момента распределения капель по размерам M_i :

$$M_i = \int_0^{\infty} r^i N(r) dr.$$

Момент с точностью до постоянной соответствует при $i = 2$ удельной площади поверхности капель, при $i = 3$ – объемной концентрации C_v :

$$C_v = \frac{4}{3} \pi M_3. \quad (2)$$

Отношение третьего момента распределения ко второму дает некоторый средний размер капель R_{32} :

$$R_{32} = \frac{M_3}{M_2}, \quad (3)$$

который называется “заутеровский”.

Предложенный в НПО ЦКТИ интегральный метод [6] реализует точное решение обратной задачи светорассеяния относительно M_3 и M_2 без восстановления распределения капель по размерам. Расчетная относительная неопределенность объемной концентрации и среднего размера не превышает 5%, неопределенность степени влажности составляет не более 10%.

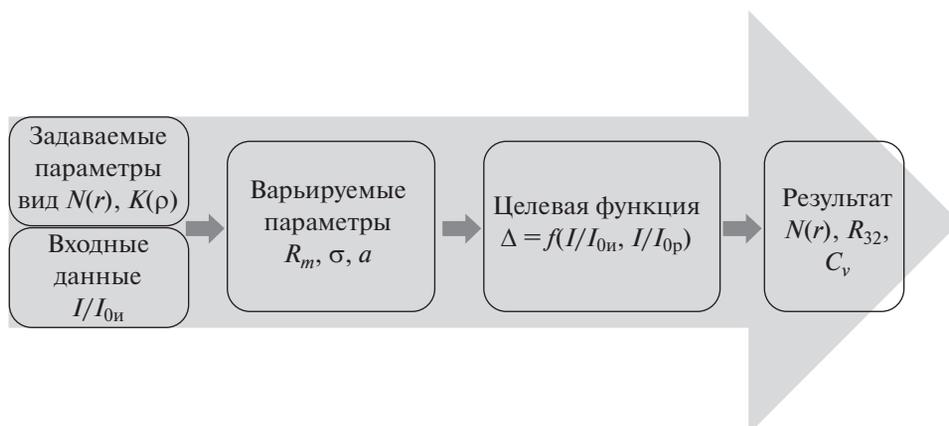


Рис. 5. Блок-схема метода AF

Определение распределения капель по размерам

С помощью интегрального метода можно получить только интегральные параметры, достаточные для определения степени влажности. Но в некоторых случаях необходимо знать распределение капель по размерам $N(r)$.

Один из методов определения $N(r)$ – восстановление распределения капель по размерам на основании измеренных спектров ослабления излучения в соответствии с точным решением уравнения (1) – был предложен в НПО ЦКТИ [7]. Однако он пригоден к использованию только в полупригодном режиме, что не позволяет применять его для обработки большого объема данных в процессе эксперимента. В настоящей работе предложен новый метод Adjustable Fit (AF), лишенный этого недостатка.

Уравнение (1) относится к классу некорректных задач. Единственный критерий правильности решения – спектр ослабления излучения $I/I_{0р}$, рассчитанный по полученному $N(r)$, должен соответствовать измеренному спектру $I/I_{0и}$. Этот принцип положен в основу рассматриваемого метода. Задается вид распределения капель по размерам, затем его параметры варьируются таким образом, чтобы рассчитанный спектр ослабления света наилучшим образом совпадал с измеренным спектром.

В качестве входных данных используется измеренный спектр ослабления излучения. Задаются следующие параметры:

вид распределения капель по размерам $N(r)$;

теоретическая зависимость ослабления излучения одиночной каплей $K(r)$.

По заданному $N(r)$ с использованием формулы (1) рассчитывается спектр ослабления излучения.

Целевой функцией данного метода является величина Δ – мера совпадения рассчитанного и измеренного на k длинах волн спектров ослабления:

$$\Delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=k} \left(\frac{I}{I_0} \lambda_{ip} - \frac{I}{I_0} \lambda_{ii} \right)^2}{k}}$$

Для достижения минимального значения Δ варьируются модальный размер R_m , ширина распределения σ , концентрация капель a , количество капель/объем влажного пара. При этом чем больше σ , тем существеннее средний размер отличается от модального размера.

После подбора $N(r)$, которому соответствует рассчитанный спектр ослабления, максимально приближенный к измеренному, вычисляются средний размер капель и их объемная концентрация по формулам (2), (3) (рис. 5).

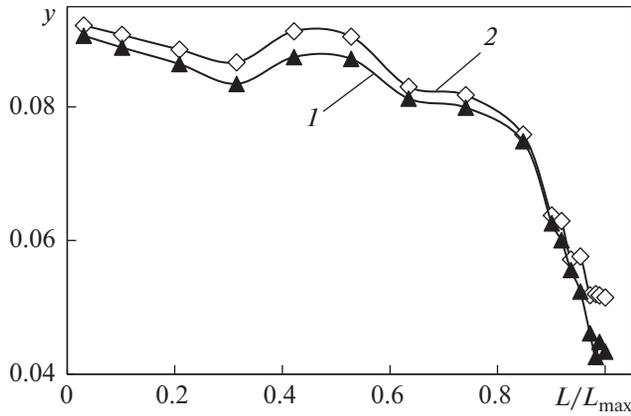
Таким образом, предложенный в настоящей статье метод позволяет определить не только средний размер и объемную концентрацию капель, но и распределение их по размерам.

ПЕРЕХОД ОТ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СТЕПЕНИ ВЛАЖНОСТИ ПОТОКА

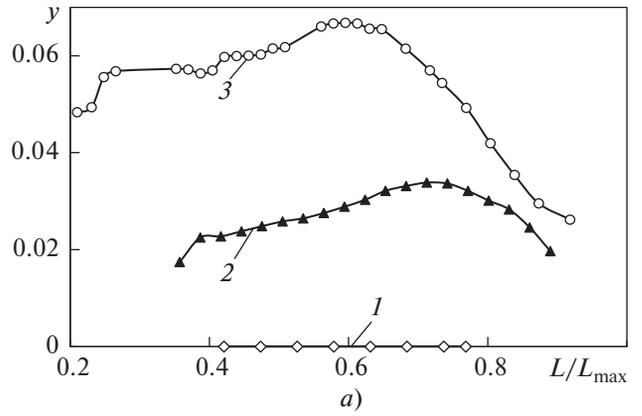
Все оптические методы позволяют получать фракционный состав влажно-парового потока, включая массовую концентрацию влаги, в то время как для оценки работы турбины используется соотношение массы влаги и массы пара – степень влажности потока y :

$$y = \frac{C_v}{C_v + \left[(1 - C_v) \frac{\rho_{п}}{\rho_{в}} \right]}$$

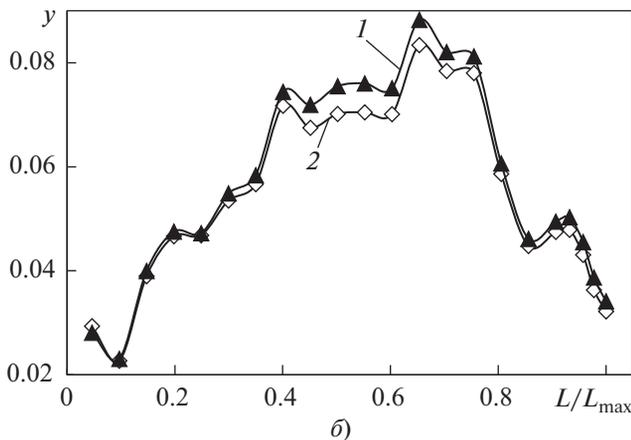
где $\rho_{п}$, $\rho_{в}$ – плотность пара и воды.



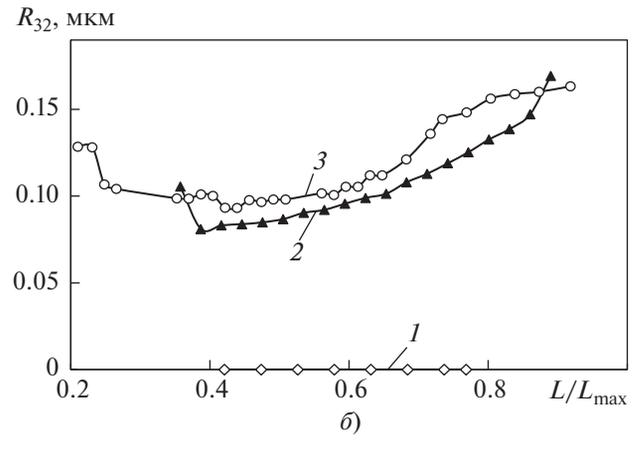
a)



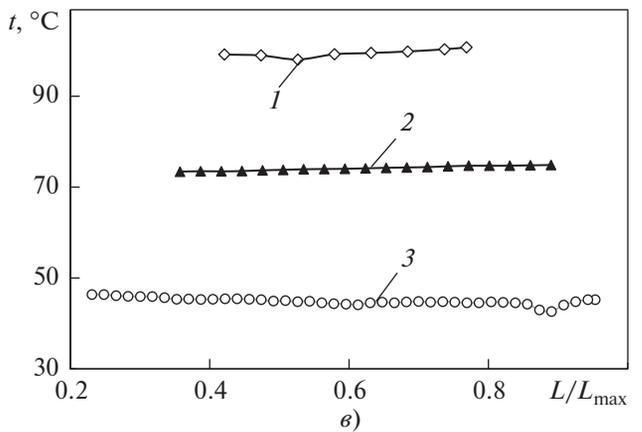
a)



б)



б)



в)

Рис. 6. Зависимость степени влажности y от относительной высоты лопатки L/L_{\max} модельной (а) и натурной (б) турбины при расчете плотности пара с использованием данных измерений давления (1) и температуры (2)

Рис. 7. Распределение степени влажности (а), среднего размера капель (б) и температуры потока (в) по высоте лопатки в сечениях 42 (1), 52 (2) и 62 (3)

Таким образом, для перехода от измеряемой с помощью оптических методов объемной концентрации C_v к степени влажности необходимо знать плотность пара. Как правило, для этого используется измеренное давление.

Применение рассматриваемого измерительного комплекса позволяет оценить плотность пара по температуре насыщения, которая регистрируется с помощью термопары, размещенной в оптическом зонде. Для обоснования такой возможности для измерений на модельной и натурной турбине [8] было проведено сопоставление степени влажности, рассчитанной с помощью плотности пара, определенной по данным измерения температуры потока термопарой (установленной в оптическом зонде) и по данным статического давления (измерения газодинамическим зондом) (рис. 6). Это сопоставление показало, что неопределенность расчета степени влажности не превышает 1%.

Принципиальное достоинство определения плотности с использованием температуры заклю-

чается в том, что оптические измерения и измерения температуры производятся одновременно (одним устройством) и в одном месте проточной части, а при расчете по давлению — разными устройствами и, как правило, в разное время. Кроме того, и это особенно важно при измерениях на натуральных турбинах, когда газодинамические исследования не проводятся.

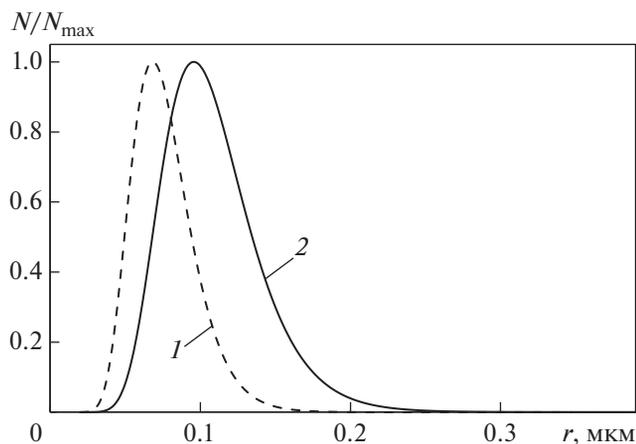


Рис. 8. Распределение капель по размерам N/N_{\max} в сечениях 52 (1) и 62 (2), рассчитанное с помощью метода АФ

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВЛАЖНО-ПАРОВОГО ПОТОКА

Описанный комплекс разработан для исследования процессов влагообразования в проточной части модельной турбины. В процессе испытаний выполняются измерения распределения параметров влаги по высоте лопатки в различных контрольных сечениях. На рис. 7 представлены кривые распределения параметров процессной влаги по высоте лопатки в контрольных сечениях 42, 52 и 62. Измерения проводились при давлении 0.173 МПа и температуре 163°C на входе в турбину и давлении на выходе из нее 0.098 МПа.

Помимо стандартной обработки данных интегральным методом (для получения степени влажности и среднего размера капель) для некоторых замеров была проведена обработка методом АФ. На рис. 8 приведены кривые распределения капель по размерам в двух сечениях на относительной высоте лопатки $L/L_{\max} = 0.6$. Видно, что modalный размер капель за последней ступенью больше примерно на 30%, чем перед ступенью.

В качестве оценки достоверности рассчитанных законов ослабления на рис. 9 представлены измеренные и рассчитанные спектры ослабления излучения при $L/L_{\max} = 0.6$. Совпадение спектров оказалось достаточно хорошим: $\Delta = 3.1\%$ в сечении 52, $\Delta = 1.3\%$ в сечении 62.

На базе описанного измерительного комплекса была разработана аппаратура для проведения испытаний на натурной экспериментальной турбине ЭТПН-5 (АО «Силловые машины») [8].

ВЫВОДЫ

1. Измерительный комплекс для исследования фракционного состава процессной влаги в мо-

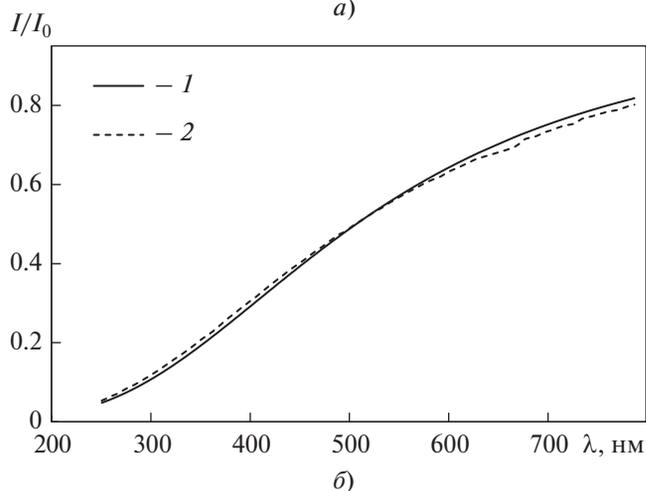
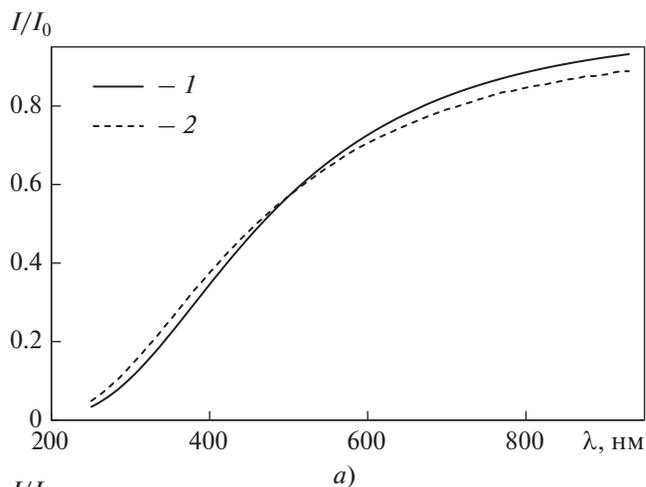


Рис. 9. Зависимость расчетного (1) и измеренного (2) ослабления излучения от длины волны в сечениях 52 (а) и 62 (б)

дельных турбинах, включающий в себя четыре зонда, расположенных в проточной части, и два зонда в трубопроводах отбора пара, может использоваться для определения параметров влажно-парового потока без проведения газодинамических измерений при радиусе капель 0.05–1.00 мкм, объемной концентрации 10^{-8} – 10^{-4} , температуре 10–160°C.

2. Предлагаемый метод решения обратной задачи светорассеяния позволяет определять закон распределения капель по размерам в автоматизированном режиме.

3. Работа комплекса подтверждена результатами измерений распределения параметров капель в трех контрольных сечениях модельной турбины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schatz M., Eberie T. Experimental study of steam wetness in a model steam turbine rig: presentation of results

- and comparison with computational fluid dynamics data // *J. Power Energy*. 2014. V. 228. Is. 2. P. 129–142.
2. **Kolovratnik M., Bartoš O.** Wet steam wetness measurement in a 10 MW steam turbine // *EPJ Web Conf*. 2014. V. 67. P. 02055.
<https://doi.org/10.1051/epjconf/20146702055>
 3. **Kreitmeier F., Juvet P., Weiss P.** Proactive product and process qualification in steam turbine development // *ABB Review*. 1998. V. 4. P. 37–47.
 4. **Бокучава Н.Ю., Терентьев А.В.** Автоматизированный комплекс для измерений структурно-кинематических параметров влажно-паровых потоков в модельных и натуральных турбинах // *Сб. докл. II Всерос. спец. науч.-практ. конф. молодых специалистов (с международным участием) “Современные технологии в энергетике”*. Москва, 29–30 марта 2018 г. М.: ВТИ, 2018.
 5. **Шифрин К.С.** Рассеяние света в мутной среде. М.; Л.: Гостехтеориздат, 1951.
 6. **Фельдберг Л.А., Терентьев А.В., Шустер А.Р.** Изменение объемной концентрации диспергированной фазы методом спектральной прозрачности // *Тр. VIII Междунар. науч.-практ. конф. “Оптические методы исследований потоков”*. Москва, 28 июня–1 июля 2005 г. М.: Изд-во МЭИ, 2005.
 7. **Измерение** фракционного состава высокодисперсного газочапельного потока в экспериментальной турбине / Л.А. Фельдберг, Н.В. Семидетнов, А.В. Терентьев, А.Р. Шустер // *Тр. XII Междунар. науч.-техн. конф. “Оптические методы исследований потоков”*. Москва, 28–30 июня 2013 г.
 8. **Исследование** влажно-парового потока в последней ступени ЦНД экспериментальной паровой турбины / Л.А. Хоменок, Л.А. Фельдберг, Н.Ю. Бокучава, А.А. Ивановский, С.Н. Козачук, А.М. Тютяев // *Надежность и безопасность энергетики*. 2022. Т. 15. № 3. С. 175–182.

Study of Wet Steam Flow in Model Steam Turbines

V. E. Mikhailov^a, L. A. Khomenok^a, N. Yu. Bokuchava^{a, *}, and A. A. Ivanovsky^b

^a *Polzunov Research and Production Association for Study and Design of Energy Equipment (NPO TsKTI), St. Petersburg, 191167 Russia*

^b *Power Machines, St. Petersburg, 195009 Russia*

**e-mail: BokuchavaNI@ckti.ru*

Abstract—A complex for studying the structure of the wet-steam flow for a stand with a model turbine of the NPO TsKTI is presented. On the stand, the flow parts of steam turbines have been tested for more than 20 years. The experimental turbine is a model of the flow part of a low-pressure cylinder at a scale of 1 : 3. It is equipped with an extensive measuring system for the study of the vibration reliability of the elements of the flow part and the structural and kinematic characteristics of the flow. One of the most important parts of the measuring system is a complex for studying the dispersed structure of the wet-steam flow, which allows measurements to be carried out simultaneously in three control sections of the flow part and in two sampling pipes. It includes optical probes, secondary hardware units, a traversing system, and software. Measurements made using the optical spectral transparency method allow one to set the size and volume concentration of droplets in the wet-steam stream. A new method for determining droplet size distribution based on optical measurements is described. The droplet size distributions obtained by this method in two control sections are presented. It is shown that the calculation of the degree of humidity according to optical measurements is possible with the involvement of the results of independent measurements of both the vapor pressure and its temperature recorded by the optical probe. A comparison of the calculations of the degree of humidity based on pressure and temperature measurements for model and full-scale turbines was made. The result of the complex is the distribution of the degree of humidity, the size of the droplets, and the temperature of the flow along the height of the blade. The distribution of moisture parameters by the height of the blade in three control sections is given.

Keywords: model steam turbine, humidity measurements, process moisture, wet-steam flow structure, optical measurement methods, attenuation spectrum