

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ (05.04.00)

УДК 621.165.58

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-3-6-12

### **Влияние температуры вдуваемого пара на характеристики жидкой фазы за изолированной сопловой решеткой**

В.Г. Грибин, А.А. Тищенко, И.Ю. Гаврилов, В.В. Попов, И.Ю. Сорокин,  
В.А. Тищенко, С.В. Хомяков, Р.А. Алексеев

В настоящее время актуален вопрос эрозии поверхностей проточной части турбин, работающих в области влажного пара. Одним из перспективных методов борьбы с отрицательным воздействием эрозионно-опасной крупной влаги считается вдув пара в местах наибольшей концентрации пленок жидкости.

Представлены результаты экспериментального исследования влияния температуры вдува пара на характеристики жидкой фазы влажно-парового потока за изолированной турбинной решеткой. Объект исследования — плоский пакет полых сопловых лопаток с щелью для вдува, расположенной на вогнутой поверхности вблизи выходной кромки. Эксперименты проходили на пародинамическом стенде в лаборатории кафедры паровых и газовых турбин, рабочим телом которого является пар из отбора турбины, расположенной на ТЭЦ НИУ «МЭИ». Данные получены для двух значений начальной влажности. Температура вдуваемого пара менялась при постоянном значении давления пара в камере вдува. Для определения влияния вдува пара на характеристики жидкой фазы был использован метод PIV, реализованный в системе лазерной диагностики «ПОЛИС». Средние размеры капель за решеткой измеряли с помощью бесконтактной методики, разработанной на кафедре ПГТ. Также в работе проанализировано угловое рассогласование фаз и проведена оценка диаметров крупных капель за выходной кромкой лопатки.

Полученные результаты показали, что вдув пара влияет на область присутствия крупных капель за сопловой решеткой. Коэффициент скольжения крупных капель практически не зависит от температуры вдуваемого пара, а эффективность рассматриваемого метода — от температуры пара перед камерой вдува.

*Ключевые слова:* влажный пар, вдув пара, последние ступени паровых турбин.

*Для цитирования:* Грибин В.Г., Тищенко А.А., Гаврилов И.Ю., Попов В.В., Сорокин И.Ю., Тищенко В.А., Хомяков С.В., Алексеев Р.А. Влияние температуры вдуваемого пара на характеристики жидкой фазы за изолированной сопловой решеткой // Вестник МЭИ. 2017. № 3. С. 6—12. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-3-6-12.

### **The Influence of Injected Steam Temperature on the Liquid Phase Characteristics Downstream of an Isolated Nozzle Vane Cascade**

V.G. Gribin, A.A. Tishchenko, I.Yu. Gavrilov, V.V. Popov, I.Yu. Sorokin, V.A. Tishchenko,  
S.V. Khomyakov, R.A. Alexeev

Erosion damage of the steam turbine flow path surfaces operating in the wet-steam region is presently a topical issue. Steam injection in locations containing the highest liquid film concentrations is considered to be one of promising ways to combat the adverse effect of erosion-hazardous coarse moisture droplets.

The article presents the results from experimental studies aimed at determining the effect the steam injection temperature has on the characteristics of wet-steam flow liquid phase downstream of an isolated turbine blade cascade. A flat cascade of hollow nozzle vanes with a slit for steam injection located on the vane pressure surface near its trailing edge was used as the studied subject. The experiments were carried out on the experimental steam dynamics facility installed at the laboratory of the Moscow Power Engineering Institute National Research University's (MPEI) Department for Steam and Gas Turbines. Steam from extraction of the steam turbine installed at the MPEI's

combined heat and power plant was used as the working fluid for the experimental facility. The experimental data were obtained for two initial moisture content values. The injected steam temperature was varied while keeping constant steam pressure in the injection chamber. The PIV method implemented in the POLIS laser diagnostic system was used for determining the effect of steam injection on the liquid phase characteristics. The average diameters of droplets downstream of the vane cascade were measured using the contactless technique developed at the MPEI Department for Steam and Gas Turbines. Angular misalignment between the phases was also analyzed, and the diameters of coarse droplets downstream of the vane trailing edge were estimated.

An analysis of the obtained data has shown that steam injection affects the coarse droplet existence area downstream of the vane cascade. The coarse droplet slip coefficient is almost independent on the injected steam temperature, and the efficiency of the proposed technique is almost independent on the steam temperature upstream of the injection chamber.

*Key words:* wet steam, steam injection, steam turbine last stages.

*For citation:* Gribin V.G., Tishchenko A.A., Gavrilov I.Yu., Popov V.V., Sorokin I.Yu., Tishchenko V.A., Khomyakov S.V., Alexeev R.A. The Influence of Injected Steam Temperature on the Liquid Phase Characteristics Downstream of an Isolated Nozzle Vane Cascade. MPEI Vestnik. 2017; 3: 6—12. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-3-6-12.

Проблема эрозии рабочих поверхностей последних ступеней турбин, работающих в области влажного пара, до сих пор до конца не решена и является одной из основных, стоящих перед производителями турбин высокой мощности. Отрицательное влияние крупных капель выражается в разрушении поверхностей рабочих и сопловых лопаток, в результате чего снижается не только безопасность, но и экономичность установки в целом.

Процессы эрозионного износа определяют величину предельной влажности за последней ступенью турбины [1]. Основным источником крупных эрозионно-опасных капель — пленка жидкости, формирующаяся на поверхностях межлопаточного канала вследствие оседания на них капель жидкости, находящихся во влажно-паровом потоке. Такой процесс характерен для течения пара в последних ступенях цилиндров низкого давления конденсационных машин и турбин атомных электростанций [2]. Оседание капель на поверхностях проточной части в основном зависит от их диаметра и плотности несущей среды [3].

Для предотвращения разрушения элементов проточной части применяются различные методы и технические решения, направленные на снижение отрицательного влияния влажности, — в частности, сепарация пленок жидкости. Но данный метод не всегда эффективен. Вместе с тем достаточно перспективным считается метод вдува пара с целью дробления пленки жидкости. Однако данный метод исследован недостаточно.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования влияния температуры вдуваемого пара на основные характеристики крупных эрозионно-опасных капель за изолированной сопловой решеткой.

### Экспериментальный стенд и объект исследования

Исследования проводились на пародинамическом стенде КВП-2 в Московском энергетическом институте. Стенд позволяет изучать течение перегретого, насыщенного и влажного пара в элементах проточных частей турбомашин.

На рис. 1 представлена принципиальная тепловая схема экспериментальной установки. Перегретый пар из отбора паровой турбины проходит первую ступень увлажнения 1, которая используется для уменьшения температуры пара до заданного значения путем впрыскивания в поток питательной воды, поступающей из коллектора 6. После первой ступени увлажнения пар попадает в коллектор 2. Из него рабочее тело попадает в бак-ресивер 3 стенда КВП-2. На этой ветке паропровода расположена вторая ступень увлажнения 9, которая обеспечивает снижение температуры пара до состояния насыщения. Третья ступень увлажнения 4 — это блок форсунок, к которому также подведена питательная вода с коллектора 6. Форсуночный блок 4 используется для создания полидисперсной капельной среды перед исследуемым объектом. Рабочее тело проходит через исследуемый канал, установленный в съемной рабочей части 5, и попадает в конденсатор 7, после чего конденсат возвращается в цикл электростанции. Также на схеме показана линия подвода вдуваемого в межлопаточный канал пара 8.

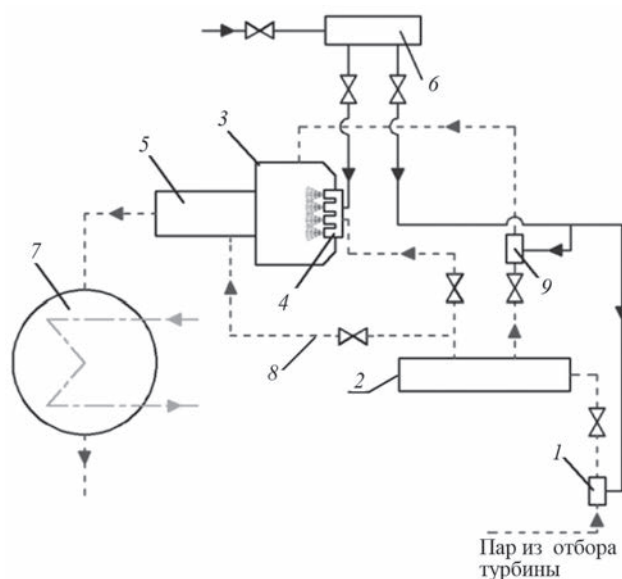


Рис. 1. Тепловая схема экспериментального стенда:  
- - - пар; - - - циркуляционная вода; — питательная вода

Для исследования влияния вдува пара на динамику жидкой фазы за изолированной сопловой решеткой использовалась система лазерной диагностики «ПОЛИС», в которой реализован метод PIV (Particle Image Velocity), позволяющий определять двухкомпонентные мгновенные поля скоростей на регулярной сетке (диапазон измерения скорости 0,001...1000 м/с; погрешность не более 1 %). Методика применения системы лазерной диагностики, адаптированная к течению полидисперсной влажно-паровой среды, была успешно реализована в [4—6]. В настоящей работе рассмотрены осредненные характеристики капельных потоков за решеткой, полученные посредством статистической обработки набора мгновенных полей скоростей.

Помимо определения скоростных характеристик частиц жидкой фазы, кросскорреляционный метод PIV также использовался для оценки средних размеров капель в потоке. Для этого была взята методика, описанная в [7]. Кратко используемый подход представлен на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема бесконтактного метода определения средних размеров капель

Исходными данными являются:

- экспериментально полученное статистически осредненное поле скоростей жидкой фазы;
- параметры основной (паровой) фазы, полученные численным моделированием течения с помощью CFD кода Ansys Fluent.

По экспериментальным данным о полях скоростей жидкой фазы рассчитаны траектории характерных потоков крупнодисперсной влаги. Вдоль них определены параметры жидкой и паровой фаз.

Имея исходные данные в каждой точке траектории, средний диаметр капель  $d_k$  может быть определен из решения следующего уравнения:

$$\frac{1}{2} A_k C_k \rho_n |\bar{c}_n - \bar{c}_k| (\bar{c}_n - \bar{c}_k) = m_k \bar{a}_k,$$

где  $A_k$  — площадь поперечного сечения капли (в плоскости, нормальной к направлению движения газа);  $C_k$  — коэффициент аэродинамического сопротивления капли;  $\bar{c}_n, \bar{c}_k$  — скорости паровой и жидкой фаз;  $m_k$  — масса капли;  $\rho_n$  — плотность пара. Данная методика апробирована и подтверждена экспериментальными исследованиями [8].

Объект исследования — плоский пакет полых сопловых лопаток с щелью для вдува греющего пара на вогнутой стороне профиля (рис. 3, а). Решетку устанавливали в рабочую часть, принципиальная схема которой представлена на рис. 3, б. Исследования выполнены для двух значений начальной влажности  $y_0 = 1$  и 4 % при теоретическом числе Маха за решеткой  $M_{tr} = 0,7$ . Давление и температуру вдуваемого пара измеряли в камере вдува ( $P_k, T_k$ ). Для изменения температуры вдуваемого пара в тепловой схеме стенда КВП-2 установлен поверхностный теплообменник, обеспечивающий изменение температуры вдуваемого пара в диапазоне  $\Delta T_{п.к} = 0 \dots 100$  К ( $\Delta T_{п.к} = T_{п.к} - T_s(P_k)$ , где  $T_{п.к}$  — температура вдуваемого пара перед камерой;  $T_s(P_k)$  — температура насыщения при давлении вдуваемого пара). Относительное давление вдуваемого пара на всех режимах было постоянным и соответствовало  $\epsilon_{вд} = 0,8$  ( $\epsilon_{вд} = P_{щ}/P_k$ , где  $P_{щ}$  — статическое давление пара в межлопаточном канале в сечении щели;  $P_k$  — давление пара внутри камеры вдува). Расход вдуваемого пара контролировали с помощью расходомера.

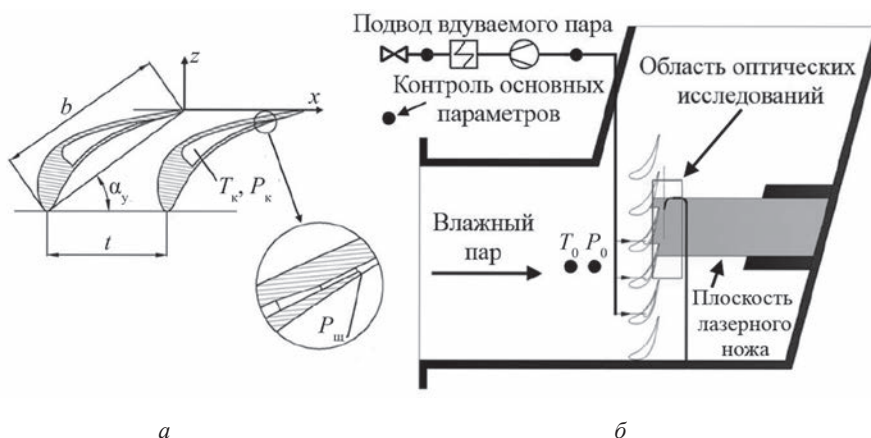


Рис. 3. Исследуемый объект (а) и схема проведения эксперимента (б)

**Влияние температуры вдува греющего пара на скоростные характеристики жидкой фазы за решеткой**

Все полученные результаты представлены в сравнении с режимом без вдува, который обозначен как  $\epsilon_{вд} = 1$ . На рис. 4 изображены распределения коэффициентов скольжения  $v$  ( $v = c_k/c_n$ , где  $c_n$  — скорость паровой фазы;  $c_k$  — скорость жидкой фазы) вдоль шага решетки  $\bar{x}$  ( $\bar{x} = x/b$ , где  $x$  — координата вдоль шага решетки, мм;  $b$  — хорда лопатки, мм) на расстоянии  $0,1b$  от выходной кромки.

Из представленных распределений хорошо видно, что капельный след занимает большую часть шага и его ширина практически не зависит от наличия вдува. Распределение имеет двухпиковую структуру. Заметно, что уже при вдуве пара с минимальным значением температуры перед камерой вдува коэффициенты скольжения в следе заметно возрастают, особенно со стороны спинки профиля ( $\bar{x} = 0,1 \dots 0,7$ ). Это происходит по двум причинам:

- из-за дробления жидкой пленки, образовавшейся на вогнутой поверхности лопатки;
- вследствие обогрева поверхности лопатки и, соответственно, испарения пленки.

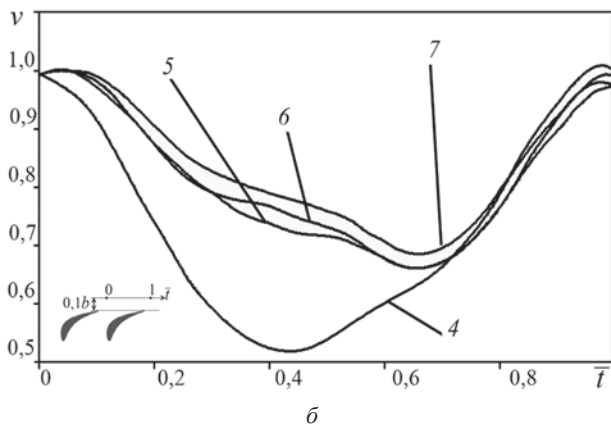
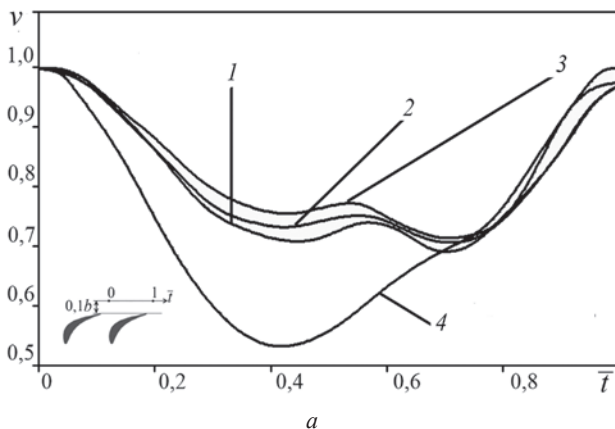


Рис. 4. Распределение коэффициентов скольжения по шагу за фронтом решетки при  $M_{лр} = 0,7$ ;  $y_0 = 1$  (а); 4 % (б);  $\Delta T_{п.к} = 5$  К (1); 31 (2); 74 (3); 6 (5); 35 (6); 73 К (7);  $\epsilon_{вд} = 1$  (4)

Рассмотрим режим при тех же основных начальных параметрах, но при значении влажности  $y_0 = 4$  % (см. рис. 4, б). Отчетливо видно, что структура капельного следа меняется. При включении вдува капельный поток перераспределяется и минимум коэффициентов скольжения смещается в сторону увеличения относительной координаты. Кроме того, двухпиковая структура капельного следа при  $y_0 = 4$  % практически исчезает. Однако тенденция остается та же, при увеличении температуры вдуваемого пара скорость капель в следе увеличивается, что происходит вследствие дробления пленки, сходящей с вогнутой поверхности, и испарения ее преимущественно с выпуклой поверхности профиля.

Для наглядности изменения коэффициента скольжения в качестве примера на рис. 5 приведено распределение скоростей капель и пара с вдувом греющего пара и без него. Как видно из данного распределения, существенные изменения происходят именно с частицами жидкой фазы вследствие воздействия на них греющего пара.

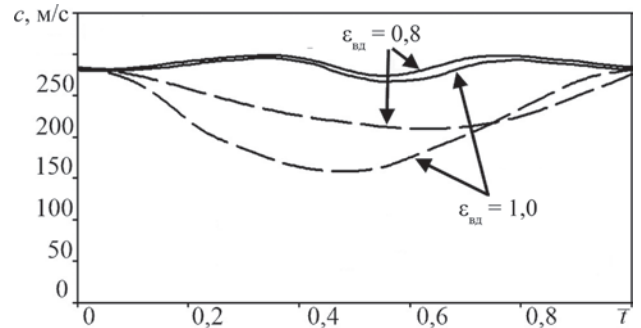


Рис. 5. Распределение скоростей пара и капель жидкости по шагу решетки при  $M_{лр} = 0,7$ ;  $y_0 = 0,1$ :

---- — пар; — — капли

С увеличением температуры пара, подаваемого в камеру вдува, наблюдается рост коэффициентов скольжения в следе. Данные результаты могут свидетельствовать о том, что влага, попадая на поверхность лопатки, частично испаряется. Стоит отметить, что при уменьшении толщины пленки жидкости на поверхности также уменьшается количество крупнодисперсной влаги, образующейся вследствие срыва капель с волн на поверхности пленки [2]. На выпуклой части профиля исследуемой решетки оседает в основном отраженная влага и, следовательно, расход в образовавшейся там пленке небольшой. С ростом температуры вдуваемого пара перед камерой происходит последовательное увеличение значений коэффициентов скольжения в области  $\bar{x} = 0,1 \dots 0,7$ .

**Влияние температуры вдува греющего пара на область распространения крупных капель за решеткой**

Данные о распределении коэффициентов скольжения за сопловой решеткой могут нести качественную информацию о присутствии в потоке крупнодиспер-

ных капель. Ввиду их инертности коэффициенты скольжения подобных частиц жидкой фазы должны быть значительно меньше 0,8 [1].

Для выявления областей присутствия только крупных капель за исследуемой решеткой полученные с помощью метода PIV мгновенные векторные поля были отфильтрованы по величине коэффициента скольжения, то есть был произведен отсев: искали те частицы жидкой фазы, коэффициент скольжения которых не превышал 0,6. Таким образом, получены векторные поля скоростей, характеризующие только крупнодисперсную влагу за решеткой.

На основе этих данных были выявлены области присутствия крупных частиц жидкой фазы за исследуемой решеткой при различных значениях температуры вдуваемого пара (рис. 6).

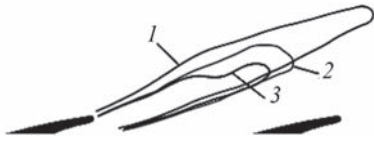


Рис. 6. Области обнаружения крупных капель при  $M_{lr} = 0,7$ ;  $y_0 = 4\%$ :  
 1 — без вдува; 2 —  $\epsilon_{вд} = 0,8$ ,  $\Delta T_{п.к} = 6\text{ К}$ ; 3 —  $\epsilon_{вд} = 0,8$ ,  $\Delta T_{п.к} = 73\text{ К}$

Из данных на рис. 6 видно, что при включении вдува пара область, в которой присутствуют крупные капли, сокращается со стороны выпуклой поверхности лопатки, где пленка практически полностью испаряется, так как ее толщина там наименьшая [9]. Происходит небольшое смещение области крупных капель в сторону ядра потока, что объясняется воздействием вдуваемого пара на влагу, срывающуюся с вогнутой стороны профиля.

**Влияние температуры вдува греющего пара на направление движения частиц жидкой фазы за решеткой**

Немаловажным фактором, определяющим процесс эрозионного износа рабочих лопаток последних ступеней турбомашин, является угол натекания частиц жидкой фазы на входные кромки. При этом мелкодисперсные капли движутся преимущественно по линиям тока основного потока, более крупные начинают двигаться с угловым рассогласованием  $\Delta\alpha$ , определяемым по формуле

$$\Delta\alpha = \alpha_k - \alpha_n,$$

где  $\alpha_n$ ,  $\alpha_k$  — углы выхода паровой фазы и капель жидкости.

Таким образом, распределение рассогласования углов может служить косвенным критерием определения эффективности применяемого метода борьбы с эрозионно-опасной влагой. На рис. 7 представлена зависимость для одного из исследуемых режимов

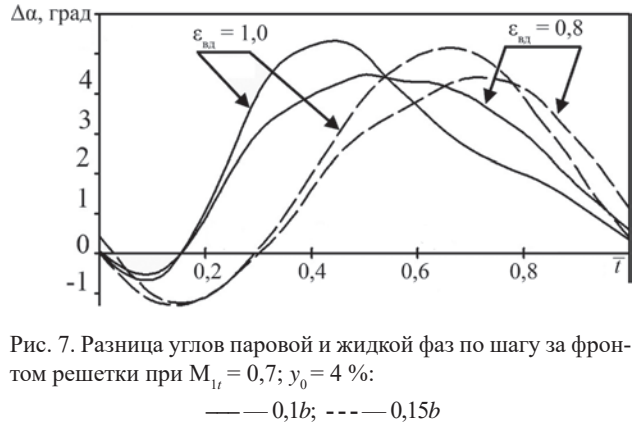


Рис. 7. Разница углов паровой и жидкой фаз по шагу за фронтом решетки при  $M_{lr} = 0,7$ ;  $y_0 = 4\%$ :  
 — 0,1b; --- 0,15b

( $M_{lr} = 0,7$ ;  $y_0 = 4\%$ ), полученная на расстоянии 0,1b за фронтом решетки.

Максимум рассогласования углов находится в области кромочного следа, так как самые крупные капли, а также их максимальная концентрация, формируются за выходной кромкой, при сходе и дроблении водяной пленки с поверхности лопатки. При включенном вдуве ( $\epsilon_{вд} = 0,8$ ) со стороны спинки профиля, а также в центре парокapельного следа разница углов уменьшается, так как большая часть или вся пленка на выпуклой поверхности профиля испаряется, в то время как со стороны вогнутой поверхности углы выхода капель увеличиваются. Это связано с перестройкой структуры потока в месте организации вдува и разрушения пленки вдуваемым паром. Там же представлены аналогичные распределения, полученные на расстоянии 0,15b.

Как видно, величина рассогласования со стороны вогнутой поверхности  $\bar{x} = 0,8 \dots 1$  снижается, а в центре следа  $\bar{x} = 0,3 \dots 0,8$  остается такой же, как на расстоянии 0,1b. Представленные результаты и анализ распределений коэффициента скольжения позволяют говорить о том что вследствие воздействия вдува размеры капель за выходной кромкой уменьшаются.

На рис. 8 представлена гистограмма, на которой показаны результаты оценки диаметров капель за выходной кромкой исследуемой лопатки.

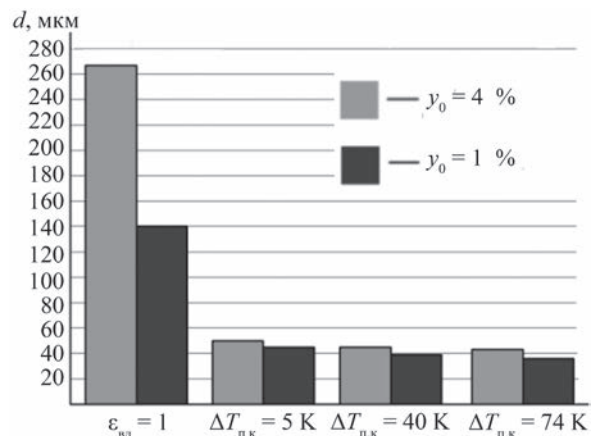


Рис. 8. Средние диаметры капель за выходной кромкой в зависимости от температуры вдуваемого пара при  $M_{lr} = 0,7$

Указанные распределения получены только для крупных капель путем отсева осредненного поля скоростей по минимальной величине коэффициента скольжения  $v$ . Как видно из представленных распределений, средний диаметр капель при отключенном вдуве греющего пара ( $\epsilon_{\text{вд}} = 1$ ) зависит от величины начальной влажности перед решеткой. При включении вдува пара средние диаметры крупных капель существенно уменьшаются. При дальнейшем увеличении значения перегрева пара перед камерой вдува диаметры крупных капель практически не меняются. Стоит отметить, что расположение щели на вогнутой поверхности вблизи выходной кромки препятствует повторному образованию водяной пленки.

### Выводы

Применение вдува пара приводит к увеличению значений коэффициента скольжения в кромочном следе лопатки, что может свидетельствовать об уменьшении диаметров крупных капель. Увеличение температуры вдуваемого пара приводит к незначительному последовательному росту коэффициента скольжения.

Вдув пара оказывает существенное воздействие на скоростные характеристики жидкой фазы; влияние на скоростные характеристики паровой фазы незначительно.

Применение вдува пара с минимальным значением перегрева приводит к существенному уменьшению области присутствия крупных капель за решеткой. Дальнейшее увеличение температуры вдуваемого пара приводит к незначительному уменьшению данной области.

Анализ распределений углового рассогласования фаз показал, что при включении вдува пара ширина капельного следа увеличивается, однако значение  $\Delta\alpha$  в области парокapельного следа уменьшается.

Вдув пара существенно воздействует на средние диаметры крупных капель за выходной кромкой. Увеличение значения перегрева вдуваемого пара практически не сказывается на размерах капель за выходной кромкой лопатки.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15 – 08 – 03592)

### Литература

1. Филиппов Г.А., Коробков В.В. Влияние эрозии лопаток на величину предельной влажности за последней ступенью // Теплоэнергетика. 1973. № 12. С. 14—18.
2. Филиппов Г.А., Поваров О.А. Сепарация влаги в турбинах АЭС. М.: Энергия, 1980.
3. Филиппов Г.А. и др. Влияние влажности на экономичность паровых турбин // Изв. РАН. Серия «Энергетика». 2012. №6. С. 96—107.
4. Khomyakov S.V. e. a. An experimental study of influence of the steam injection on the profile surface on

the turbine nozzle cascade performance // Proc. ASME Turbo Expo 2014: Turbine Tech. Conf. and Exposition GT2014. Dusseldorf, 2014.

5. Khomyakov S.V. e. a. Experimental studies of liquid film suction from turbine stator blade surface in wet steam flow // Proc. 11th European Conf. on Turbomachinery — Fluid Dynamics and Thermodynamics. 2015. P. ETC2015-071.

6. Хомяков С.В. и др. Влияние вдува пара на характеристики сопловой решетки, работающей в условиях влажно-парового потока // Теплоэнергетика. 2016. № 4. С. 3—8.

7. Гаврилов И.Ю. и др. Методика бесконтактного определения средних размеров эрозионно-опасных капель в полидисперсном влажно-паровом потоке // Теплоэнергетика. 2014. № 8. С. 39—46.

8. Тищенко В.А. Разработка и реализация методики определения параметров жидкой фазы влажнопарового потока в элементах проточных частей турбомашин: дис. ... канд. техн. наук. М., 2014.

9. Дейч М.Е. и др. Структура и характеристики пленочных течений турбин // Изв. АН СССР. Серия «Энергетика и транспорт». 1991. № 2. С. 110—122.

### References

1. Filippov G.A., Korobkov V.V. Vliyanie Eroзии Lopatok na Velichinu Predel'noy Vlazhnosti za Posledney Stupen'yu. Teploenergetika. 1973;12:14—18. (in Russian).
2. Filippov G.A., Povarov O.A. Separatsiya Vlagi v Turbinakh AES. M.: Energiya, 1980. (in Russian).
3. Filippov G.A. i dr. Vliyanie Vlazhnosti na Ekonomichnost' Parovykh Turbin. Izv. RAN. Seriya «Energetika». 2012;6:96—107. (in Russian).
4. Khomyakov S.V. e. a. An Experimentl StUdy of Influence of the Steam Injection on the Profile Surface on the Turbine Nozzle Cascade Performance. Proc. ASME Turbo Expo 2014: Turbine Tech. Conf. and Exposition GT2014. Dusseldorf, 2014.
5. Khomyakov S.V. e. a. Experimental studies of Liquid Film Suction from Turbine Stator Blade Surface in Wet Steam Flow. Proc. 11<sup>th</sup> European Conf. on Turbomachinery — Fluid Dynamics and Thermodynamics. 2015. R. ETC2015-071.
6. Homyakov S.V. i dr. Vliyanie Vduva Para na Kharakteristiki Soplovoy Reshetki, Rabotayushchey v Usloviyakh Vlazhno-Parovogo Potoka. Teploenergetika. 2016;4:3—8. (in Russian).
7. Gavrilov I.Yu. i dr. Metodika Beskontaktnogo Opredeleniya Srednikh Razmerov Erozionno-Opasnykh Kapel' v Polidispersnom Vlazhno-Parovom Potoke. Teploenergetika. 2014;8:39—46. (in Russian).
8. Tishchenko V.A. Razrabotka i Realizatsiya Metodiki Opredeleniya Parametrov Zhidkoy Fazy Vlazhnoparovogo Potoka v Elementakh Protochnykh Chastey Turbomashin: Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. M., 2014. (in Russian).

9. Deych M.E. i dr. Struktura i Kharakteristiki Plyonochnykh Teheniy Turbin // Izv. An Sssr. Seriya «Energetika i Transport». 1991;2:110—122. (in Russian).

#### Сведения об авторах

**Грибин Владимир Георгиевич** — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой паровых и газовых турбин им. А.В. Щегляева НИУ «МЭИ», e-mail: GribinVG@mpei.ru

**Тищенко Александр Антонович** — кандидат технических наук, доцент кафедры паровых и газовых турбин им. А.В. Щегляева НИУ «МЭИ», e-mail: TishchenkoAA@mpei.ru

**Гаврилов Илья Юрьевич** — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры паровых и газовых турбин им. А.В. Щегляева НИУ «МЭИ», e-mail: GavrilovIY@mpei.ru

**Попов Виталий Владимирович** — младший научный сотрудник, аспирант кафедры паровых и газовых турбин им. А.В. Щегляева НИУ «МЭИ», e-mail: PopovVitV@mpei.ru

**Сорокин Иван Юрьевич** — младший научный сотрудник, аспирант кафедры паровых и газовых турбин им. А.В. Щегляева НИУ «МЭИ», e-mail: SorokinIY@mpei.ru

**Тищенко Виктор Александрович** — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры паровых и газовых турбин им. А.В. Щегляева НИУ «МЭИ», e-mail: TishchenkoVA@mpei.ru

**Хомяков Сергей Викторович** — младший научный сотрудник, ассистент кафедры паровых и газовых турбин им. А.В. Щегляева НИУ «МЭИ», e-mail: KhomyakovSV@mpei.ru

**Алексеев Роман Андреевич** — инженер, аспирант кафедры паровых и газовых турбин им. А.В. Щегляева НИУ «МЭИ», e-mail: AlexeevRA@mpei.ru

#### Information about authors

**Gribin Vladimir G.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor, Head of Steam and Gas Turbines Dept., NRU MPEI, e-mail: GribinVG@mpei.ru

**Tishchenko Aleksandr A.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Steam and Gas Turbines Dept., NRU MPEI, e-mail: TishchenkoAA@mpei.ru

**Gavrilov Ilya Yu.** — Ph.D. (Techn.), Senior Lecturer of Steam and Gas Turbines Dept., NRU MPEI, e-mail: GavrilovIY@mpei.ru

**Popov Vitaliy V.** — Junior Researcher, Ph.D.-student of Steam and Gas Turbines Dept., NRU MPEI, e-mail: PopovVitV@mpei.ru

**Sorokin Ivan Yu.** — Junior Researcher, Ph.D.-student of Steam and Gas Turbines Dept., NRU MPEI, e-mail: SorokinIY@mpei.ru

**Tishchenko Viktor A.** — Ph.D. (Techn.), Senior Lecturer of Steam and Gas Turbines Dept., NRU MPEI, e-mail: TishchenkoVA@mpei.ru

**Khomyakov Sergey V.** — Junior Researcher, Assistant of Steam and Gas Turbines Dept., NRU MPEI, e-mail: KhomyakovSV@mpei.ru

**Alekseev Roman A.** — Engineer, Ph.D.-student of Steam and Gas Turbines Dept., NRU MPEI, e-mail: AlexeevRA@mpei.ru

*Статья поступила в редакцию 28.10.2016*