

В. Н. Голощапов, канд. техн. наук, О. В. Котульская, инж., Ю. О. Бахмутская, аспирант (Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков, Украина)

Методологический подход к определению коэффициентов теплоотдачи во впадинах уплотнений ступенчатого типа

На основании сопоставления, обработки результатов эксперимента и расчета методом математического моделирования разработан методологический подход к определению коэффициентов теплоотдачи (КТО) во впадинах ступенчатых уплотнений. Проведенный анализ формирования КТО в угловой области при натекании полуограниченной струи позволяет построить методику определения граничных условий в зоне наиболее напряженных мест ротора – в зоне уплотнений ступенчатого типа.

Ключевые слова: коэффициент теплоотдачи, полуограниченная струя, ступенчатое уплотнение, математическое моделирование.

На основі зіставлення, обробки результатів експерименту і розрахунку методом математичного моделювання розроблено методологічний підхід щодо визначення коефіцієнтів тепловіддачі (КТВ) в западинах ступеневих ущільнень. Проведений аналіз формування КТВ в кутовій області при натіканні напівобмеженого струменя дозволяє побудувати методику визначення граничних умов в зоні найбільш напружених місць ротора – в зоні ущільнень ступеневого типу.

Ключові слова: коефіцієнт тепловіддачі, напівобмежений струмінь, ступеневе ущільнення, математичне моделювання.

Based on the comparison, the processing of the experimental results and the calculation of mathematical modeling, developed a methodological approach to the determination of heat transfer coefficients in the valleys stepped seals. The analysis of the formation of the heat transfer coefficient in the angular region at inleakage semibounded jet allows to build method for determining the boundary conditions in the area of the most intense places the rotor – in the area of seals step type

Keywords: heat transfer coefficients, semibounded jet, seals step type, mathematical modeling.

Актуальность темы

В концевых и диафрагменных уплотнениях мощных паровых турбин в настоящее время наиболее широко применяются уплотнения ступенчатого типа, в которых радиальный зазор формируется для впадины длинным гребнем, для выступа – коротким. Гребни установлены с определенным шагом в неподвижном корпусе уплотнения (рис. 1).

В процессе длительной эксплуатации на поверхности цельнокотанных роторов в зоне концевых уплотнений паровых турбин, омываемых паром, появляются трещины. Причина их появления – термическая усталость материала, которая появляется в тех местах, где температура пара существенно изменяется и достигает максимальных значений. Обычно на поверхностях роторов в этих местах имеются резкие угловые переходы, галтели и подобные конструктивные элементы. Как правило,

это область дисков первой ступени в цилиндрах высокого (ЦВД) и среднего (ЦСД) давлений, зона уплотнений первой диафрагмы или ближайшего отсека концевого уплотнения [1]. Чаще всего трещины возникают в термокомпенсационных канавках при переходе от впадины к выступу, поскольку там имеется прямой угол, в котором концентрация напряжения значительна. В настоящее время уровень температурных напряжений в роторах ЦВД и ЦСД является одним из главных факторов, ограничивающих время пусков и набора мощности турбиной [2].

Постановка задачи исследований

Для определения напряженно-деформированного состояния ротора в зоне концевых уплотнений необходимо знать коэффициенты теплоотдачи (КТО) на их поверхностях, корректное задание которых существенно влияет на определе-

ние уровня термических напряжений и дальнейшую оценку ресурса ротора. На основе анализа структуры течения в уплотнениях ступенчатого типа турбины К-325-23,5 рассмотрим распределение КТО на поверхностях элементов переднего концевого уплотнения ротора ЦВД, конструкция которого приведена на рис. 2 [3].

Переднее концевое уплотнение (ПКУ) со стороны генератора состоит из 16 колец, установленных в пазы обойм, которые в свою

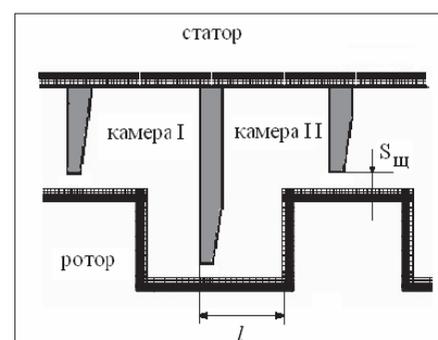


Рис. 1. Элемент ступенчатого уплотнения

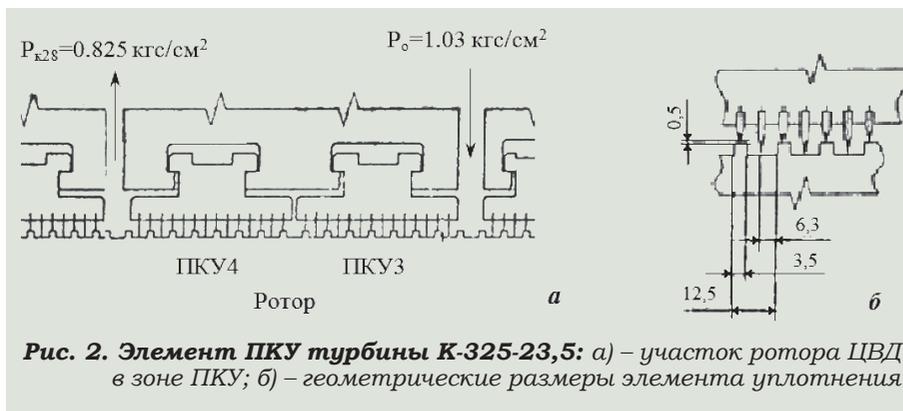


Рис. 2. Элемент ПКУ турбины К-325-23,5: а) – участок ротора ЦВД в зоне ПКУ; б) – геометрические размеры элемента уплотнения

очередь помещаются в росточки внутреннего и внешнего корпуса. Элемент ПКУ можно представить как «выступ – впадина – выступ» (рис. 1). В каждом кольце уплотнения выполнено по 14 гребней, которые создают кольцевой зазор над выступами и впадинами вращающегося ротора.

В узкой кольцевой щели поток ускоряется, формируя струю, скорость которой в камере за щелью практически уменьшается до нуля. При этом кинетическая энергия струи гасится и переходит в тепловую, а энтальпия потока восстанавливается до начального уровня при более низком давлении. В следующих щелях и камерах между гребнями процесс повторяется, а давление, по мере прохождения потока через камеры уплотнения, последовательно понижается, то есть формируется процесс дросселирования пара.

В монографии [4] для номинального режима работы турбины К-325-23,5 приведена структура потока в элементе ступенчатого уплотнения (рис. 3), полученная методом математического моделирования. При истечении пара из узкой щели между кольцевой поверхностью вращающегося ротора в камере II формируется струйное течение, сопровождающееся вихрем. Это приводит к неравномерному распределению КТО на поверхностях элементов ротора, формирующих камеру. В камере I при истечении струи из щели происходит ее натекание на поверхность длинного гребня и формируются два вихря – один во впадине, а второй – в верхней части камеры вблизи поверхности корпуса.

Для определения КТО на поверхностях впадины уплотнения геоме-

трическая модель ротора представлена в виде развернутых в плоскость поверхностей «выступ-впадина-выступ», а течение пара рассмотрено как течение вдоль плоской поверхности (рис. 4). При этом принимается, что влияние областей торможения в углах на значения средних КТО может быть учтено, исходя из анализа структуры течения. Скорость внешнего потока в этих областях принимается как среднее значение на каждом участке по отношению

новке и в ступенчатом уплотнении позволяет сформулировать задачу определения КТО для однофазной среды на поверхностях элементов уплотнения.

Механизм формирования коэффициента теплоотдачи в зоне уплотнений ступенчатого типа

Условия натекания и последующего движения рабочей среды вдоль поверхности № 1 и 2 в эксперимен-

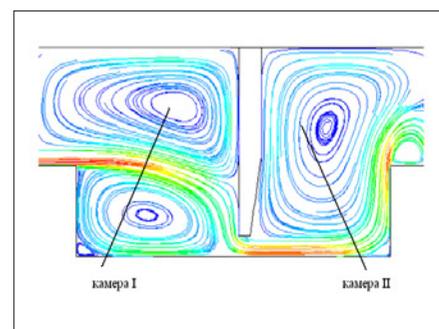


Рис. 3 Структура течения пара в элементе ПКУ турбины К-325-23,5

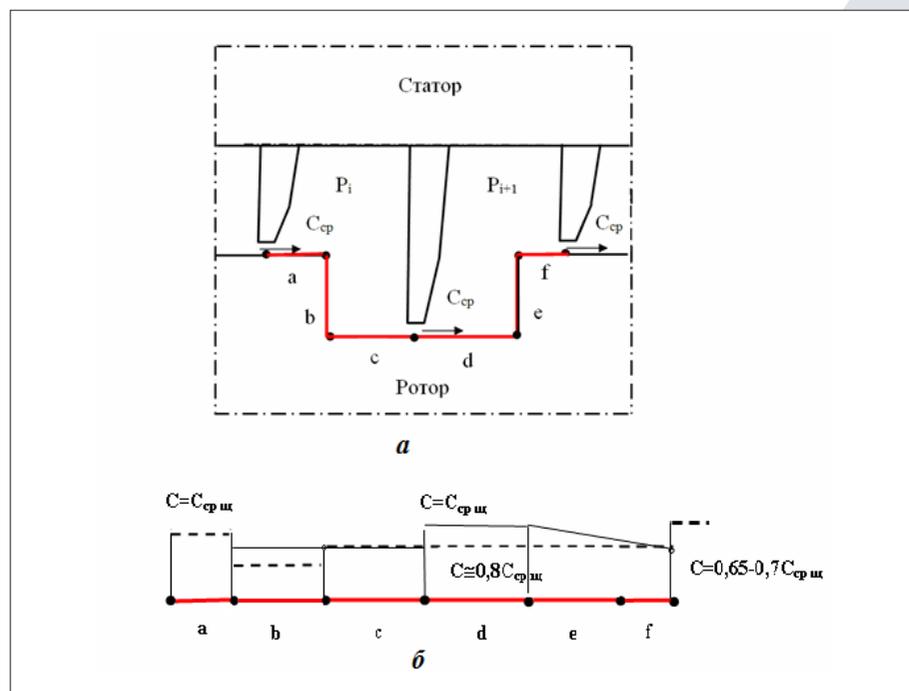


Рис. 4. Обозначение поверхностей (а) и распределение скоростей пара вдоль поверхностей элементов ротора в зоне уплотнений (б)

к значению скорости на границе струи и вихря.

Аналогичная структура течения пара в элементе ПКУ наблюдается и в экспериментальной модели установки для исследования газодинамики струйных течений (рис. 5) [5]. Подобие структуры течения в уста-

точной установке (рис. 5, б) подобны течению на поверхностях d и e уплотнения (рис. 4). Учитывая, что наиболее напряженными местами ротора в области уплотнений являются угловые точки впадин, целесообразно рассмотреть формирование КТО на этих поверхностях.

Анализ течения рабочего тела в камерах уплотнения I и II (рис. 3) показал, что движения потока в камере I можно рассматривать как натекание плоской струи на нормально расположенную к ней стенку с последующим растеканием вдоль поверхности гребня. Теплообмен на поверхности гребня сопровождается формированием теплового потока, направленного в обойму и не оказывает влияния на формирование опасных напряжений.

Движение полуограниченной струи, вытекающей из щели, сформированной длинным гребнем и поверхностью впадин, требует более детального исследования. В качестве характеристик полуограниченной струи при её движении по поверхности дна впадины можно принять максимальную скорость истечения рабочего тела из щели U_{\max} , высоту щели $S_{щ}$ и длину струи

до перпендикулярно расположенной преграды l .

Однако, с учетом ограниченной высоты щели, составляющей для паровых турбин в начале эксплуатации 0,5–1,0 мм и при износе гребней в период между ремонтами – 1,5–2,0 мм, более рационально использовать среднерасходную скорость на срезе щели:

$$U_{\text{ср}} = \frac{G \cdot V}{f_{\text{щ}}},$$

где G – массовый расход пара через сегмент уплотнения; V – удельный объем рабочей среды в камере II; $f_{\text{щ}} = \pi \cdot d_{\text{щ}} \cdot S_{\text{щ}}$ – площадь щели между гребнем и цилиндрической поверхностью впадины; $d_{\text{щ}}$ – диаметр щели между гребнем и цилиндрической поверхностью.

При этом можно принять, что $U_{\text{ср}} \approx U_{\max}$, т. е. среднерасходная скорость примерно равна максимальной в ядре потока.

На рис. 6 приведено распределение относительной скорости струи, полученное экспериментально, при её натекании на нормально расположенную к её оси поверхность (импактная струя). Струя вытекает из плоской щели и движется вдоль поверхности d (рис. 4, а). При моделировании учтено, что поток на входе в щель имеет некоторый угол наклона по отношению к поверхности c , что создает вихреобразный отрыв на стороне щели, противоположной поверхности d . При $\bar{x} = x/S_{\text{щ}} \approx 0$ этот отрыв при $\bar{y} = y/S_{\text{щ}} < 0,25$ характеризуется значениями $\bar{U} = U/U_0 < 0$. Из рисунка следует, что ядро потока сокращается по ширине струи до $\bar{y} = 3,0$ и затем трансформируется в области торможения и разворота струи (области влияния преграды вперед по потоку при $\bar{y} = 6,0$).

По мере движения струи, область влияния вихревой зоны расширяется по мере удаления сечения от среза щели, образуя изменение скорости от нулевой до максимальной при больших значениях y . Одновременно, наличие вихря в камере дополнительно турбулизирует натекающую струю, что влияет на уровень теплообмена на поверхности, противостоящей струе.

Следует учесть, что наличие вихря в камере существенно влияет на формирование пограничного слоя на поверхности после поворота струи, и, как следствие, на течение струи вдоль нее, а также на теплообмен на этой поверхности.

Измерение скорости потока вблизи стенки [5] позволило определить толщину пограничного слоя (ПС), принятую по точке перегиба профиля скорости в разных сечениях траверсирования потока. Начало координат привязано к угловой точке ограничивающих стенок (рис. 5 б).

Развитие пограничного слоя (рис. 7) позволяет выделить три области течения струи:

- при $0 < \bar{y} < 4,40$ – область торможения струи при её расширении до стенки; в этой области наблюдается минимальный темп увеличения толщины пограничного слоя δ ;

- при $4,4 < \bar{y} < 7,34$ – происходит интенсивное увеличение

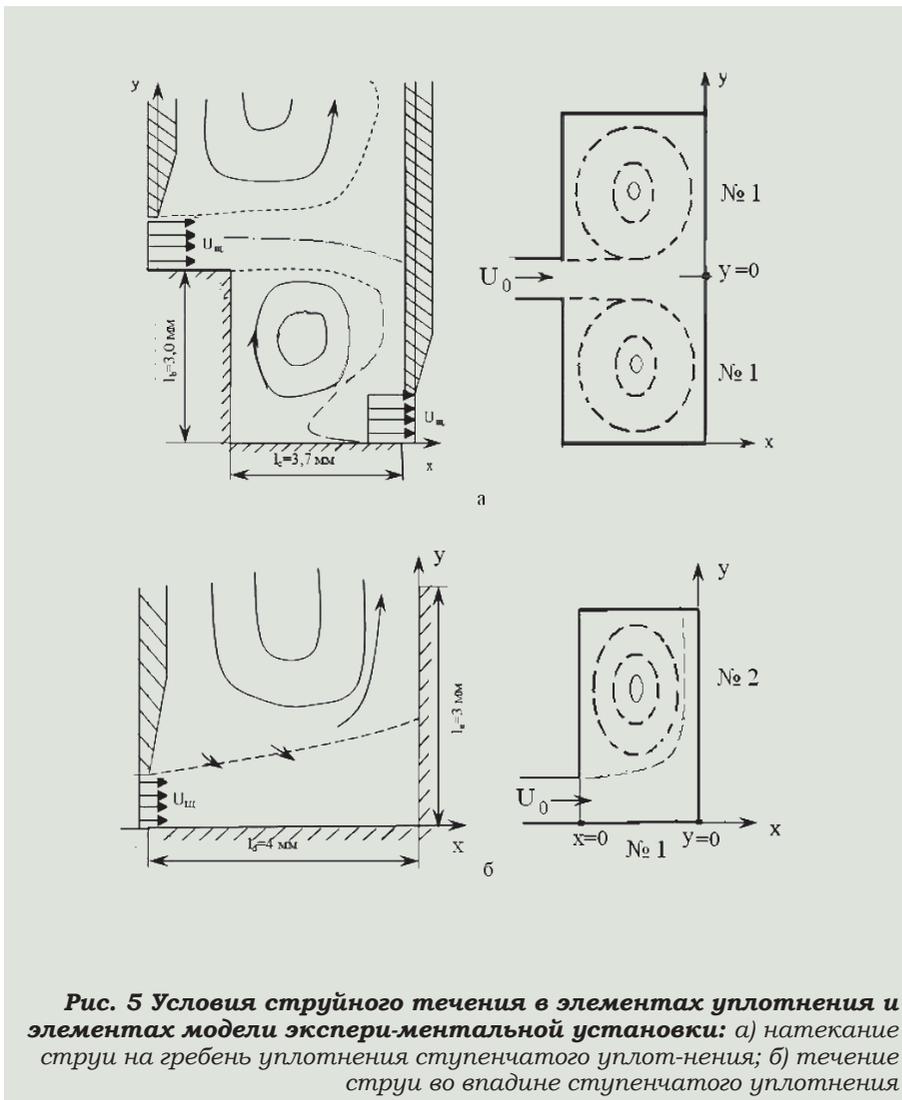


Рис. 5 Условия струйного течения в элементах уплотнения и элементах модели экспериментальной установки: а) натекание струи на гребень уплотнения ступенчатого уплотнения; б) течение струи во впадине ступенчатого уплотнения

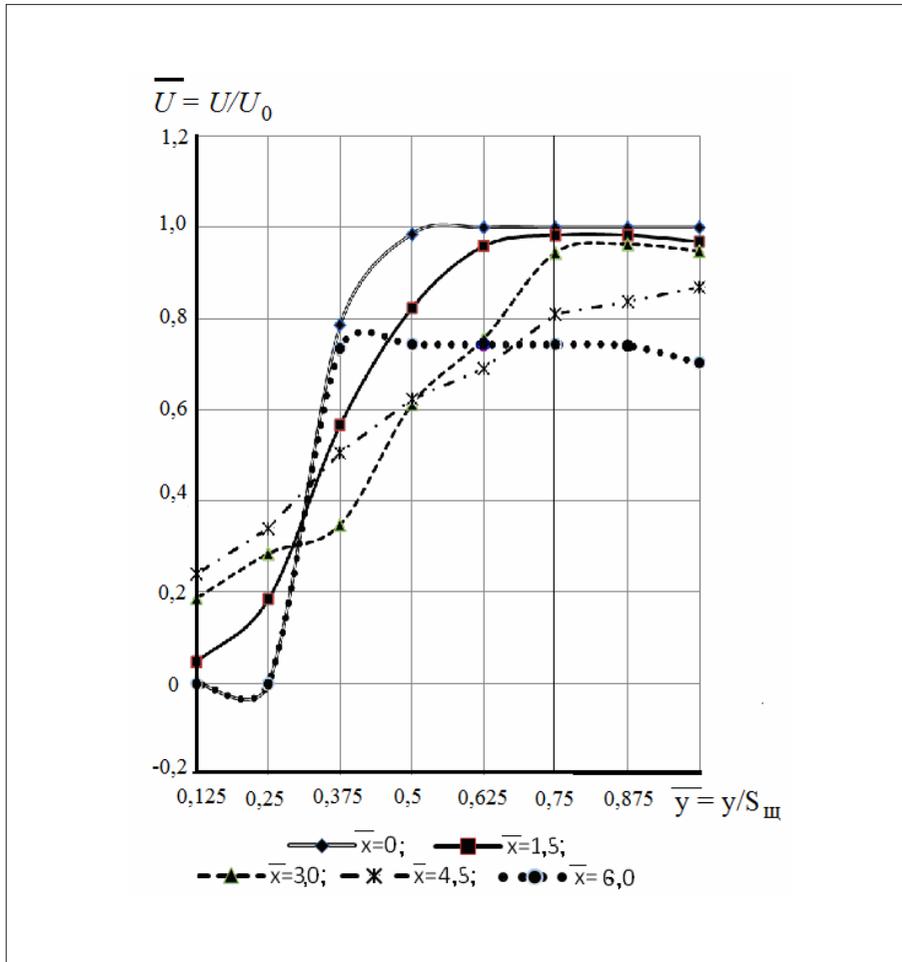


Рис. 6. Изменение скорости вдоль поверхности №1 при натекании полуограниченной струи на преграду

толщины ПС, сопровождающееся, по-видимому, поворотом вихревой структуры;

– при $\bar{y} > 7,34$ – темп увеличения толщины ПС замедляется, что соответствует установившемуся течению вдоль поверхности.

Такой характер изменения толщины пограничного слоя оказал влияние на распределение КТО на поверхности, воспринимающей натекающую струю (рис. 8).

В области торможения струи ($0 < \bar{y} < 3,7$) наблюдается наиболее высокое значение КТО (в представленном для иллюстрации опыте [5] скорость струи на выходе из щели $U_0 = 120$ м/с, абсолютное давление на входе в щель равно 120 кПа, температура рабочего тела (воздуха) составляет 35 °С), несмотря на то, что скорость рабочего тела в ней снижается до нулевой. В точке поворота струи скорость соответствует нулевой, постоянно увеличиваясь в направлении координаты y . В соответствии с теорией

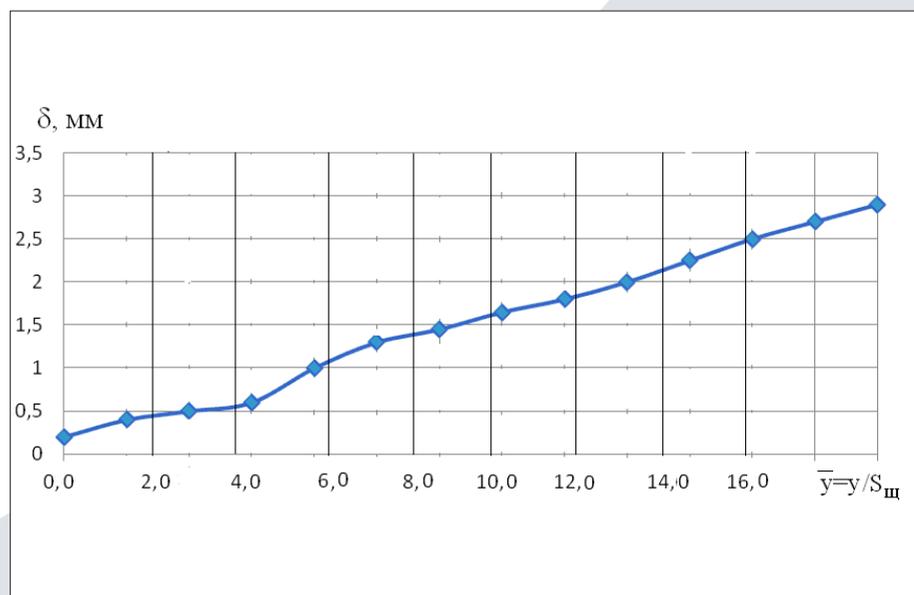


Рис. 7. Изменение толщины пограничного слоя на поверхности, перпендикулярной натекающей полуограниченной струе

формирования пограничного слоя на плоской пластине, уровень КТО в этой области, определяемый термическим сопротивлением ПС при принятой конструкции и достаточ-

но низкой скорости потока вблизи поверхности должен быть минимальным. Поэтому, механизм формирования КТО в угловой зоне при торможении струи существенно отличается от принятого для продольно обтекаемой потоком пластины. Анализ структуры течения показал, что увеличенный теплообмен в этой области может быть объяснен наличием мощных турбулентных пульсационных составляющих продольной скорости струи, которые сохраняются вплоть до соударения с поверхностью.

При этом продольная составляющая пульсационной скорости может быть определена:

$$U' = \varepsilon_{np} \cdot U_{zp},$$

где ε_{np} – степень турбулентности струи в продольном направлении, принятая на внешней границе области торможения; U_{zp} – скорость струи на внешней границе области торможения, определяемая согласно теории струйных течений [6].

Процесс формирования КТО в угловой области торможения струи (рис. 9) подробно рассмотрен в [7], где показана взаимосвязь максимального значения КТО с пульсационной составляющей

щель продольной скорости в виде $a_{max} = \kappa U'$ для конструкций различного типа.

Поэтому, исходя из поставленной задачи и принимая, что ме-

ханизм формирования КТО в угловой области впадины подобен изложенному в [7], целесообразно определить основные характерные параметры для течения полуограниченной струи во впадине ступенчатого уплотнения, расположенной на роторе в области ПКУ при течении однофазной среды.

Из теплового расчета уплотнения при заданном количестве гребней по известным зависимостям [8] устанавливается расход рабочего тела, давление в каждой камере уплотнения, а по условию постоянства энтальпии при дросселировании – удельный объем за каждым гребнем. Это позволяет

определить среднерасходные значения скорости струи U_0 на выходе из щели, сформированной каждым гребнем.

КТО при любом текущем значении координаты $\bar{y}_i = y_i / S_{щ}$ может быть представлен относительным значением $\bar{\alpha}_i = \alpha_i / \alpha_{max}$, где α_{max} определяется по уровню турбулентности струи через пульсационную составляющую скорости U' .

Зависимость $\bar{\alpha}(\bar{y}_i)$ на поверхности, перпендикулярной оси струи во впадине уплотнения, можно рассмотреть как изменение в двух областях:

– область влияния пульсационной составляющей скорости в диапазоне $0 < \bar{y} < \bar{y}_{гр}$;

– область течения полуограниченной струи вдоль прямой поверхности в диапазоне $\bar{y} > \bar{y}_{гр}$.

Выводы

Рассмотренная структура потока во впадинах ступенчатого уплотнения позволяет отметить, что уровень КТО в них существенно отличается от принятых представлений. Значение КТО в угловой точке определяется турбулентной составляющей полуограниченной струи, что может сказываться на уровне термонапряжений в зоне уплотнений ступенчатого типа.

Список литературы:

1. Ремонт паровых турбин / [В.Н. Родин, А.Г. Шаронов, Б.Е. Мурманский и др.]. – Екатеринбург: УГТУ, 2002. – 296 с.

2. Мисак Й. Пускові режими парових турбін енергоблоків ТЕС / Й. Мисак, В. Дворовенко, І. Гальянчук. – Львів: НВФ «Українські технології», 2008. – 176 с.

3. Створення парових турбін нового покоління потужністю 325 МВт / [В. Г. Суботін, С. В. Левченко, В. А. Швецов, О. А. Шубенко и др.]. – Харків: Фоліо, 2009. – 256 с.

4. Теплообмен в элементах конструкций паровых турбин / Ю.М. Мацевитый, С.В. Алехина, В.Н. Голощапов, О.В. Котульская; под общ. ред. акад. НАН Украины Ю. М. Мацевитого. – Харьков: НАН Украины, Институт проблем машиностроения, 2012. – 288 с.

5. Барсуков В. А. Исследование газодинамики и теплообмена в полостях турбомашин: дис. канд. техн. наук: 05.05.16 / В. А. Барсуков. – Харьков, 1980. – 154 с.

6. Абрамович Г.И. Теория турбулентных струй / Г.И. Абрамович. – М.: Физматгиз, 1960. – 715 с.

7. Оценка условий теплообмена в окрестности критической точки при натекании струи на преграду / Ю. М. Мацевитый, В. Н. Голощапов, В. А. Маляренко, В. А. Барсуков // Инженерно-физический журнал. – 1979. – XXX. – № 2. – С. 1158–1171.

8. Щегляев А. В. Паровые турбины / А. В. Щегляев. – М.: Энергия, 1976. – 386 с.

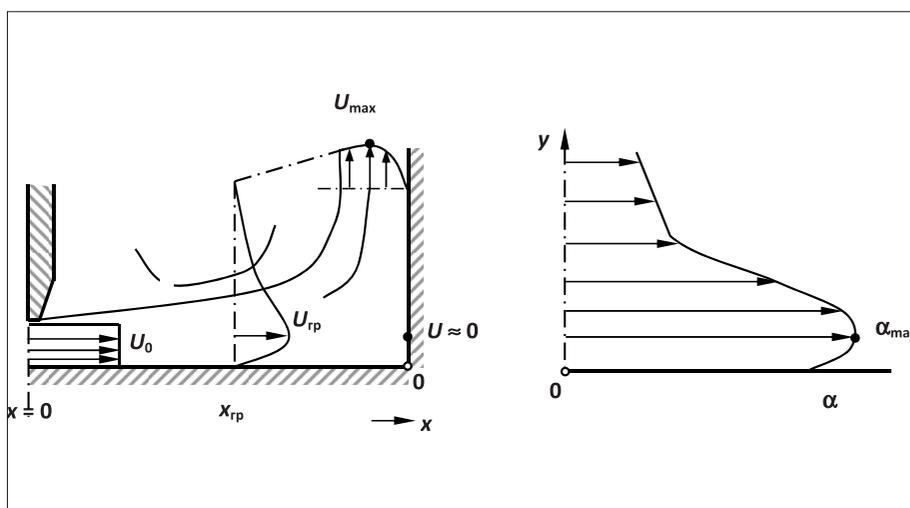


Рис. 9 Схема формирования коэффициент теплоотдачи в области торможения

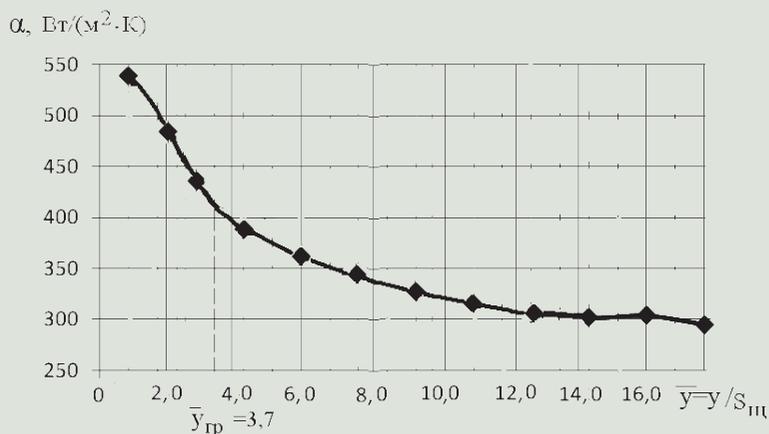


Рис. 8. Изменение коэффициента теплоотдачи на поверхности, перпендикулярной набегающей полуограниченной струи