

УДК 629.735

А.С. КОЛЯДЮК, Н.Г. ШУЛЬЖЕНКО, С.В. ЕРШОВ

*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков***ТЕЧЕНИЕ ПАРА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В СИСТЕМЕ ПАРОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТУРБИНЫ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ЕЕ РАБОТЫ**

Численно моделируются процессы течения пара и теплообмена в системе парораспределения паровой турбины для различных стационарных режимов. Определяются характеристики течения пара и распределение температуры в элементах системы парораспределения. Для решения совместной задачи газодинамики и теплообмена использовался программный комплекс ANSYS/CFX. Применяется модель турбулентности $k-\omega$ SST Менгера. Установлены основные особенности течения пара через сито и в камере, где оно установлено, а также области основных отрывов течения пара и определены граничные условия для решения задач прочности в зависимости от мощности турбины.

Ключевые слова: расчет, течение пара, система парораспределения, турбина.

Введение

Вопросы надежности регулирующих клапанов в системе парораспределения паровых турбин имеют важное практическое значение. Часто в процессе эксплуатации образуются трещины в корпусе клапана или заправляются отверстия фрагментов парового сита, выполняющего функции фильтра. Поэтому изучение условий работы данных элементов энергетического оборудования представляет значительный интерес.

Системой парораспределения паровой турбины регулируется или предотвращается подача пара в проточную часть. Ее конструкция состоит из трех отдельно работающих клапанов, выполненных в одном корпусе. Стопорный клапан (СК) выполняет функцию полного перекрытия подачи пара в турбину, регулирующими клапанами (РК1, РК3) регулируется подача пара. При этом РК1 и РК3 всегда открыты по разному. Перегретый пар подается в систему парораспределения под давлением 24МПа с температурой 540°C.

При математическом моделировании процессов течения пара важным является учет влияния парового сита. Оно представляет собой цилиндрическую обечайку с 3024 отверстиями.

В [1] впервые получено решение совместной задачи течения пара и теплообмена системы парораспределения паровой турбины на стационарном режиме, отвечающем мощности 300МВт. В ней не учитывалась возможность обратного течения на выходе из корпуса и его теплоизоляция.

В данной работе рассмотрено 4 режима работы системы парораспределения, отвечающие мощностям турбины 310, 220, 180 и 100МВт.

Рассматриваемая задача решалась с помощью программного комплекса ANSYS/CFX, позволяющего моделировать геометрические особенности проточной части системы парораспределения.

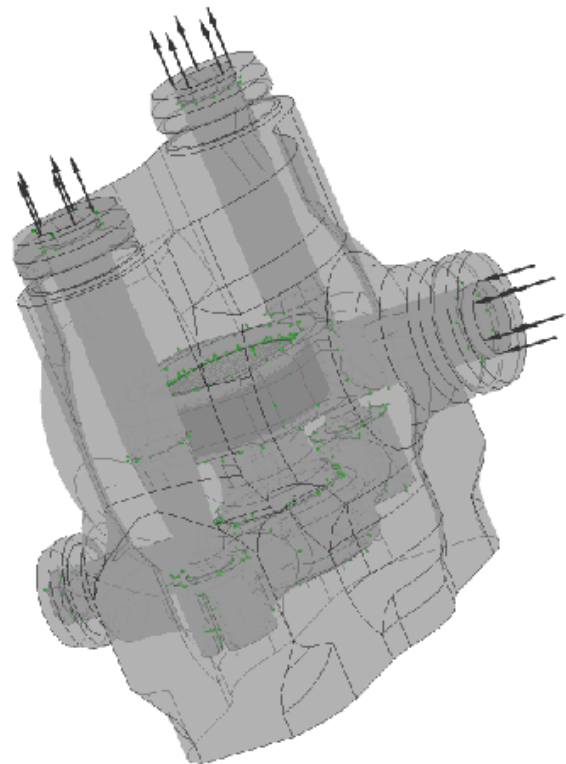


Рис. 1. Геометрическая модель системы парораспределения турбины

Постановка задачи и описание математической модели

Использовалась математическая модель потока пара, реализованная в программном комплексе AN-

SYS/CFX[2]. В ее основе лежат осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса для вязкого сжимаемого теплопроводного газа. Они представлены уравнениями неразрывности, изменения количества движения и сохранения энергии

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) &= 0; \\ \frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) &= -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right]; \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho h_{\text{tot}}) - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j h_{\text{tot}}) &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (U_i \tau_{ij}), \end{aligned}$$

где t – время;
 x_j – декартовы координаты;
 ρ – плотность;
 p – давление;
 U_i – компоненты скорости;
 T – температура;
 μ_{eff} – эффективная вязкость;
 $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$;
 μ , μ_t – коэффициенты динамической и турбулентной вязкости;
 p' – модифицированное давление;

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_{\text{eff}} \frac{\partial U_m}{\partial x_m};$$

k – кинетическая энергия турбулентности;
 h_{tot} – полная энтальпия;
 c_p – теплоемкость при постоянном давлении;
 τ – эффективные напряжения;
 λ – теплопроводность.

Для перегретого пара используется уравнение состояния Менделеева-Клапейрона.

Для статистического моделирования влияния турбулентности и описания турбулентного пограничного слоя на твердых поверхностях применяется (одна из используемых в ANSYS/CFX) полуэмпирическая модель $k-\omega$ SST Ментера [3, 4]. Данная модель, комбинируя достоинства классических моделей " $k-\varepsilon$ " и " $k-\omega$ ", обеспечивает достаточную точность результатов и эффективную сходимость итерационного процесса даже при относительно грубых сетках и умеренном разрешении пограничного слоя [5]. Система исходных уравнений модели имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k) &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \beta^* \rho k \omega + P_k; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \omega) &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1-F_1) \rho \times \\ &\times \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha_3 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_3 \rho \omega^2, \end{aligned}$$

где α_3 , β_3 , σ_{k3} , $\sigma_{\omega 2}$, $\sigma_{\omega 3}$ – коэффициенты;
 ω – удельная скорость диссипации;
 P_k – производство турбулентности.

Теплопередача в корпусе моделируется уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right).$$

Граничными условиями являлись расход и температура пара на входе в систему парораспределения и давление за РК1, РК3. На выходе учитывалась возможность обратных течений. Теплоизоляция клапана задана отдельным твердым телом по наружной поверхности корпуса.

Для решения совместной задачи на границе между паром и твердыми телами принимается равенство температур и тепловых потоков.

В комплексе ANSYS/CFX предусматривается моделирование пористого тела, что позволяет учесть сито в данной задаче. Применение модели пористого тела требует задание нелинейных свойств, зависящих от расхода пара. Это приводит к значительным погрешностям в распределении расхода пара через сито, и, как следствие, к неудовлетворительной точности решения задачи в целом. Поэтому в данной работе сито моделируется как обечайка с отверстиями, что позволило избежать этих погрешностей, но увеличило трудоемкость задачи.

Разностная сетка состояла из 33млн элементов и 9млн узлов с пятью ячейками в пограничном слое.

Анализ результатов

В результате расчетов получены линии тока пара в клапане, давление на стенки и температура корпуса. Задача сходилась после 500 итераций. Время счета составляло 120 часов на компьютере с процессором INTEL i7 при 24Гб оперативной памяти.

Установлено, что в задней части камеры парового сита образуются два вихря. На режиме 310МВт скорость прохождения пара по правой стороне камеры парового сита выше, чем слева на 15%. На следующих режимах появляется неравномерность потока пара на входе и с уменьшением мощности она увеличивается. Это связано с неодинаковым РК1 и РК3. За ситом поток выравнивается. С пони-

жением мощности этот перепад уменьшается. Вихри и увеличение скорости в узких местах камеры приводят к неравномерному прохождению пара через

сито и образованию зон течения с малой скоростью. На рис. 2 показаны значения скоростей пара в сечении Z.

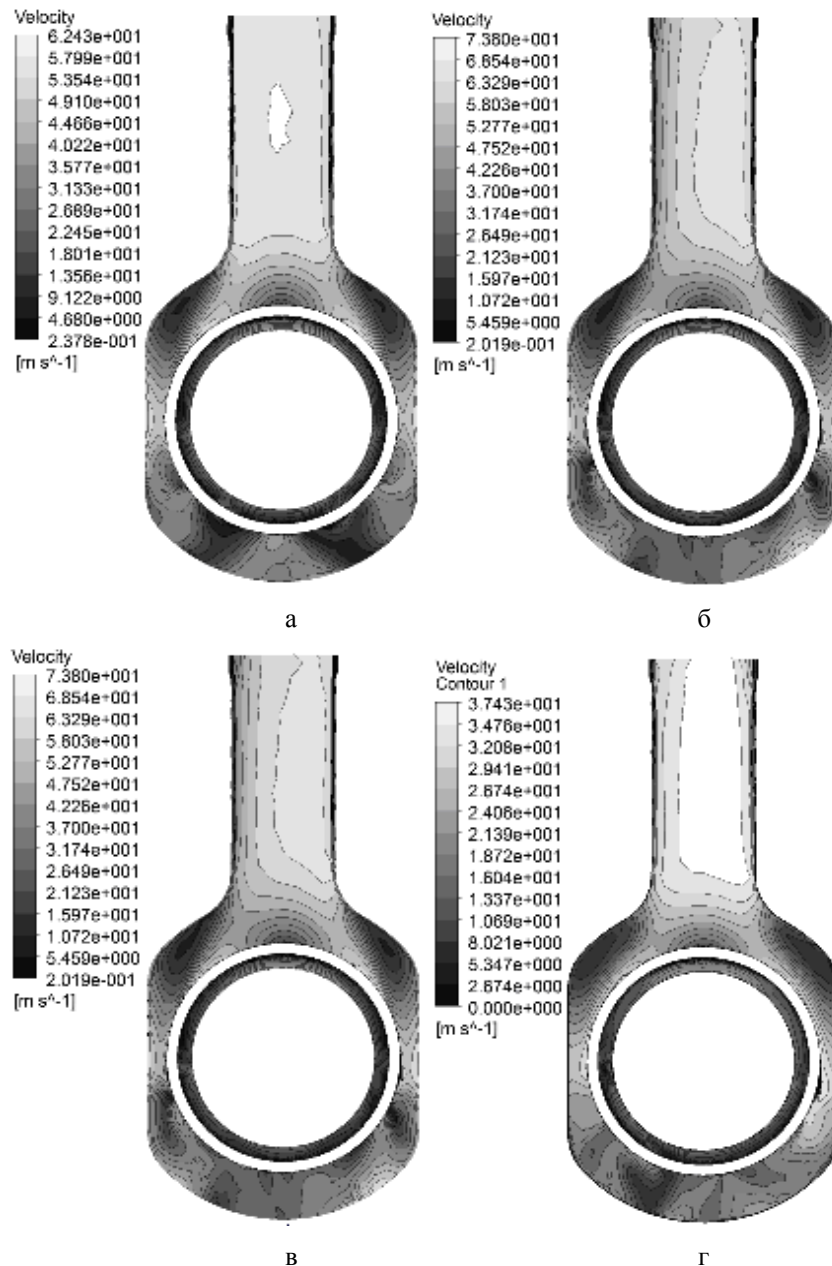


Рис. 2. Распределение скорости пара в сечении Z:
а – мощность турбины 310МВт; б – 220МВт; в – 180МВт; г – 100МВт

В сечении X (рис. 4) характер прохождения пара в клапане и через сито сохраняется на всех режимах. Перед ситом скорость падает, что связано с увеличением камеры парового сита. Через верхние отверстия сита расход пара выше на 50%, чем через нижние. Торможения пара перед ситом на режиме, отвечающему мощности 100МВт, приводит к перегреву корпуса и сита на 12°C выше, чем температура пара на входе (рис. 3).

В сечении Y (рис. 5) можно видеть особенности срыва течения пара за РК1, РК3. На больших мощно-

стях турбины срывы происходят за седлами РК и скорость пара выравнивается быстро, а при понижении мощности срыв начинается непосредственно в зоне закрытия и имеет сложную винтовую форму. При малом открытии РК скорость пара может превышать число Маха. Максимальные скорости при мощности турбины 220МВт составляет 635м/с, 180МВт – 962м/с, 100МВт – 1105м/с. Отметим, что на седле и РК1, РК3 температура может понижаться с 540 до 327°C (рис. 6). Данный эффект может приводить к выходу седел из посадочных мест.

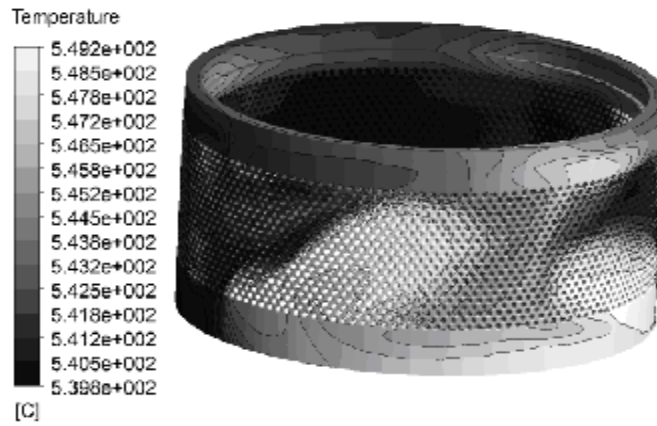


Рис. 3. Распределение температуры на сите

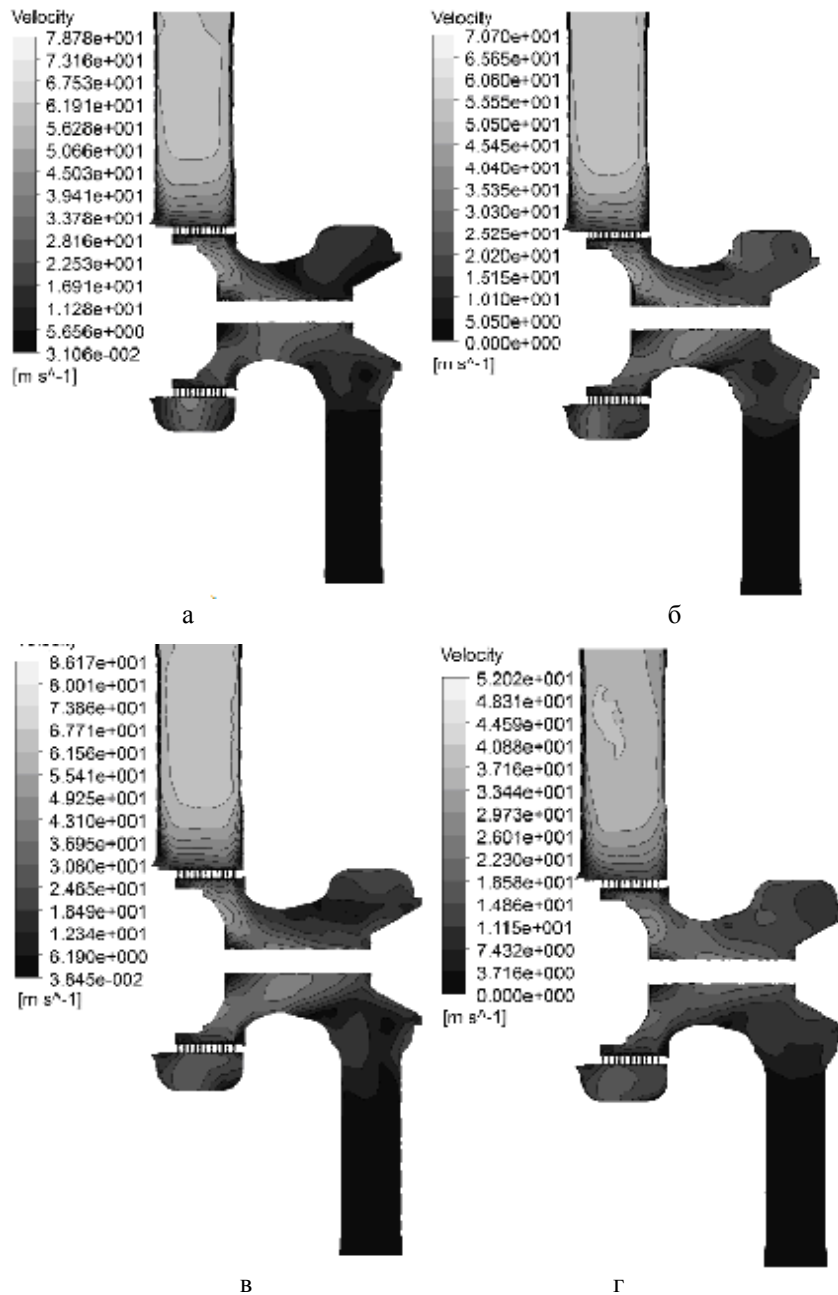


Рис. 4. Распределение скорости пара в сечении X:
 а – мощность турбины 310МВт; б – 220МВт; в – 180МВт; г – 100МВт

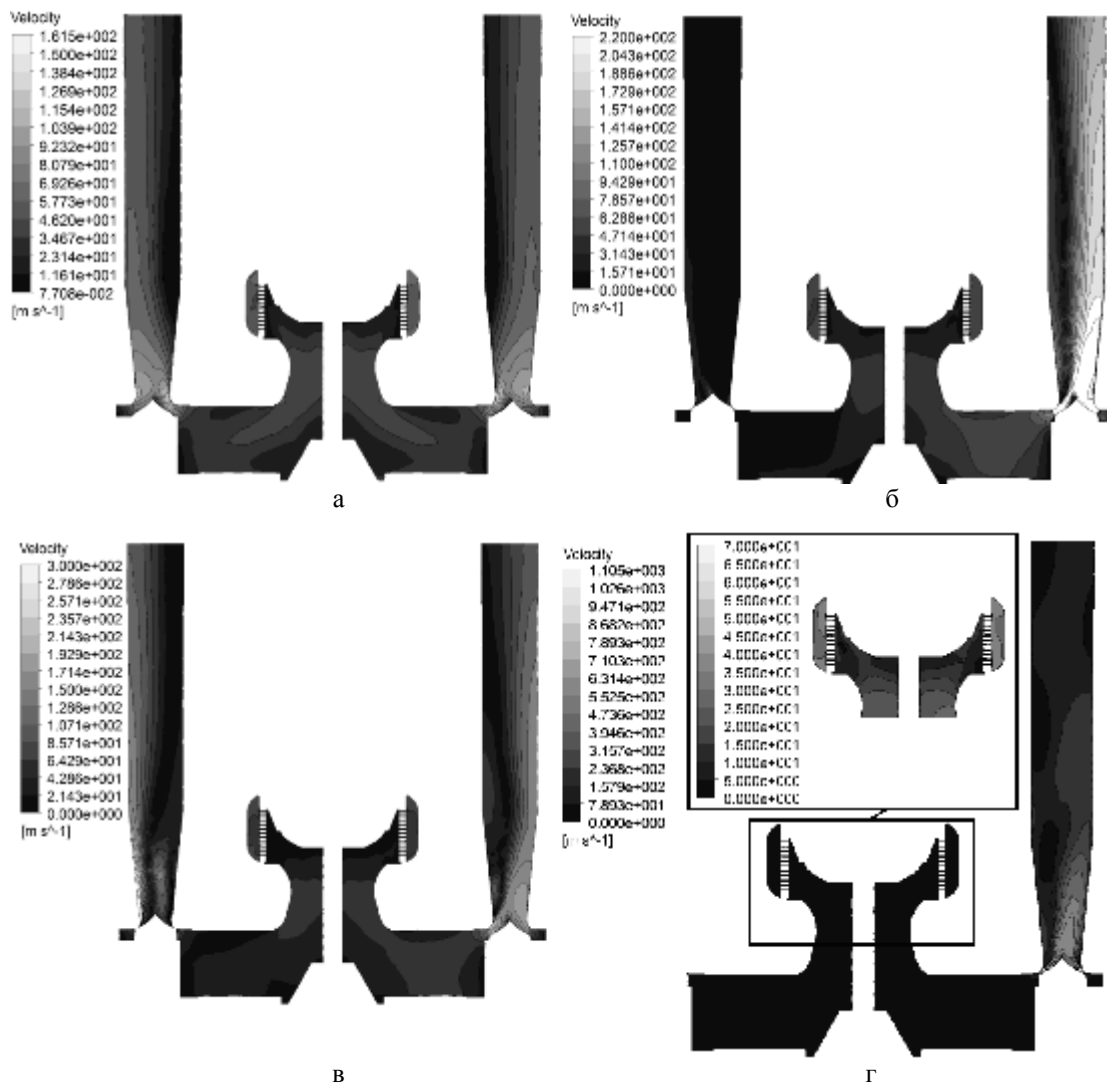


Рис. 5. Распределение скорости пара в сечении X:
 а- мощность турбины 310МВт; б- 220МВт; в- 180МВт; г- 100МВт

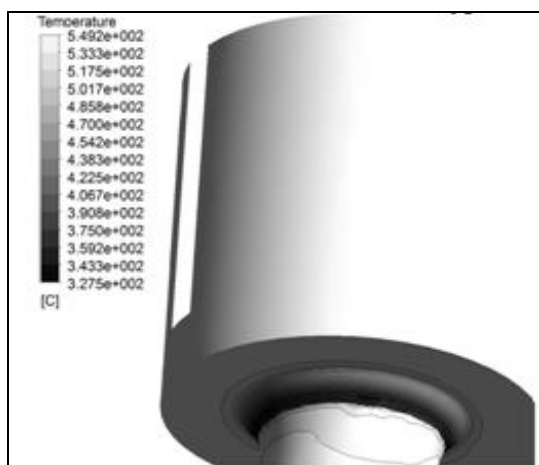


Рис. 6. Распределение температуры на седле

Выводы

На основе расчетных исследований впервые выявлены основные особенности течения пара через

сито и камеру, где оно установлено, области основных срывов течения пара и определены граничные условия для решения задач прочности конструкции при различной мощности турбины. Определено, что в отдельных узлах системы, например на седле, парораспределения градиент температур может составлять более 250°C. Выявлен перегрев сита на 12°C по сравнению с температурой пара на входе. Можно сказать, что при малых мощностях турбины наблюдается наибольшая термонагруженность, т.к. появляется повышенная температура в области сита и заниженная на седлах.

Срывы потока пара и характер его прохождения в камере парового сита за седлами на разных режимах имеют разную форму. Это указывает на возможность совершенствования проточной части системы парораспределения и профилей отдельных клапанов с целью уменьшения сопротивления и завихрений потока. С этой целью могут быть использованы результаты, полученные в данной постанов-

ке с учетом сложной геометрии для различных режимов работы турбины.

Представляется целесообразным в дальнейшем оценить влияние нестационарных режимов на работу клапанов и рассмотреть термонапряженное состояние корпуса и отдельных узлов системы парораспределения.

Литература

1. Колядюк, А.С. Численное моделирование течения пара в регулировочном клапане турбины [Текст] / А.С. Колядюк, Н.Г. Шульженко, И.Н. Бабаев // Вестник двигателестроения. – 2011. – № 2. – С. 106 – 110.

2. ANSYS CFX-Solver Theory Guide [Text] / Canonsburg, PA 15317, April 2009.

3. Menter, F.R. Eddy Viscosity Transport Equations and their Relation to $k-\epsilon$ the Model [Text] / F.R. Menter. – NASA Technical Memorandum 108854, November 1994.

4. Menter, F.R. Two–Equation Eddy–Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications [Text] / F.R. Menter // AIAA J. – 1994. – Vol. 32, № 8. – P. 1598-1605.

5. Белов, И.А. Моделирование турбулентных течений: учебное пособие [Текст] / И.А. Белов, С.А. Исаев. – СПб.: БГТУ, 2001. – 107 с.

Поступила в редакцию 12.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., руководитель отдела нестационарной газодинамики и аэроупругости В.И. Гнесин, ИПМаш НАН Украины, Харьков, Украина.

ТЕЧІЯ ПАРА ТА РОЗПОДІЛ ТЕМПЕРАТУР В СИСТЕМІ ПАРОРозПОДІЛУ ДЛЯ РІЗНИХ РЕЖИМІВ ЇЇ РОБОТИ

А.С. Колядюк, М.Г. Шульженко, С.В. Єршов

Чисельно моделюються процеси течії пара та теплообміну в системі паророзподілу парової турбіни для різних потужностей на стаціонарних режимах. Визначаються характеристики течії пара та розподіл температур в елементах системи паророзподілу для різних потужностей. Для розв'язку задачі газодинаміки та теплообміну використовувався програмний комплекс Ansys/CFX. Застосовується модель турбулентності $k-\omega$ SST Ментера. Були встановлені основні особливості роботи сита, недоліки камери де воно встановлене, області основних зривів течії пара та визначені граничні умови для задач міцності в залежно від потужності турбіни.

Ключові слова: розв'язання, течія пари, регулювальний клапан, турбіна.

STEAM FLOW AND TEMPERATURE DISTRIBUTION IN REGULATING VALVE FOR VARIOUS POWER CAPACITIES OF TURBINE

A.S. Kolyadyuk, M.G. Shul'zhenko, S.V. Yershov

Numerical modeling of processes of a steam flow and heat exchange in a regulating valve of a steam turbine at different power capacities and stationary modes. Characteristics of the steam flow and temperature distribution are defined for valve's elements at various power capacities. A program complex ANSYS/CFX was used. The semi-empirical Menter model of turbulence was applied. There were determined following features: main features of a sieve (screen) operation, disadvantages of a chamber where the sieve (screen) was installed, areas of main steam flow disturbs, boundary conditions for strength problem with respect to turbine power capacity.

Key words: solve, steam flow, regulating valve, turbine.

Колядюк Андрей Сергеевич – аспирант ИПМаш НАН Украины, г. Харьков, Украина, e-mail: duk86@mail15.com.

Шульженко Николай Григорьевич – д-р техн. наук, проф., руководитель отдела вибрационных и термочностных исследований ИПМаш НАН Украины, г. Харьков, Украина, e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua.

Єршов Сергей Владимирович – д-р техн. наук, проф. ИПМаш НАН Украины, г. Харьков, Украина, e-mail: yershov@ipmach.kharkov.ua.