

УДК 621.165.001.5

М.С. Зандер, Е.Ю. Семакина, В.А. Черников

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ 3D-ПОТОКА В ОТСЕКЕ «ТУРБИННАЯ СТУПЕНЬ — ОСЕВОЙ ДИФFUЗОР»

Стационарные высокотемпературные газотурбинные установки большой единичной мощности находят все большее применение в энергетике в составе комбинированных газопаровых электрических станций. Такие установки высокоэффективны, маневренны и поэтому часто проектируются для использования в переменной части графика электрических нагрузок. Основную газодинамическую перестройку потока при изменении режима воспринимает последняя ступень газовой турбины, за которой располагается осевой диффузор. Характер течения в диффузоре влияет на эффективность работы последней ступени: правильная организация потока в диффузоре может повысить перепад энthalпий на последнюю ступень на величину до 10 %. Таким образом, эффективность последней ступени и режим ее работы неразрывно связаны со структурой течения в диффузоре. В свою оче-

редь, режим работы ступени определяет характер течения в диффузоре. Поэтому в экспериментальных и численных исследованиях логично рассматривать последнюю ступень и диффузор как единую систему. В статье представлены результаты экспериментального и численного исследования блока «ступень — диффузор» модельного отсека турбины V84.3A.

### Экспериментальный стенд

Экспериментальный стенд подробно описан в [1]. Траверсирование потока проводилось одновременно в четырех контрольных сечениях (рис. 1). При этом в процессе всего эксперимента регистрировались параметры потока на входе в ступень, пристеночные давления, массовый расход, частота вращения ротора и сила на рычаге гидротормоза. Подробное описание измерительной системы стенда дано в [2].

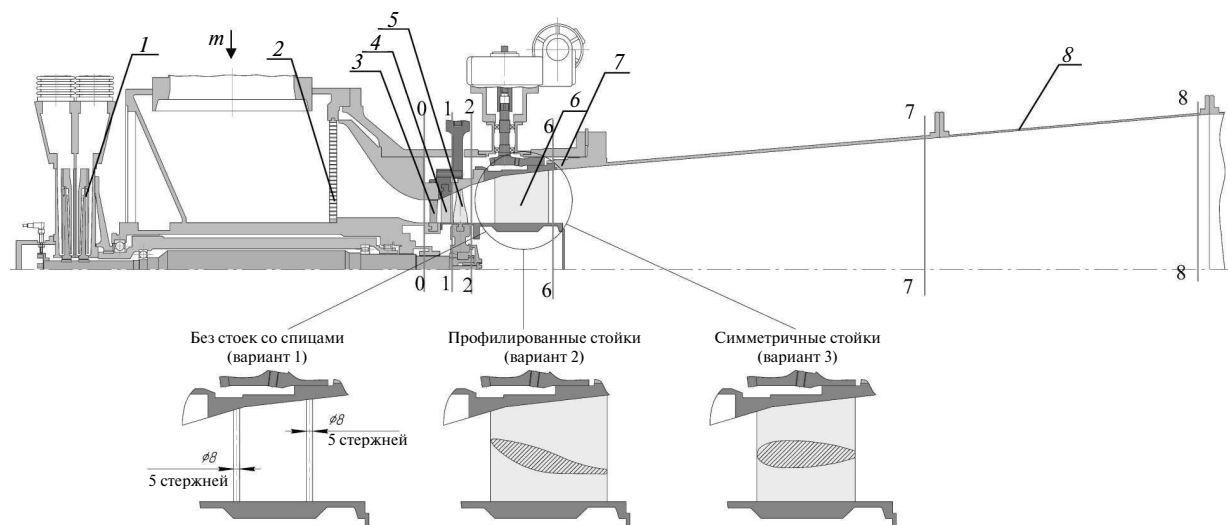


Рис. 1. Экспериментальный стенд для исследования блока «ступень — диффузор»:

1 — гидротормоз; 2 — выравнивающее устройство; 3 — предварительный направляющий аппарат; 4 — направляющий аппарат; 5 — рабочее колесо; 6 — стойки задней опоры подшипника; 7 — кольцевой диффузор; 8 — конический диффузор

### Расчетная модель

Расчетная область в осевом направлении включает в себя предварительный направляющий аппарат (ПНА) 3, модельную ступень с направляющим аппаратом (НА) 4 и рабочим колесом (РК) 5, а также выходной диффузор, состоящий из кольцевой 7 и конической 8 частей. В окружном направлении расчетная область охватывает сектор в  $72^\circ$ , т.к. в кольцевом диффузоре равномерно расположены 5 стоек задней опоры подшипника.

Расчетные сетки для лопаточного аппарата и для диффузора — структурированные, гексаэдральные, со сгущениями ячеек вблизи стенок для разрешения течения в пограничном слое. Для слабо закрученных лопаток ПНА и НА выбрана обычная *H*-топология построения сетки, для рабочей лопатки использована *J*-топология. Расчетные области для ПНА и РК созданы с учетом радиального зазора. Для диффузора в районе стойки применена *H*-топология сетки, а для конической части диффузора — комбинация *H*- и *Y*-блоков. Расчетные сетки лопаточного аппарата и расчетной области в целом представлены на рис. 2. Количество узлов и основные параметры, отражающие качество сеток, приведены в таблице.

На азимутальных границах расчетной области было использовано условие периодичности. На стенках и поверхностях лопаток ставилось условие «прилипания» потока. На входе в расчетную модель принималось граничное условие «дозвуковой вход» с заданием величин полного давления и температуры, а также направления потока. На выходе из расчетной модели ставилось граничное условие «дозвуковой выход» с заданием радиального распределения давления. В качестве граничных условий на входе в предварительный направляющий аппарат (сечение 0–0) задавалось равномерное поле полных давлений и температур по данным эксперимента, на выходе (сечение 8–8) — экспериментальное распределение давлений. Режим работы отсека определялся экспериментальными величинами частоты вращения ротора и расхода воздуха. При переходе от домена 2 (область НА) к домену 3 (область РК) использовался интерфейс Stage, при переходе от домена 3 к домену 4 (диффузор) — интерфейс Frozen Rotor.

Расчеты проводились в коммерческом пакете ANSYS CFX. Для описания трехмерного течения использовались осредненные по числу Рейнольдса уравнения движения жидкости (RANS — Reynolds averaged Navier — Stokes equations). Си-

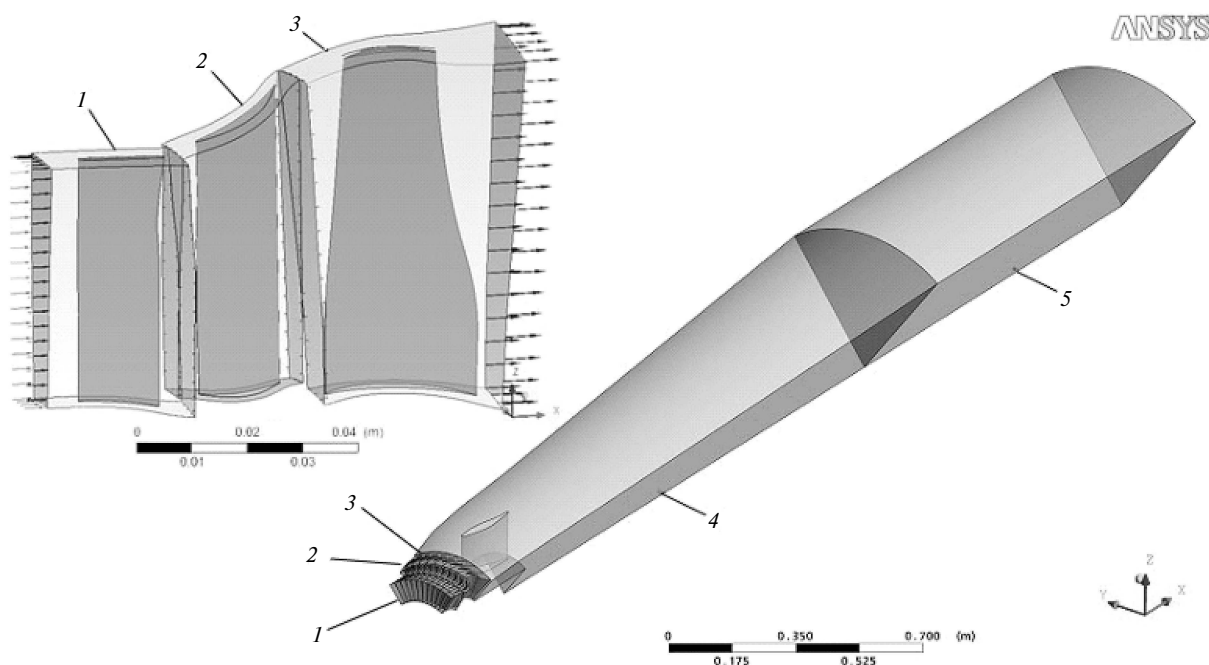


Рис. 2. Модель расчетной области блока «ступень — диффузор»

Основные характеристики расчетной сетки

Моделируемый элемент	Количество узлов	Минимальный угол скоса ячейки, град	Максимальное соотношение ребер ячейки	Максимальное соотношение объемов соседних ячеек
ПНА	910 000	23,5	670	16
НА	810 000	22,3	705	6,3
РК	1 000 000	20,6	1545	21,5
Диффузор	1 250 000	37,5	720	5
Выходной участок	33 000	55	930	2

стема уравнений неразрывности, импульса и энергии замыкалась уравнением модели турбулентности. Была выбрана двухпараметрическая модель турбулентности (SST — shear stress transport), гибридный вариант моделей  $k$ - $\varepsilon$  и  $k$ - $\omega$ , предложенная Ф.Ментером. Турбулентная кинематическая вязкость  $\nu_t = \frac{\mu_t}{\rho}$  моделировалась коэффициентом динамической вязкости —  $\mu_t$ .

### Результаты

Экспериментальные исследования проводились в широком диапазоне режимов работы при различных расходах и углах выхода потока из ступени [4]. Для расхода  $m = 10$  кг/с было выполнено численное исследование. Для варианта модели с симметричными стойками по результатам экспериментальных и расчетных ис-

следований проведено сравнение интегральных характеристик работы отсека, а также выполнен анализ структуры потока на базе сравнения 3D-полей скорости в контрольных сечениях.

### Интегральные характеристики

Качество работы блока оценивалось по интегральным характеристикам: КПД ступени —  $\eta$  и  $\eta^*$ , блока —  $\eta_{+д}$  и  $\Delta\eta_{+д}$  [4],  $C_p$  диффузора. Результаты сопоставления интегральных характеристик блока, полученных экспериментальным и расчетным путем, приведены на рис. 3 и 4.

Максимальное расхождение между экспериментальными и расчетными результатами наблюдается для  $\eta^*$  и составляет  $\eta_p^* - \eta^* = 1,5$  в диапазоне режимов от 100 до 70 % от номинальной нагрузки.

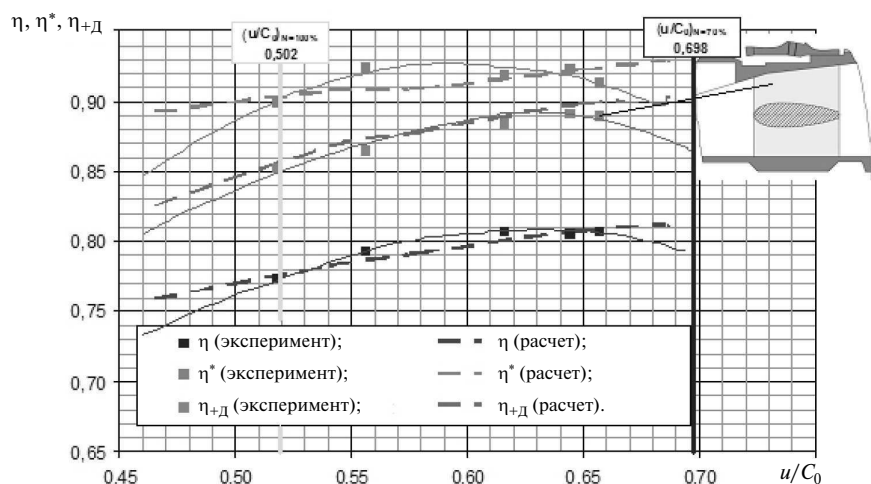


Рис. 3. Зависимость КПД ступени ( $\eta$ ,  $\eta^*$ ) и блока ( $\eta_{+д}$ ) от режима работы отсека ( $m = 10$  кг/с)

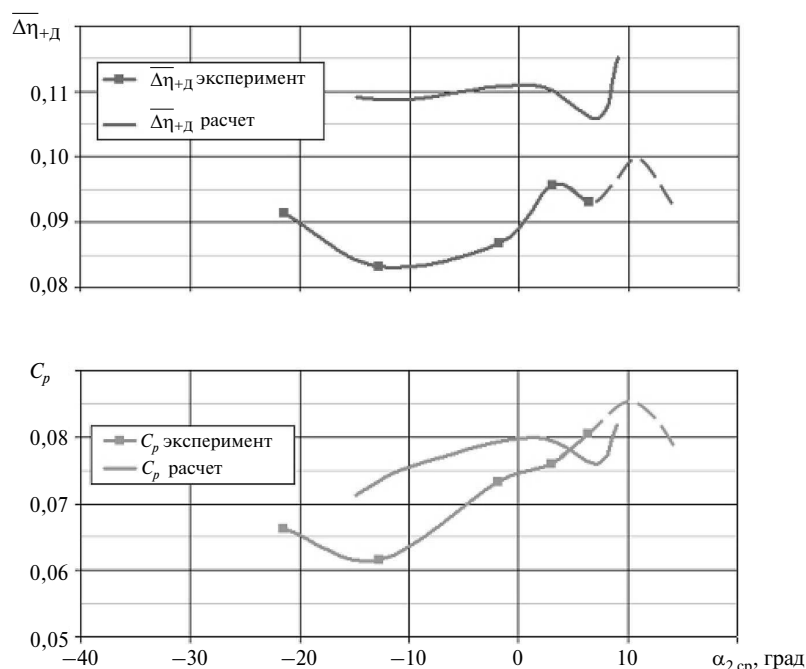


Рис. 4. Изменение КПД блока ( $\overline{\Delta\eta_{+д}}$ ) и  $C_p$  диффузора в зависимости от угла закрутки потока в сечении за РЛ

В наибольшей степени совпадают КПД блока  $\eta_{+д}$  — и их расхождения не превышают 0,5 %, хотя расхождения расчетных и экспериментальных  $\overline{\Delta\eta_{+д}}$  достигают 2 %, а расхождения  $C_p$  — 1,2 %. Характер изменения зависимости  $\overline{\Delta\eta_{+д}}$  от угла закрутки потока повторяет характер изменения  $C_p$  как для экспериментальных данных (коэффициент корреляции 0,71), так и для расчетных зависимостей (коэффициент корреляции 0,69). Это свидетельствует о значительном влиянии качества диффузора на улучшение работы блока. Причину значительных расхождений между расчетом и экспериментом по этим характеристикам можно выявить путем сравнения 3D-полей скорости по расчетным и экспериментальным данным.

#### Радиальные распределения

По результатам траверсирования и численного исследования путем осреднения параметров потока с использованием уравнений сохранения были получены радиальные распределения параметров потока в контрольных сечениях (рис. 6, 7, 8).

Как видно из рисунков, радиальные распределения параметров потока по данным ра-

счета и эксперимента имеют качественно одинаковый характер, что свидетельствует об адекватности расчетной модели реальному потоку. В результате реструктуризации потока при его движении вдоль оси диффузора происходит заполнение потоком завтулочного пространства в коническом диффузоре, сопровождаемое процессом выравнивания по сечению осевых составляющих скоростей (рис. 7, 8). Этот процесс подтверждается результатами расчета. Сохранение окружной составляющей скорости и одновременное снижение расходной составляющей потока у периферии обеспечивает практически постоянный угол закрутки  $\alpha_2 = 125\text{--}135^\circ$  вдоль всего диффузора. Наличие такой закрутки создает условия для безотрывного течения по всей области на данном режиме. Этот результат получен как экспериментальным, так и расчетным путем.

#### Поля скоростей

По результатам экспериментальных измерений и численного моделирования потока проведено сопоставление полей скоростей в контрольных сечениях 2—2 за РК, 6—6, 7—7 и 8—8 (рис. 9).

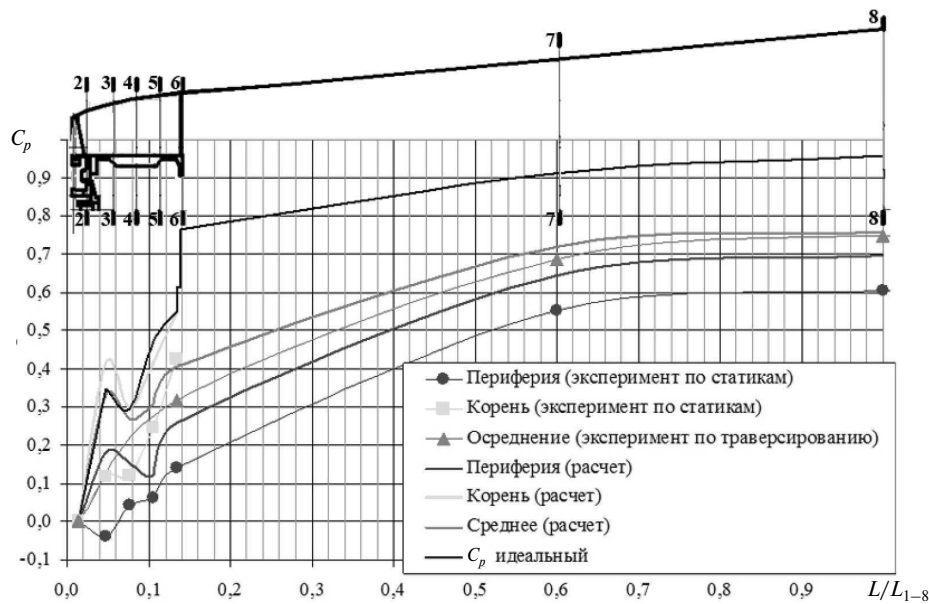


Рис. 5. Изменение коэффициента восстановления статического давления  $C_p$  по длине диффузора

Для количественной оценки расхождений расчета и эксперимента были выделены два типа ошибок: систематические и случайные. Различие в средних величинах составляющих скоростей  $c_z$  было принято за систематическую ошибку. Относительная погрешность средних величин вычислялась для каждого контрольного сечения по формуле:  $\bar{\Delta}c_z = (c_{z \text{ ср расч}} - c_{z \text{ ср эксп}}) / c_{z \text{ ср эксп}}$ .

Из рис. 7 следует, что систематическая ошибка по абсолютной величине монотонно повышается по потоку от сечения к сечению, достигая максимальной величины 8,1 % в сечении 8—8. При одинаковой абсолютной точности измерений это объясняется снижением осевых составляющих скоростей вдоль оси диффузора.

После исключения систематической ошибки была выдвинута гипотеза, что отклонение резуль-

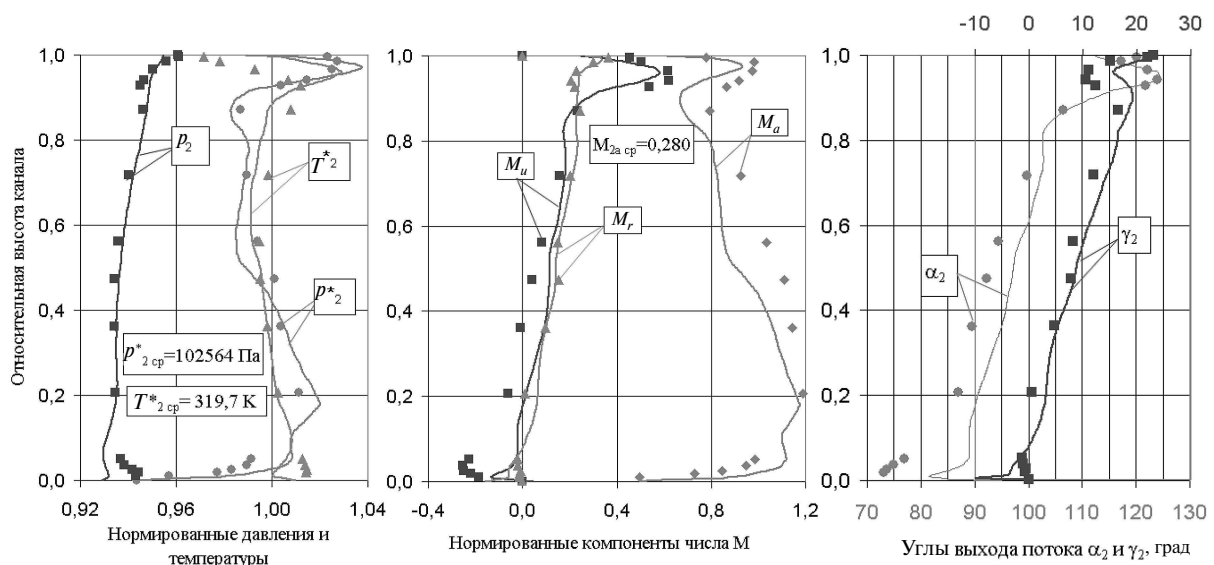


Рис. 6. Изменение параметров потока по радиусу в сечении 2—2 (за РЛ)

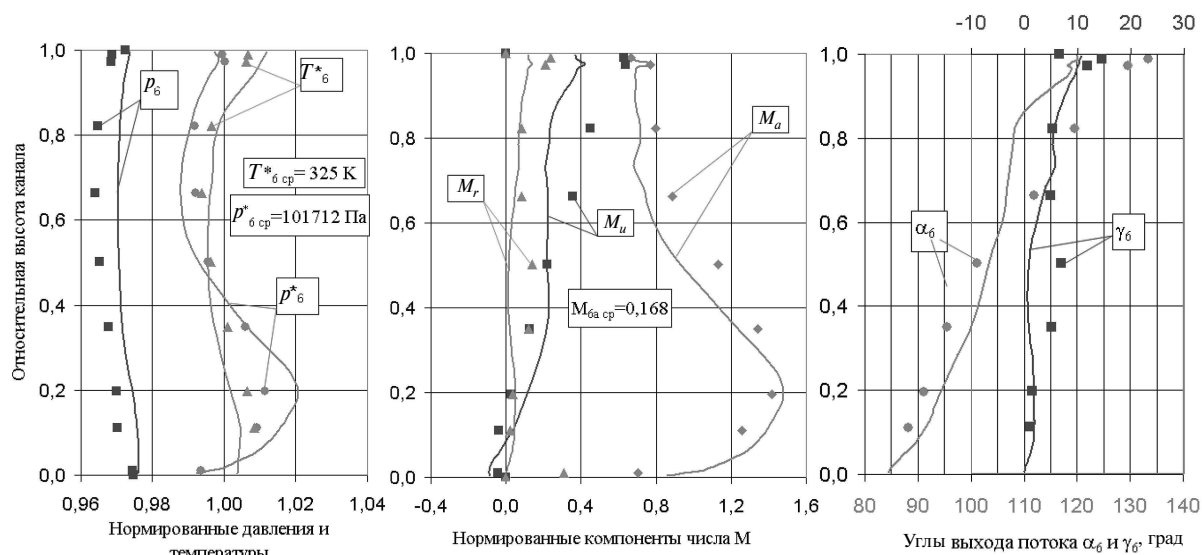


Рис. 7. Изменение параметров потока по радиусу в сечении 6–6 (за стойками)

татов расчета от экспериментальных в сходственных точках контрольных сечений носит случайный характер и подчиняется закону нормального распределения. Проверка этой гипотезы была выполнена по критерию согласия Пирсона  $\chi^2$  с вероятностью 95 %. В результате статистического анализа определены величины дисперсий и среднеквадратические отклонения расчета от эксперимента. Так, для погрешностей осевых составляющих скоростей потока в сечении 2–2 закон

нормального распределения характеризуется стандартным отклонением  $\sigma_{c_z} = \pm 7,6 \%$ . Эта максимальная по сравнению с другими контрольными сечениями погрешность является следствием того, что в расчетной модели не учтено влияние шаговой неравномерности потока за НА на течение в рабочем колесе. В сечениях 7–7 и 8–8 эта ошибка несколько снижается вследствие выравнивания течения в окружном направлении.

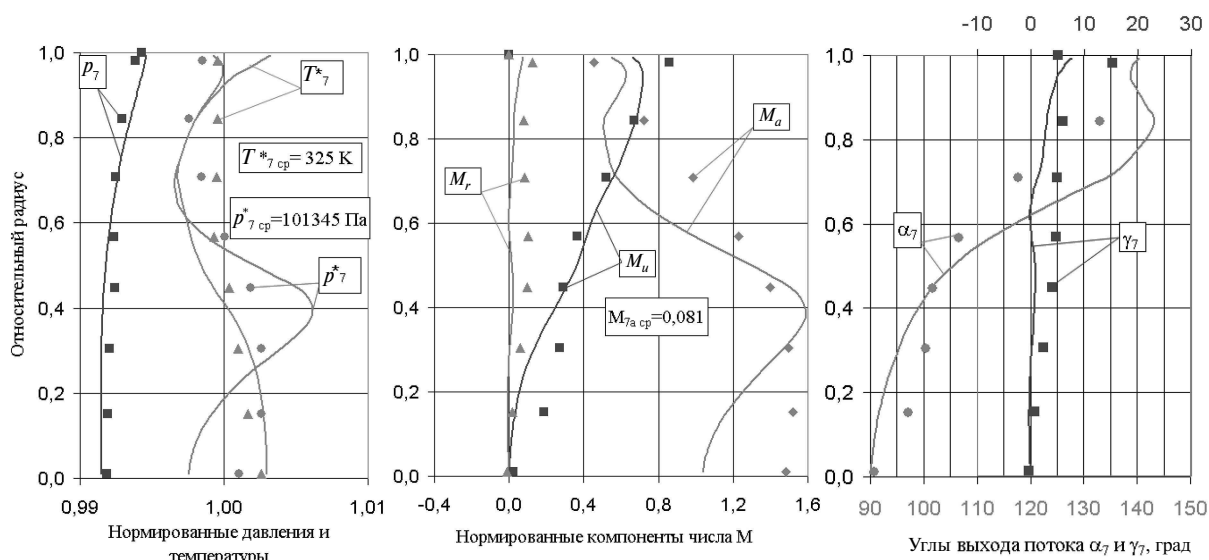


Рис. 8. Изменение параметров потока по радиусу в сечении 7–7 (конический диффузор)

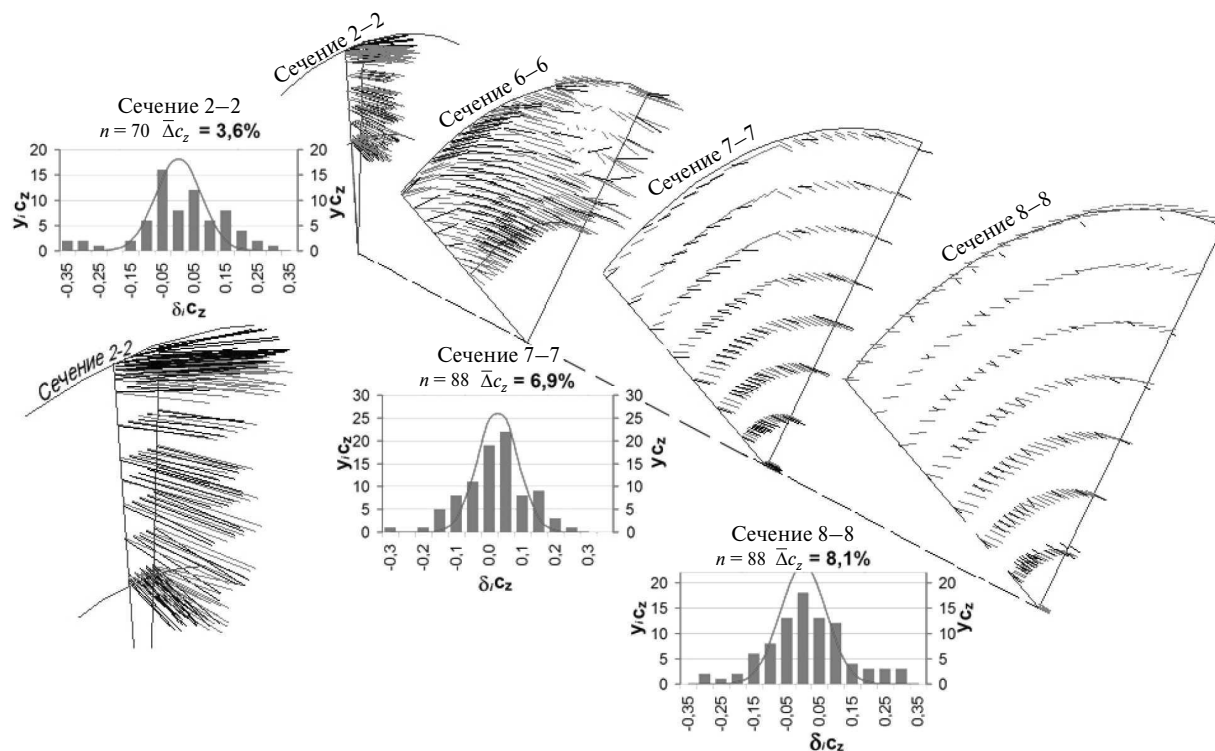


Рис. 9. Сопоставление экспериментального и расчетного поля скоростей в сечении 2–2

Подведем итоги.

1. Результаты CFD-расчетов показали вполне удовлетворительное в качественном отношении совпадение с экспериментом. В то же время по точности численное моделирование обеспечивает недостаточно удовлетворительный результат для стационарных газовых турбин большой мощности.

2. Причина недостаточной точности кроется, по-видимому, в стационарной постановке ра-

счета для принятой комплексной модели блока «ступень — диффузор».

3. Для повышения точности блочного расчета «ступень — диффузор» методом CFD целесообразно применить квазистационарный подход с дискретным во времени поворотом РК в пределах шага НА.

4. Такой подход к моделированию позволит «перенести» вихревые структуры, покидающие НА, во вращающийся РК, а затем и в диффузор.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черников, В.А. Экспериментальный стенд для газодинамических исследований выходных диффузоров и патрубков турбин [Текст] / В.А. Черников // Теплоэнергетика. — 2008. № 6. — С. 49–54.
2. Черников, В.А. Информационно-измерительная система экспериментального стенда для газодинамических исследований выходных диффузоров и патрубков турбин [Текст] / В.А. Черников, Е.Ю. Семакина, Т.Ф. Баранова // Энергетические машины и установки. — 2008. № 1. — С. 24–34.

3. Черников, В.А. Аэродинамические характеристики выходного диффузора стационарной газовой турбины при различных режимах ее работы [Текст] / В.А. Черников, Е.Ю. Семакина // Энергетические машины и установки. — 2009. № 2. — С. 42–48.
4. Черников, В.А. Исследование аэродинамических характеристик блока «ступень — выходной диффузор» стационарной газовой турбины при различных режимах работы [Текст] / В.А. Черников, М.С. Зандер // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование. — 2011. № 2(123). — С. 61–68.