

УДК 621.165

Д. А. Адамсон**С. А. Галаев**, канд. техн. наук**А. И. Кириллов**, д-р техн. наук**В. В. Рис**, канд. техн. наук

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
(Россия, e-mail: alex_dim_68@mail.ru; ai_kirillov@mail.ru)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ ПАТРУБКОВ МОЩНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН НА ОСНОВЕ ВАРИАНТНЫХ РАСЧЕТОВ ТРЕХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ

Рассматриваются возможности применения современных методов вычислительной гидродинамики (использован пакет ANSYS CFX -11), позволяющих на основе анализа трехмерного течения проектировать эффективные выходные патрубки (ВП). Разработанная методика подробно протестирована по опубликованным данным натурных испытаний ВП мощных паровых турбин. Приведены проектные данные о течении в спроектированном по предлагаемой методике ВП для модернизированной паровой турбины К - 175/180 - 12,8, имеющей трехступенчатый ЦНД и подвальное расположение конденсатора

Розглядаються можливості застосування сучасних методів обчислювальної гідродинаміки (використано пакет ANSYS CFX-11), що дозволяють на основі аналізу тривимірної течії проектувати ефективні вихідні патрубки (ВП). Розроблена методика детально протестована за опублікованими даними натурних випробувань ВП потужних парових турбін. Наведено проектні дані щодо течії в спроектованому за методикою, що пропонується, ВП для модернізованої парової турбіни К-175/180-12,8, яка має триступеневий циліндр низького тиску та підвальне розташування конденсатора.

Введение

Проектирование ВП мощных паровых турбин ведется в настоящее время с ориентацией в основном на экспериментальные данные, полученные на модельных стендах при постоянных параметрах потока во входном сечении патрубка. Однако согласно опыту эксплуатации и данным натурных испытаний ВП мощных паровых турбин коэффициенты потерь ВП действующих турбоустановок оказываются заметно большими, чем по результатам экспериментов на модельных стендах. Одна из главных причин указанного различия в коэффициентах потерь – радиальная и окружная неравномерности параметров на входе в реальный патрубок, существенно влияющая на трехмерный характер течения в ВП.

Современные пакеты гидродинамических программ, предназначенные, в частности, для расчета трехмерного течения в инженерных конструкциях, позволяют решать прямую задачу газовой динамики. Они дают возможность определить объемное и временное (в случае решения нестационарной задачи) распределение параметров потока в устройстве при заданной его геометрии. Поэтому для постановки трехмерного расчета в ВП мощной паровой турбины необходимо сначала создать исходный вариант обводов проточной части патрубка, а затем тем или иным методом, например с помощью вариантных расчетов, совершенствовать форму его проточной части.

Основная часть

Согласно нашему опыту геометрию исходного варианта ВП можно сформировать на основе одномерной модели, разбивая патрубок на участки и полагая, что при входе на каждый участок поток однороден. В конструкции ВП, вне зависимости от его типа, можно выде-

лить следующие характерные участки: начальный участок, диффузор, поворотную камеру (ПК) и переходной патрубков. Одномерная методика расчета позволяет найти характерные проходные площади всех участков, включая диффузор, и определить в первом приближении общие габариты ВП. Однако обоснованно сформировать локальную геометрию ВП и, тем более, провести ее хотя бы приближенную оптимизацию можно только на основе расчетов трехмерного течения.

Поскольку исходный вариант – это лишь начальное приближение для уточняющих расчетов, к качеству его проектирования не следует предъявлять излишне высоких требований. Вместе с тем полезно уже на стадии разработки исходного варианта максимально использовать накопленный опыт проектирования ВП.

Общепризнано, что наибольшее влияние на потери в диффузорных каналах оказывают степень расширения потока и форма ограничивающей поверхности, с определения которых и целесообразно начинать проектирование исходного варианта ВП. Общая степень расширения для ВП мощных паровых конденсационных турбин подвальной компоновки обычно составляет 3–3,5, вследствие чего скорость $c_2 = 200–250$ м/с выхода потока из последней ступени ЦНД снижается до значений 60–80 м/с при входе в конденсатор. При этом расширение потока внутри ВП происходит неравномерно.

Для начального участка задавать степень расширения более 1,02–1,05 ввиду его малой протяженности не следует. По нашему мнению, на этом участке можно лишь использовать внезапное расширение, чтобы повлиять радиальным зазором на течение в периферийной зоне. В целом поток на начальном участке обычно имеет высокую окружную и радиальную неравномерности, а также тангенциальную и радиальную закрутку, которые, как правило, неблагоприятно влияют на структуру течения в ВП. Поэтому перед началом проектирования ВП целесообразно проанализировать причины, вызывающие указанные неравномерности, и принять возможные меры к их снижению. Заметим, что при прочих равных условиях радиальная неравномерность параметров потока менее вредна, чем окружная.

Следующий за начальным участком диффузор – главный элемент ВП, где возможно выполнить торможение потока с относительно высокой эффективностью. Оптимальная степень расширения диффузора для стесненных габаритов ВП обычно лежит в пределах $n_{\text{диф опт}} = 1,7...2,3$ [1], причем даже в тщательно спроектированном диффузоре не удастся избежать локального отрыва потока. Для задания степени расширения диффузора можно воспользоваться эмпирическими зависимостями [2, 3]. При этом рекомендации [2] позволяют построить более компактный диффузор.

Известно, что среди диффузоров с криволинейной осью оптимальным оказывается ступенчатый диффузор с постоянным углом раскрытия (изоугольная часть диффузора) и внезапным расширением на выходе [4]. При построении диффузора в условиях жестких габаритных ограничений соблюсти изоугольность на всем протяжении проточной части, а также радиальный выход из диффузора, как правило, не удастся.

При проектировании проточной части диффузора следует опираться на опубликованные непротиворечивые данные [1, 2, 3, 5, 6] о влиянии основных геометрических параметров на потери в диффузоре. Начинать проектирование диффузора целесообразно с назначения максимально возможной его относительной длины. Далее назначается степень расширения предповоротной части диффузора. Она также должна быть максимально возможной. Получаемая при этом предповоротная часть должна иметь оптимальный угол раскрытия. Выбор радиусов поворотов или углов наклона поворотной части следует начинать с проектирования наружной образующей. Соотношение радиусов поворота наружной и внутренней образующих должно иметь оптимальное значение, соответствующее степени расширения проектируемого диффузора. При выборе диаметра выходного сечения диффузора необходимо учитывать, что чем меньше степень радиальности, тем сильнее зависят потери от геометрических параметров.

Проектирование исходного варианта проточной части диффузора следует выполнять только с основными силовыми элементами, которые определяют условия прочности ВП.

Форма и положение силовых элементов в исходном варианте назначаются согласно имеющемуся опыту проектирования. Их корректировка может быть выполнена после трехмерного расчета в соответствии с реальным распределением параметров потока.

Считается, что оптимальное соотношение степени расширения поворотной камеры и диффузора находится в диапазоне $0,8 \dots 1,6$ в зависимости от относительной длины и ширины патрубка [2]. Однако в опубликованных опытных данных имеются расхождения. Причины их кроются в сложности исследований, когда для каждого соотношения степени расширения диффузора и ПК необходимо применять свой оптимальный диффузор. Кроме того, на течение в ПК существенно влияет переходной патрубков, и фактический диапазон возможных значений степени расширения намного шире. Так, для ВП турбины К-300-240 ХТГЗ с низким коэффициентом полных потерь ВП $\zeta = 1,18$ указанное соотношение равно $0,27$.

Внутри поворотной камеры степень расширения распределена неравномерно. Наличие ребер жесткости, разделяющих поворотную камеру на каналы разной формы и протяженности, приводит к неодинаковой степени расширения в них. При этом степень расширения зависит от формы каналов и может быть непостоянной по их длине. Поэтому изначально неизвестно, следует ли назначать степень расширения каналов, отводящих поток в переходной патрубков по кратчайшему пути, большей или меньшей степени расширения остальных каналов. Из-за неопределенности в выборе оптимальной степени расширения ПК предлагается для исходного варианта ВП назначать ее близкой к $1,0$, а после трехмерного расчета скорректировать это значение.

Входящий в переходной патрубков поток имеет малые ($70 \dots 120$ м/с) скорости, тогда как скорость парового потока в конденсаторе обычно выбирают в пределах $60 \dots 80$ м/с. Таким образом, степень расширения в переходном патрубке составляет $1,1 \dots 2,0$. Низкие скорости позволяют при проектировании переходного патрубка уделить основное внимание не выбору степени расширения, а снижению неравномерности потока за счет формы патрубка и рационального расположения внутренних элементов. При проектировании ВП на существующий фундамент степень расширения переходного патрубка определена однозначно, а при отсутствии габаритных ограничений ее можно назначать по остаточному принципу.

Следующий этап проектирования – варианты трехмерные расчеты. По нашему мнению, варианты расчеты следует разделять на первичный, серию корректировочных и поверочный. Первичный расчет выполняют для исходного варианта ВП. Основная цель расчета – показать объемное (мы ограничились расчетом только стационарного течения) распределение газодинамических параметров в проточной части ВП и выявить взаимное влияние его участков. Серию корректировочных расчетов проводят на модели, в которую последовательно добавляют все необходимые элементы конструкции ВП. Цель расчетов – коррекция размеров участков ВП и отработка внутренних элементов патрубка. На заключительной стадии проектирования полезно выполнить поверочный расчет, целью которого будет подтверждение газодинамических свойств отработанного ВП.

Рассмотрим возможности коррекции геометрии участков ВП.

Начальный участок. Управляя внезапным расширением сечения (размером уступа), можно влиять на размывание струи протечки над бандажом рабочей лопатки последней ступени. Размер уступа влияет на структуру отрыва потока от наружной образующей диффузора. Ощутимый эффект от внезапного расширения можно получить для ВП с крутым поворотом потока в диффузоре.

Диффузор. В большинстве случаев хорошо спроектированный изолированный диффузор сохраняет свою эффективность и в составе ВП. Коррекция его геометрии связана, главным образом, с учетом взаимного влияния соседних участков. Применение дефлектора или спрямляющих лопаток может улучшить работу ВП на частичных режимах. Однако влияние дефлектора на характер течения менее значимо, чем влияние формы диффузора.

Поворотная камера. Основным способ улучшения течения в ПК – поиск оптимального соотношения между степенью расширения диффузора и ПК. Предельное значение степени расширения для ПК ограничивается пропускной способностью сечения горизонтального

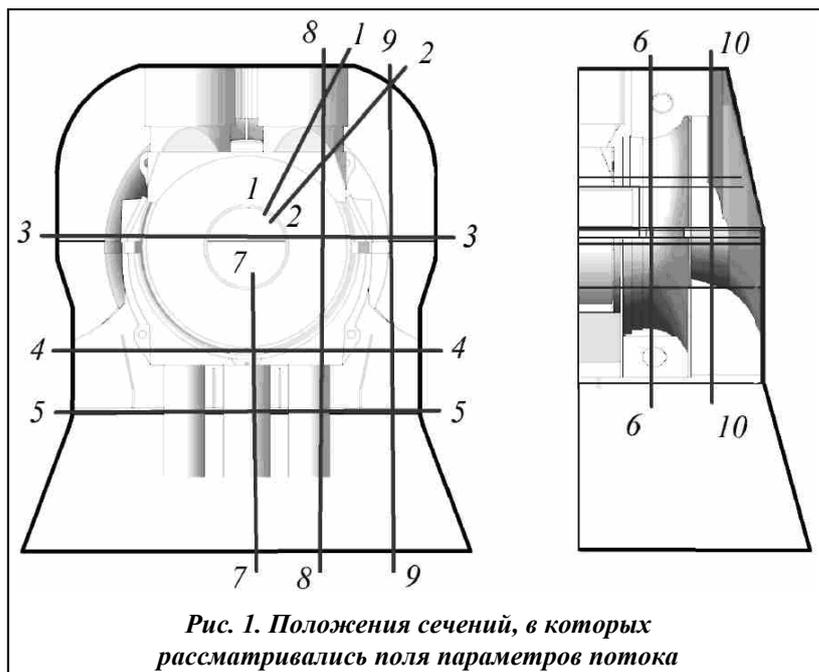


Рис. 1. Положения сечений, в которых рассматривались поля параметров потока

разъема, характер течения в котором сказывается на формировании потерь на всех участках ВП. Повлиять на течение в области горизонтального разреза можно как увеличением проходной площади верхней половины ПК, так и перераспределением потока между ее частями за счет пространственной ориентации ребер жесткости в нижней половине. Для верхней половины ПК следует проверить достаточность объема верхней зоны для перепуска пара в зону над диффузором. Избыточный объем верхней

зоны повышает потери за счет вторичных течений, а малый ее объем не позволяет потоку перераспределиться по всему объему верхней половины ПК, что приводит к большим скоростям и, следовательно, к высоким потерям в наиболее узком сечении – в районе горизонтального разреза.

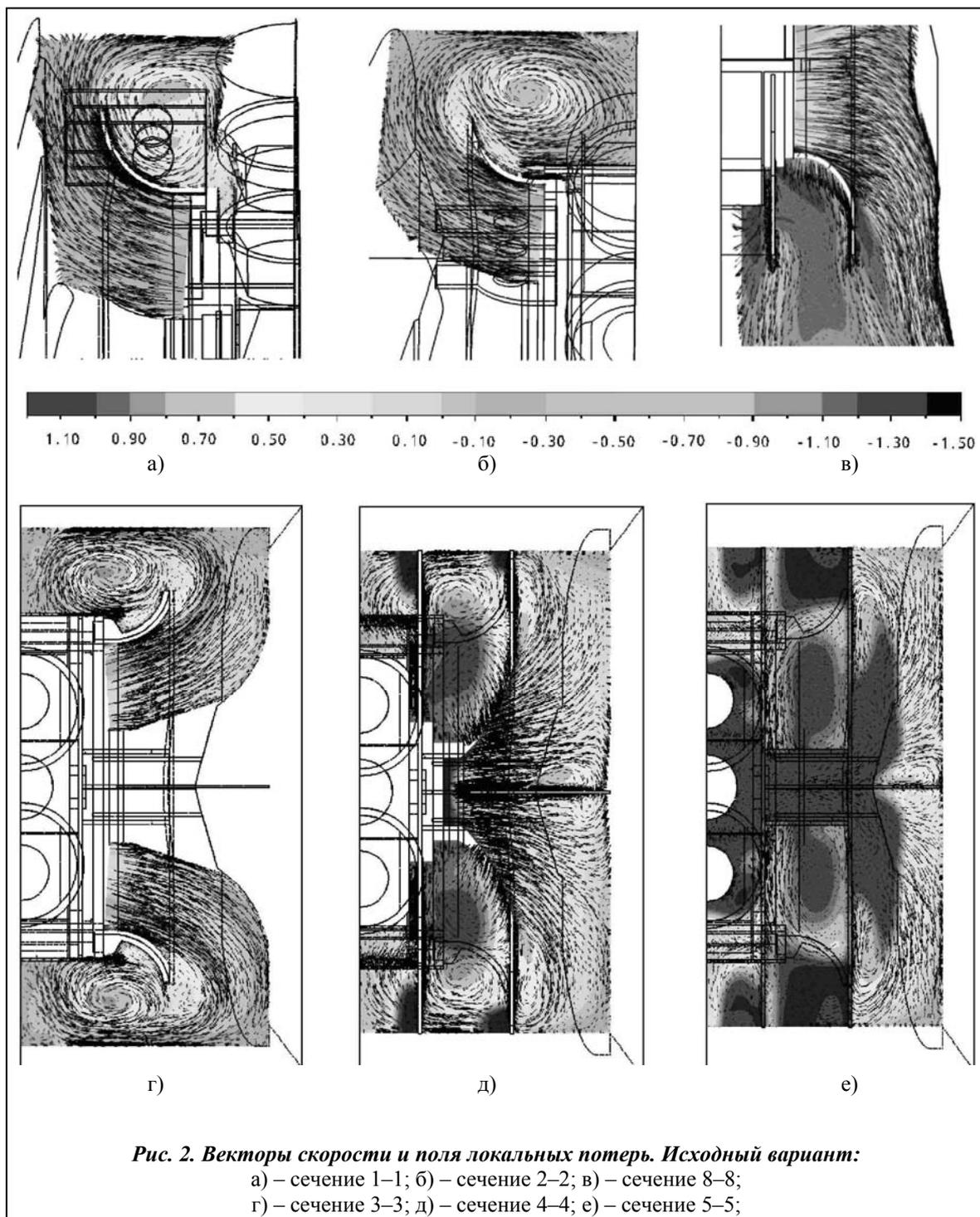
Переходной патрубок. Проектирование этого участка обычно сводится к корректировке формы, количества и положения перегородок, паропроводов и других его элементов. При значительной высоте переходного патрубка такая корректировка может снизить коэффициент потерь всего ВП.

Рассмотрим результаты вариантных расчетов трехмерного течения в ВП паровой турбины К-175/180-12,8 [7]. Ниже приведены результаты расчетов исходного и окончательного вариантов. Сечения, в которых анализируется структура течения, показаны на рис. 1. Локальные коэффициенты потерь изображены на рис. 2 и 3. Они рассчитаны как потери для диффузорного течения. Там, где текущий сквозь ВП поток ускоряется, локальный коэффициент потерь становится отрицательным.

Исходный вариант (рис. 2). В сечении 1–1 локальные потери в диффузоре равномерно распределены по высоте, отрыв потока на внутренней поверхности отсутствует. Передняя стенка ПК не мешает выходу потока из диффузора, и, следовательно, осевая длина верхней половины ПК выбрана достаточной. Наблюдаемое в сечении 1–1 поджатое сверху вихревое течение указывает на явно недостаточную высоту верхней половины ПК.

В сечении 2–2 размер вихревого потока увеличивается, а интенсивность локальных потерь падает. Ядро потока приобретает вытянутую форму, поджатую со стороны боковой наружной стенки ВП из-за недостаточной ширины верхней половины ПК. Следовательно, необходимо не только увеличить высоту патрубка, но и его ширину. Расположение ядра потока около передней стенки вызывает отрывное течение на наружной поверхности диффузора. Поток внутри диффузора не содержит вихревых зон. На наружной и внутренней поверхности диффузора формируется пограничный слой, вследствие чего растут локальные потери.

Картина течения в сечении 3–3 похожа на картину течения в предыдущем сечении. Однако вихревой поток более выражен, а отрыв потока в диффузоре смещен вверх по потоку. Увеличиваются локальные потери на внутренней образующей диффузора. Однако общий уровень потерь если и увеличивается, то незначительно. Внутри диффузора течение достаточно равномерно, как и на предыдущих участках. Как видим, поворотная камера спроектирована с недостаточной пропускной способностью. Хотя увеличить осевую длину и ширину



поворотной камеры невозможно из-за габаритных ограничений, течение в ее верхней половине можно сделать более равномерным, для чего следует увеличить ее высоту и снизить радиус боковой поверхности. Это приведет к увеличению объема верхней половины и снизит потери.

Рассмотрим нижнюю половину ВП. В сечении 4–4 сформировавшийся боковой вихрь на наружной поверхности диффузора разрушается поперечными стенками, разделяющими ВП на шесть камер. Недостаточные габариты ВП приводят к увеличенным локальным потерям в задних и средних камерах. В передних камерах возникают застойные зоны. В сечении 4–4 отрыв от наружной образующей диффузора более интенсивен, чем в сечении 3–3.

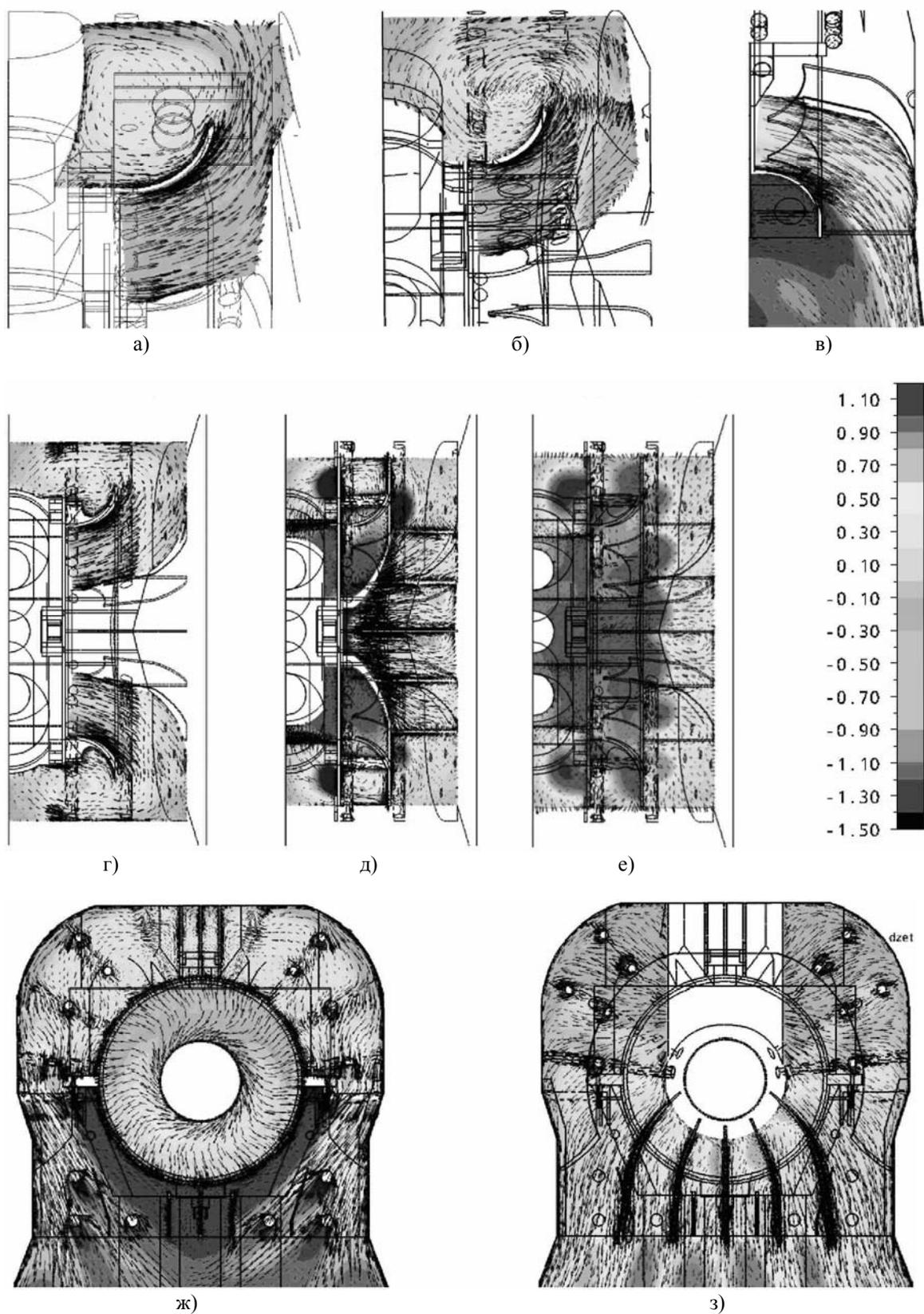


Рис. 3. Векторы скорости и поля локальных потерь. Окончательный вариант:

а) – сечение 1-1; б) – сечение 2-2; в) – сечение 7-7; г) – сечение 3-3;
 д) – сечение 4-4; е) – сечение 5-5; ж) – сечение 6-6; з) – сечение 10-10

В сечении 5–5, на выходе из ПК, происходит смешение потоков, вытекающих из ее верхней и нижней половин. Высокий уровень наблюдается по всему сечению. В углах, граничащих с передней стенкой, возникают застойные зоны.

Следовательно, начиная с горизонтального разъема и ниже, наблюдается развитое вихревое течение, улучшить которое можно, перераспределив поток, вытекающий из верхней и нижней половин диффузора за счет подбора положения продольных ребер. В целом трехмерный расчет исходного варианта показал правомерность проектирования диффузора по одномерной методике и возможность оценки общих габаритов ВП. Вместе с тем расчет позволил визуализировать течение в ВП и выявил участки течения с большими потерями, которые необходимо корректировать.

Окончательный вариант (рис. 3). Последующая серия оптимизационных трехмерных расчетов позволила выполнить коррекцию исходной геометрии ВП с учетом взаимного влияния участков патрубка. В результате течение в ПК было улучшено. Затем ВП был заполнен внутренними элементами. Наполнение ВП ребрами и связями было выполнено так, чтобы по возможности минимально нарушить благоприятную структуру течения, что следует из сравнения структуры потока в одноименных сечениях исходного и окончательного вариантов ВП.

В результате коэффициент внутренних потерь $\zeta_{\text{вн}}$ увеличился не слишком сильно, а коэффициент потерь с выходной скоростью $\zeta_{\text{вс}}$ практически не изменился. Окончательная конструкция ВП с ребрами и связями имеет коэффициент полных потерь $\zeta_{\text{п}} = 1,09$, что всего лишь на 0,11 больше, чем $\zeta_{\text{п}}$ ВП без ребер и связей. Для сравнения укажем, что коэффициентом полных потерь ВП до модернизации $\zeta_{\text{п}} = 1,95$.

Таким образом, в результате трехмерного расчета удалось разработать в условиях жестких габаритных ограничений конструкцию ВП с наполнением внутренними элементами, обладающую вполне приемлемым значением коэффициента полных потерь.

Литература

1. Дейч М. Е. Газодинамика диффузоров и выходных патрубков турбомашин / М. Е. Дейч, А. Е. Зарянкин. – М.: Энергия, 1970. – 384 с.
2. Мигай В. К. Проектирование и расчет выходных диффузоров турбомашин / В. К. Мигай, Э. И. Гудков. – Л.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
3. РТМ 108.020.120-77. Газодинамическое профилирование и расчет выхлопных патрубков цилиндров низкого давления паровых турбин.
4. Дорфман А. Ш. Приближенные методы расчета потерь в криволинейных диффузорах при отрывных течениях / А. Ш. Дорфман, М. И. Сайковский // Пром. газодинамика. – 1966. – Вып. 28. – С. 98–121.
5. Довжик С. А. Экспериментальное исследование кольцевых диффузоров осевых турбомашин / С. А. Довжик, А. И. Морозов // Пром. газодинамика. – 1961. – Вып. 20. – С. 168–202.
6. Дыскин Л. М. Исследование влияния геометрических и режимных параметров на характеристики кольцевых диффузоров: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1969. – 26 с.
7. Особенности проектирования выхлопного патрубка паровой турбины К-175/180-12,8 ТЭС / Н. Н. Гудков, В. И. Кириллов, С. А. Кошелев и др. // Российская энергетика – 2009: совершенствование теплотехнического оборудования, реконструкция ТЭС, внедрение систем сервиса: Материалы шестой международ. науч.-практ. конф. – Екатеринбург: Урал. техн. ун-т-Урал. политех. ин-т, 2009. – С. 46–55.

Поступила в редакцию
29.09.12