

УДК 62.135

В. Л. Швецов***И. И. Кожешкурт*****В. А. Конев*****В. Г. Солодов****, д-р техн. наук**А. А. Хандримайлов****, канд. техн. наук

* ОАО «ТУРБОАТОМ»

(г. Харьков, e-mail: office@turboatom.com.ua)

** Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

(e-mail: solodov@khadi.kharkov.ua)

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТОПОРНЫХ КЛАПАНОВ С ПАРОВЫМИ СИТАМИ ТУРБИН ТИПА К-220-44

Рассмотрены результаты расчетно-конструкторских разработок и численного моделирования течений в стопорных клапанах с паровыми ситами. Проанализировано влияние параметров парового сита и проточной части клапана на структуру течения и потери полного давления. Предложенные решения позволили существенно снизить потери в стопорных клапанах и трудоемкость изготовления паровых сит.

Розглянуто результати розрахунково-конструкторських розробок і чисельного моделювання течій в стопорних клапанах з паровими ситами. Проаналізовано вплив параметрів парового сита і проточної частини клапана на структуру течії і втрати повного тиску. Запропоновані рішення дозволили істотно знизити втрати в стопорних клапанах і трудомісткість виготовлення парових сит.

Введение

Надежность и экономичность мощных паровых турбин в значительной мере определяется уровнем газодинамического совершенства всех элементов проточной части, в том числе и элементов тракта паровпуска цилиндра высокого давления (ЦВД). В настоящей статье рассматривается решение задачи о повышении эффективности элементов паровпуска паровых турбин типа К-220-44, которое состоит в снижении потери давления в тракте паровпуска, повышении КПД и мощности ЦВД за счёт модернизации паровых сит и проточной части стопорных клапанов.

Цель работы, постановка задачи и метод исследования

Тракт паровпуска турбины К-220-44 (рис. 1) включает по два стопорных клапана (СК) 1 и 2 с паровыми ситами (ПС) 3 и предвключёнными паропроводами 4 и 5, перепускные паропроводы 6 и 7, по два регулирующих клапана 8 и 9, присоединённые к входному патрубку 10 первой ступени. Проточные части четырех СК от входного сечения ПС до выходного сечения седла практически одинаковы. Регулирующие клапаны в исследовании рассматриваются только как элементы влияния на характеристики стопорных клапанов.

Паровое сито (рис. 2) в исходном исполнении имеет форму усечённого конуса с перфорированной поверхностью, отличается загромождением парового канала кольцевой зоной без отверстий на стыке боковой и донной поверхностей и тремя продольными ребрами прочности, поток пара входит в отверстия перфорации боковой стенки под острым углом, что в значительной мере снижает эффективность данной конструкции. По этой причине при совершенствовании стопорного клапана значительное внимание уделено проблеме снижения потерь на паровых ситах. Для её решения рассматривались варианты конструкций:

обращенное паровое сито, плоское ПС для исходного и увеличенного внутреннего диаметра входной части корпуса (до внутреннего диаметра верхней части исходного корпуса), что позволило увеличить живое сечение и дополнительно снизить гидравлическое сопротивление ПС.

На последующих этапах рассматривались модификации проточной части стопорного клапана путем специального профилирования поверхностей чашки и седла клапана, профилирования ребер, а также мероприятия по снижению интенсивности отрыва в поворотном колене паропровода.

В работе обсуждаются результаты численного аэродинамического анализа существующей конструкции и вариантов усовершенствованных конструктивных решений.

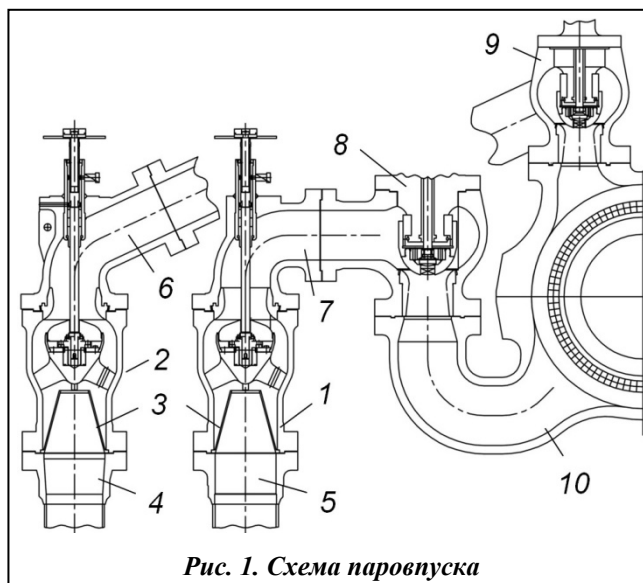


Рис. 1. Схема паровпуска

Математическая модель течения и численное решение газодинамической задачи

В численном моделировании использован программный комплекс *MTFS[®] software* [1, 2], обеспечивающий интегрирование уравнений Навье–Стокса, осреднённых по Рейнольдсу–Фавру на основе неявной разностной TVD схемы конечных объёмов 2-го порядка точности и варианта алгоритма [3], допускающего эффективное расщепление вычислительного процесса для многопроцессорных платформ. Расчётные подобласти аппроксимировались неструктурированными гексаэдральными сетками. Твёрдые стенки предполагались адиабатическими, на них ставилось условие прилипания и равенство нулю эффективной вихревой вязкости. Турбулентные эффекты описывались на основе SST модели Ментера [3].

Существующее паровое сито явилось сложным элементом с точки зрения моделирования структуры течения и потерь полного давления. Для преодоления трудностей описания геометрии с целью экономии вычислительных ресурсов выделялся симметричный (или почти симметричный) фрагмент ПС и применялся секторный подход [3] на интерфейсах подобластей: сита и собственно клапана.

Численное моделирование течения в вариантах ПС проводилось в условиях отсутствия возможности экспериментальной проверки получаемых результатов. Поэтому стратегия проведения расчетов основывалась на предварительном выборе и оценке вычислительной сетки для течения через одиночное отверстие, через группу отверстий в исходной конфигурации и в вариантах, содержащих профилированные отверстия с коноидальной фаской на входе, цилиндрическим участком и диффузором с центральным углом до 6° . Результаты расчётов сравнивались с известными экспериментальными данными [4]. Подобранные таким образом параметры сеток применялись при моделировании течения для симметричного фрагмента реального ПС с массивом отверстий.

Мощности сеточного разбиения по эле-



Рис. 2. Фрагмент исходного парового сита

ментам тракта в среднем составляли около 5–8 млн. ячеек в проточной части клапанов и до 30 млн. ячеек в моделях паровых сит, так что на одно отверстие ПС приходилось 80–100 тыс. ячеек. На первом этапе исследований объекты моделировались в изолированной постановке, далее – в условиях взаимовлияния паровых сит, стопорных и регулирующих клапанов. На основе такой вычислительной технологии выполнен детальный газодинамический анализ потерь на паровых ситах различной конфигурации и с разной формой отверстий. Анализируемые конфигурации подвергались прочностному анализу для работы на режимных параметрах турбин К-220-44 инженером ОАО «ТУРБОАТОМ» А. Н. Губским.

Исследование вариантов стопорного клапана

Исходный вариант бокового стопорного клапана представлен на схеме паровпуска (рис. 1). Стопорный клапан с паровым ситом характеризуется следующими основными параметрами: диаметр проточной части предвключенного паропровода равен 433 мм, перфорация боковой поверхности ПС состоит из 8190 цилиндрических отверстий диаметром 5 мм; донная поверхность содержит 555 отверстий; общая площадь отверстий превышает входную площадь паропровода в 1,2 раза. Отверстия в ПС выполнены с фаской $0,4 \times 45^\circ$ на входе, межосевые расстояния составляют 7 мм.

Интегральные газодинамические и энергетические характеристики элементов паропроводов и СК вычислялись в сечениях по ходу пара: от выходного сечения паропровода свежего пара и далее с постоянным шагом. Осреднение параметров в этих плоских сечениях выполнялось по расходу в соответствии с методикой [5]. При осреднении через область вихря последняя изымалась из рассмотрения. Интегральные внутренние потери полного давления на участках между сечениями канала определялись как отношение разности входного и текущего полных давлений к кинетической энергии потока на входе.

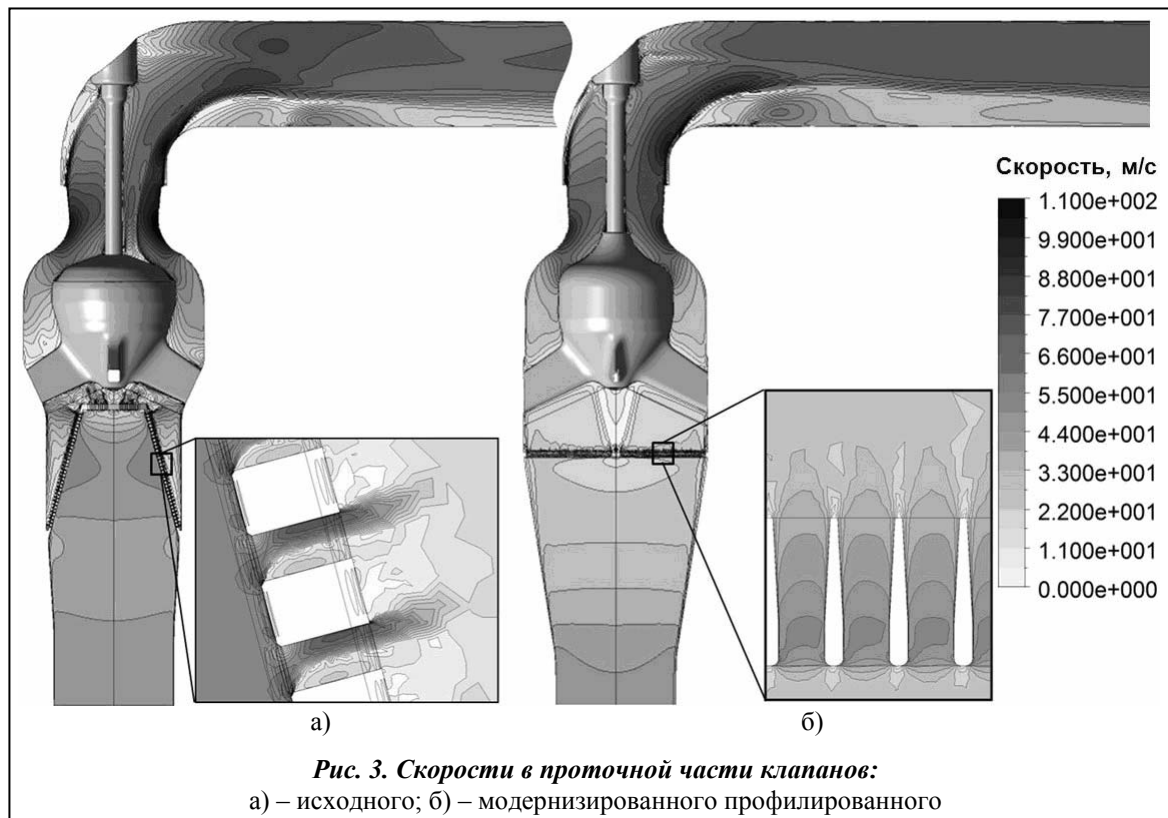
1. Газодинамический анализ исходного стопорного клапана

Отмеченные выше особенности формообразования проточной части стопорного клапана проявились в процессе проведения расчетных исследований СК и ПС как в изолированной постановке, так и в условиях взаимовлияния, а также с учетом взаимовлияния с регулирующим клапаном. По результатам расчетных исследований течение через клапан исходной конструкции характеризуется резким падением полного давления на ПС, наличием отрывных зон и значительной неравномерности полей параметров, а также нестационарности в перепускных паропроводах (рис. 3). Установлено, что потери собственно на ПС в составе исходных СК составляют около 70% от общей потери давления на СК, а потери в собственно клапанах сосредоточены в основном на участках канала в окрестности седла клапана и поворотного колена (рис. 4, 5). Обращенное паровое сито не показало снижения потерь. Поэтому ниже основное внимание уделено совершенствованию конструкции парового сита.

2. Газодинамический анализ мероприятий по усовершенствованию стопорного клапана

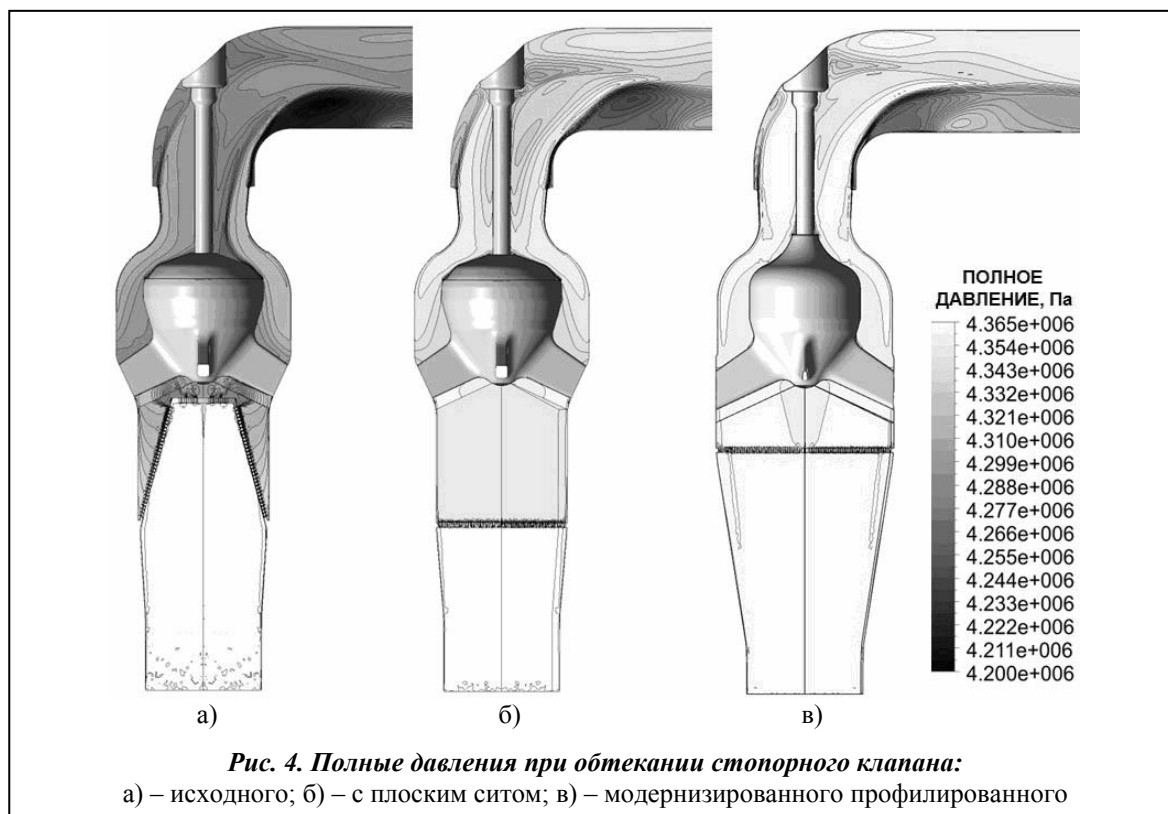
Модернизированный стопорный клапан с плоским паровым ситом (ППС) представлен на рис. 3, б, 4, в и отличается от исходного СК такими новыми элементами, как: предвключенный удлинённый паропровод с диффузорным каналом, обеспечивающий минимальную технологическую подрезку паропроводов острого пара, усовершенствованный корпус клапана, ППС с профилированными отверстиями, профилированные опоры обтекателя, профилированные чашка клапана и седло. На рис. 3 представлены поля скорости в исходном СК с ПС и в модернизированном профилированном СК с ППС. Графики потерь полного давления вдоль проточной части указанных стопорных клапанов даны на рис. 5.

Плоское паровое сито (рис. 3, а, 4, б, в) рассматривалось в двух исполнениях: с цилиндрическими отверстиями диаметром 5 мм и фаской $0,4 \times 45^\circ$ на входной кромке и с профилированными отверстиями, имеющими коноидальную фаску $R = 0,8$ мм на входной кромке, цилиндрический участок стабилизации диаметром 5 мм и осевой диффузор с центральным углом 6° . Результаты сравнительных исследований газодинамических и энергетических



характеристик паровых сит исходной конструкции и плоских для исходного СК показали, что потери на ППС в первом исполнении уменьшились в 2,9 раза, а во втором – в 4,9 раза. При этом общее количество отверстий в сите снизилось с 8745 до 3640.

Дополнительные расчетные исследования ППС с увеличенными размерами отвер-



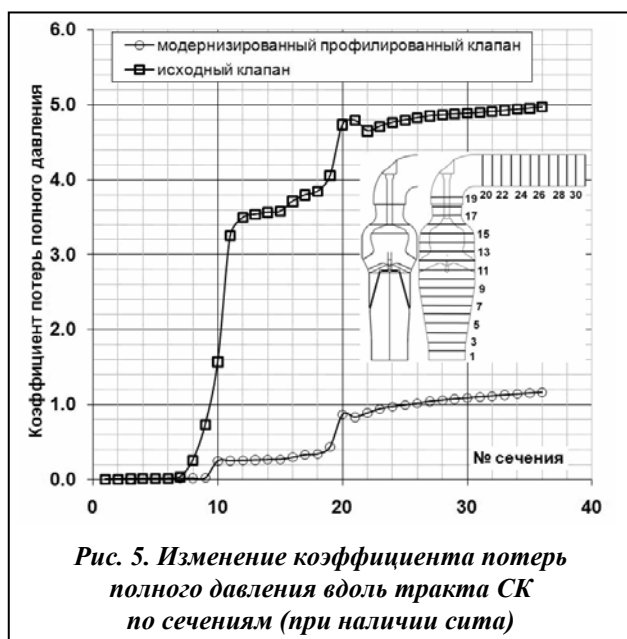


Рис. 5. Изменение коэффициента потерь полного давления вдоль тракта СК по сечениям (при наличии сита)

что основной эффект достигается за счет усовершенствования парового сита и увеличения его диаметра. Усовершенствование формы канала, образованного чашкой клапана и седлом, снижает потери в клапане на 20% вследствие уменьшения отрывных областей собственно в клапане за счет улучшения обтекания чашки клапана, штока и втулки (рис. 4).

Течение в поворотном колене отличается взаимодействием струй, обтекающих втулку клапана, и обширным отрывом с противотоком на вогнутой стороне паропровода. Эти структуры порождают потери полного давления и нестационарность на входе в регулирующий клапан.

Для уменьшения неблагоприятных факторов в колене путем эвристического поиска осуществлен выбор тонкой разделительной перегородки на основе анализа структуры течения и опытных данных [4]. По расчетным данным разделительная перегородка существенно уменьшает область отрыва в колене для всех рассмотренных вариантов СК. На рис. 5 и 6 представлены графики потерь полного давления для исходного, модернизированного и модернизированного профилированного клапанов без учета сита.

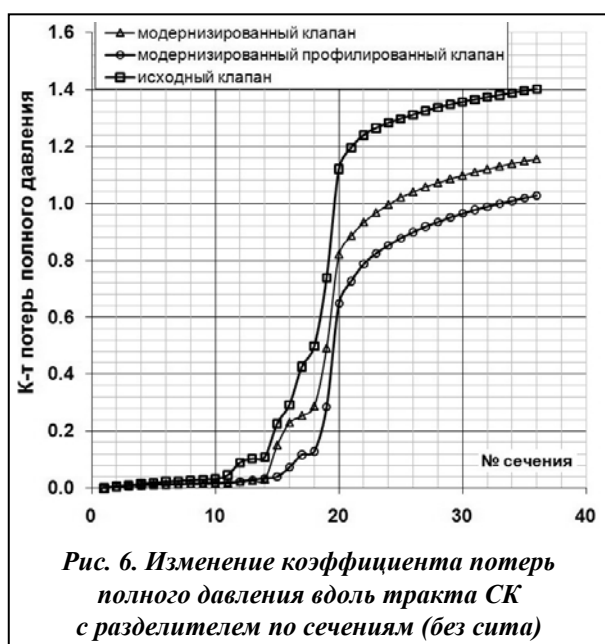


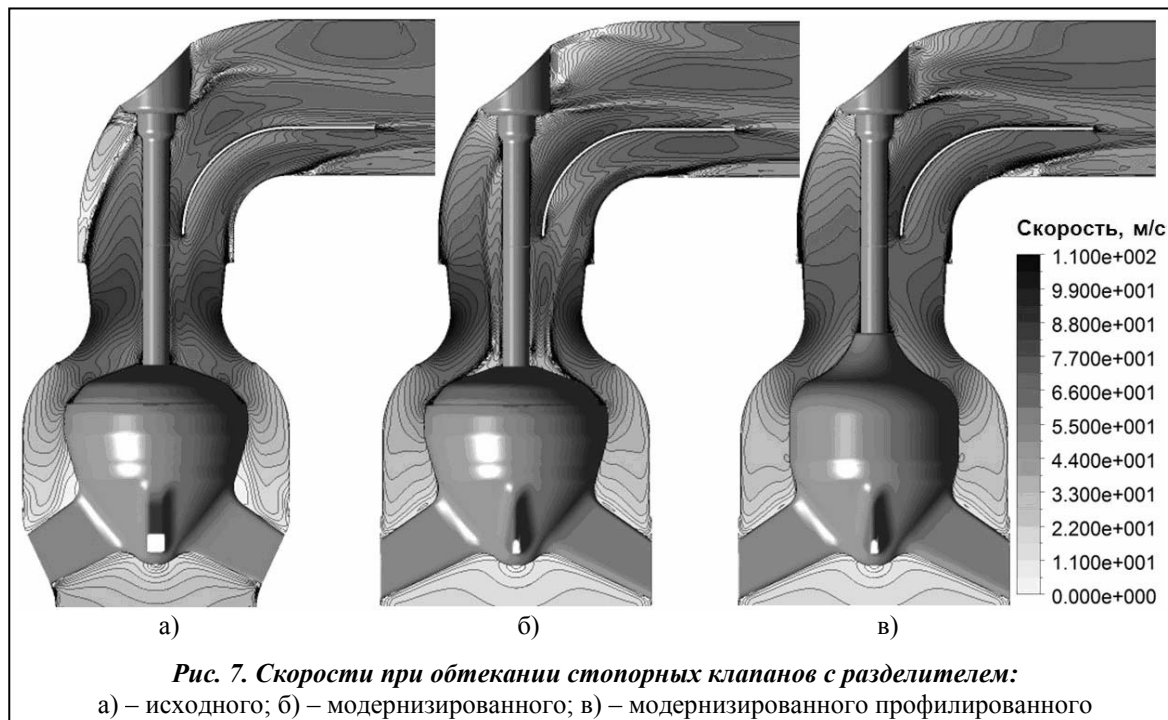
Рис. 6. Изменение коэффициента потерь полного давления вдоль тракта СК с разделителем по сечениям (без сита)

стей и расстояниями между отверстиями до 6 и 8 мм соответственно показали, что потери в ППС с такой перфорацией практически равны потерям в ППС с исходной перфорацией, однако при этом общее количество отверстий уменьшается с 6760 до 5175.

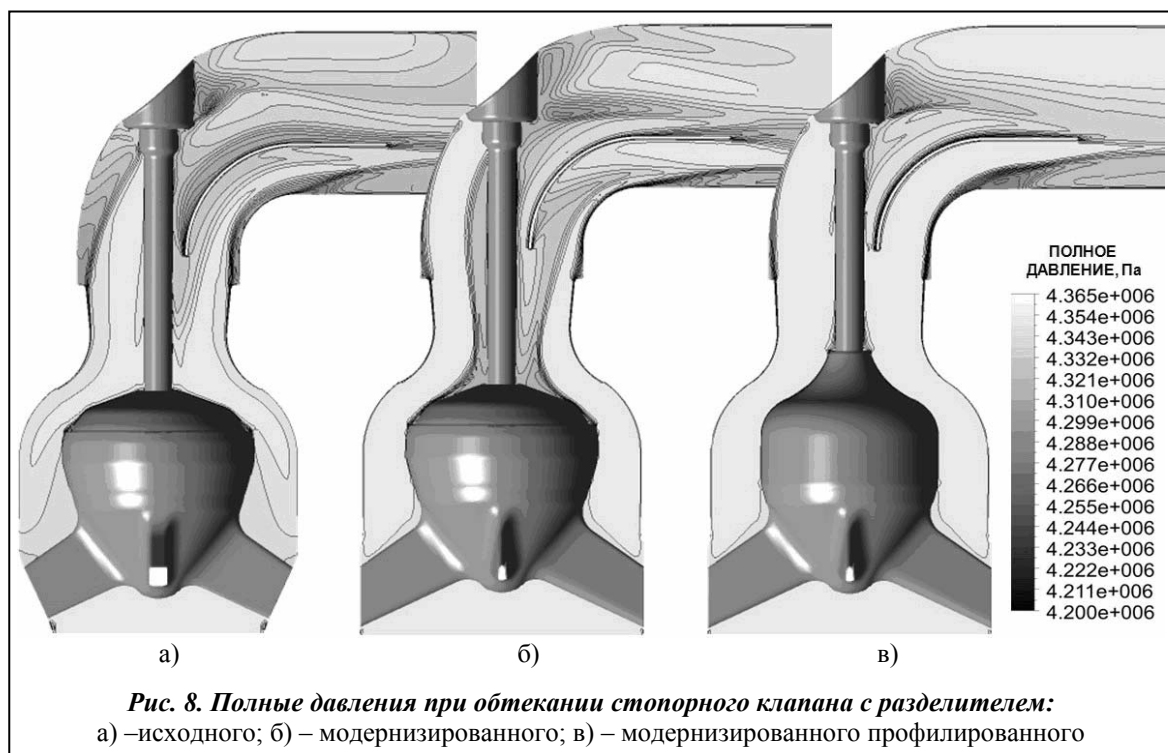
Исследования стопорных клапанов с модернизацией корпусов за счет увеличения диаметра входной части позволили организовать оптимальный диффузорный подвод пара к ППС с минимальной скоростью и минимальными потерями (рис. 3, б, 4, в). Увеличение только диаметра сита обеспечило снижение потерь на сите на 62%.

Детальное сравнение составляющих потерь в исходном и модернизированных стопорных клапанах показало,

На рис. 7, 8 даны поля скоростей и полных давлений в плоскости симметрии клапана. Взаимовлияние сита и проточной части СК относительно мало, поэтому влияние разделителя в колене СК исследовалось без сит. Установка разделителя на исходный клапан приводит к уменьшению потерь на 23%. В исходной конфигурации клапана реализуется обширный отрыв потока у вогнутой части поворотного колена, который исчезает для модернизированного клапана ввиду перестройки течения перед чашкой клапана, однако при этом появляется развитая отрывная область у штока. Этот фактор вызывает необходимость профилирования поверхности чашки в верхней ее части, а также седла клапана. Установка разделительной перегородки на модернизированный клапан уменьшает потери полно-



го давления на 20%. На модернизированном профилированном клапане без сита разделитель снижает потери на 12%. Относительный выигрыш в потерях от разделительной перегородки невелик, однако существенным является снижение уровня нестационарности течения на входе в регулирующий клапан, что стабилизирует работу регулирующего клапана. В результате профилирования структура течения в клапане становится более регулярной, профиль скорости наполняется, потери полного давления снижаются.



Заключение

Конструкторские решения наряду с трехмерным моделированием позволили существенно уменьшить потери в СК и упростить технологию изготовления паровых сит. Основной эффект получен от применения ППС и увеличения его диаметра в модернизированном корпусе СК. Профилирование отверстий в ППС также позволяет значительно снизить потери полного давления. Минимизация потерь в СК обеспечивается специальным профилированием проточной части СК. Применение разделительной лопатки в поворотном колене позволяет заметно снизить нестационарность течения в паропроводах и на входе в регулирующий клапан.

Литература

1. Солодов В. Г. Научно-прикладной программный комплекс *MTFS*[®] для расчета трехмерных вязких турбулентных течений жидкостей и газов в областях произвольной формы / В. Г. Солодов, Ю. В. Стародубцев // Сертификат гос. регистр. авторских прав. – Укр. гос. агентство по авторским и смежным правам. – № 5921. – 07.16.2002.
2. Солодов В. Г. Опыт трехмерного моделирования сжимаемых вязких турбулентных течений в турбомашинах / В. Г. Солодов, Ю. В. Стародубцев // Аэрогидродинамика: Проблемы и перспективы. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ». – 2004. – С. 134–157.
3. Солодов В. Г. Моделирование турбулентных течений: Расчет больших вихрей / В. Г. Солодов. – Харьков: Харьк. нац. авиодор. ун-т, 2011. – 168 с.
4. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
5. *Аэродинамические* характеристики ступеней тепловых турбин / Под ред. В. А. Черникова. – Л.: Машиностроение, 1980. – 263 с.

Поступила в редакцию
29.09.12

УДК 532.6

С. А. Хомылев

С. Б. Резник

В. Т. Руденко

ГП «Ивченко-Прогресс»

(г. Запорожье, e-mail: 03504@ivchenko-progress.com)

О ВЫБОРЕ ФОРМЫ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ВЫСОКОНАГРУЖЕННОЙ ТУРБИНЫ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Приведены результаты расчетного исследования двух проточных частей высоконагруженной турбины низкого давления. Рассмотренные турбины отличаются формой проточной части, которая определяет величину коэффициента расхода. Расчетным путем определено влияние коэффициента расхода турбины на ее эффективность и вес. Выработаны рекомендации по выбору формы проточных частей высоконагруженных турбин низкого давления.

Наведено результати розрахункового дослідження двох проточних частин високонавантаженої турбіни низького тиску. Розглянуті турбіни відрізняються формою проточної частини, яка визначає величину коефіцієнта витрат. Розрахунковим шляхом визначено вплив коефіцієнта витрати турбіни на її ефективність і вага. Вироблені рекомендації щодо вибору форми проточних частин високонавантажених турбін низького тиску.