

А.В. Русанов, А.И. Косьянова, П.Н. Сухоробрий, О.Н. Хорев

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков

ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ЦИЛИНДРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ К-325-23,5



Представлены результаты газодинамического усовершенствования цилиндра высокого давления паровой турбины К-325-23,5. Спроектированы новые направляющие и рабочие лопатки венцов ступеней цилиндра, проведен газодинамический расчет исходной и модернизированной проточных частей. Выполнена оценка ожидаемого суммарного экономического эффекта от внедрения предложенных конструкций.

Ключевые слова: паровая турбина, цилиндр высокого давления, проточная часть, пространственное течение, расчетные исследования.

Основу тепловой энергетики Украины составляют паровые турбины мощностью 200 и 300 МВт, введенные в эксплуатацию в 50–60 годы прошлого века. На сегодняшний день эти турбины выработали установленный ресурс или приближаются к его границе, поэтому в ближайшее время необходимо выполнить их модернизацию или замену.

На турбиностроительном предприятии ОАО «Турбоатом» (Харьков) разработана новая турбина К-325-23,5 мощностью 325 МВт, которая может быть использована для замены устаревших турбин на действующих ТЭС без существенных перестроек машзала и фундамента при максимальном сохранении оборудования тепловой схемы. На рис. 1 представлен общий вид проточной части цилиндра высокого давления (ЦВД) турбины К-325-23,5.

В настоящее время налажено производство этих турбин, поставки осуществляются на ТЭС «Аксу» (Казахстан). В Украине планируется при-

менить эту разработку на Трипольской ТЭС. В проекте турбины К-325-23,5 использован ряд новых конструктивных решений, которые позволили повысить ее КПД. Однако проектирование проточной части турбины проводилось на основе традиционных подходов, т.е. с использованием унифицированных профилей лопаток направляющих аппаратов (НА), в том числе с удлиненным входным участком, и рабочих колес (РК). В этой связи на основе имеющегося у авторов опыта [1, 2] можно утверждать, что у рассматриваемой конструкции существуют значительные резервы для повышения ее эффективности.

В работе представлены результаты газодинамического усовершенствования проточной части ЦВД паровой турбины К-325-23,5 за счет использования современных методов профилирования лопаточных аппаратов.

МЕТОД И ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ЦВД

Для численного исследования физических процессов в проточной части паровой турбины использовался программный комплекс FlowER

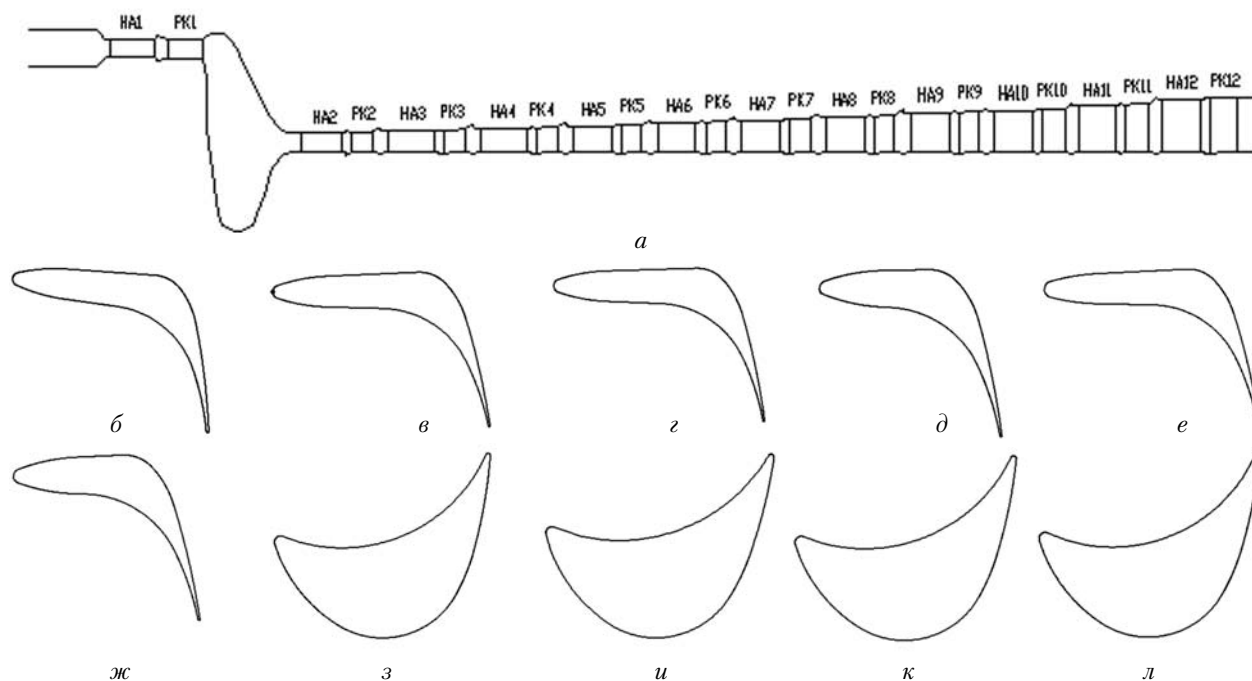


Рис. 1. Общий вид проточной части и сечения лопаток ЦВД: *а* – общий вид проточной части; *б* – НА 1-ой ступени; *в* – НА 2-й и 3-й ступеней; *г* – НА 4-й ступени; *д* – НА 5-й ступени; *е* – НА с 6-й по 8-ю ступень; *ж* – НА с 9-й по 12-ю ступень; *з* – РК 1-ой ступени; *и* – РК со 2-й по 9-ю ступень; *к* – РК 10-й и 11-й ступеней; *л* – РК 12-й ступени

[1, 3], в котором реализованы следующие элементы математической модели: осредненные по Рейнольдсу нестационарные уравнения Навье–Стокса, двухпараметрическая дифференциальная модель турбулентности SST Ментера, неявная квазимоноотонная ENO-схема повышенной точности. Программный комплекс FlowER более 15 лет успешно используется в ряде ведущих конструкторских бюро машиностроительных предприятий Украины, России и Польши. Достоверность полученных с его помощью результатов подтверждена большим числом исследований, выполненных как разработчиками комплекса, так и специалистами предприятий, где он используется [4, 5 и др.]. Совместные расчеты первых двух ступеней выполнены с использованием уравнения состояния совершенного газа на сетке с суммарным числом более 2 млн. 600 тыс. ячеек при условиях, соответствующих номинальному режиму работы турбины: частота вращения ротора – 3000 мин^{-1} , полная температура на входе – $535,5 \text{ }^\circ\text{C}$, полное давление

на входе – 228 кгс/см^2 (22,4 МПа), статическое давление на выходе из 12-ой ступени – $39,96 \text{ кгс/см}^2$ (3,92 МПа). Для определения граничных условий *вход–выход* для расчета отдельных ступеней ЦВД использованы данные теплового расчета ОАО «Турбоатом». Расчетная сетка каждой ступени насчитывала примерно 1 млн. 640 тыс. ячеек.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСХОДНОЙ КОНСТРУКЦИИ ЦВД

Одним из наиболее проблемных элементов проточных частей паровых турбин, в том числе турбины К-325-23,5, являются первые две ступени, на характер обтекания которых значительное влияние оказывает изменение режима работы. На рис. 2 показана визуализация течения в первых двух ступенях ЦВД исследуемой турбины.

Из представленных результатов видно, что даже на номинальном режиме работы угол натекания на НА 2-й ступени сильно отклонен от осевого направления, из-за чего в проточной час-

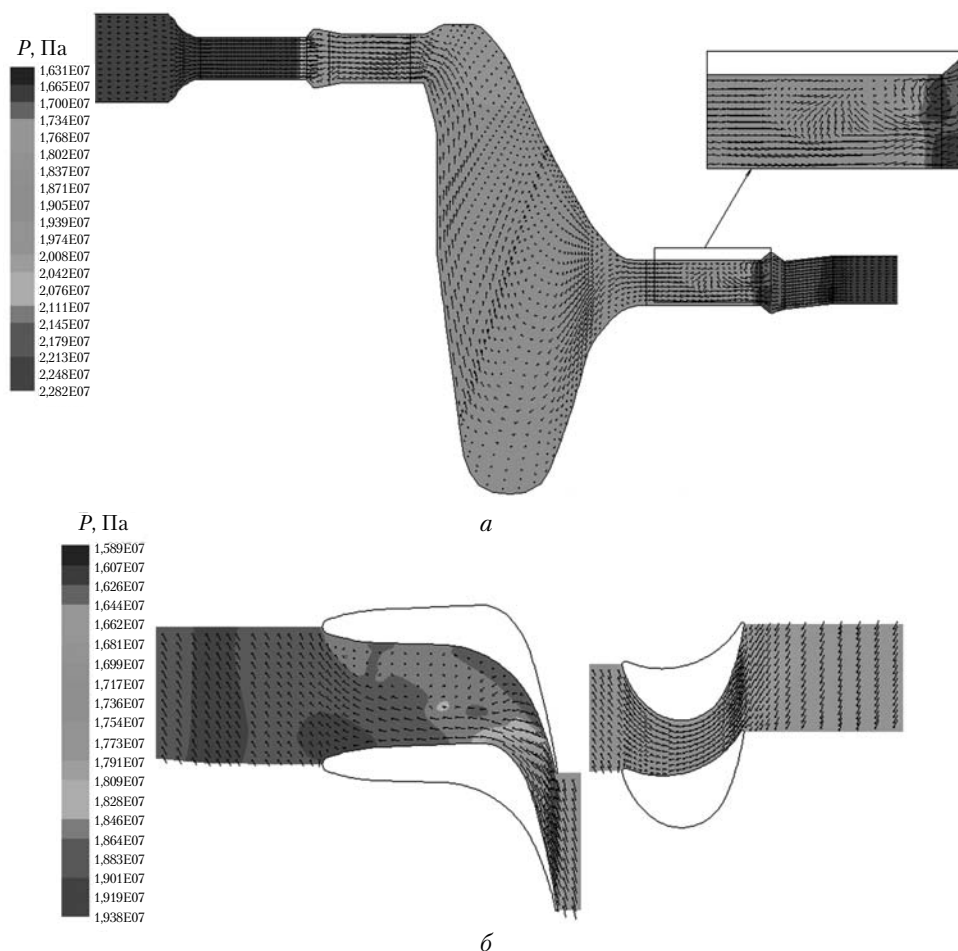


Рис. 2. Изолинии статического давления и векторы скорости: а – 3-я ступень; б – 12-я ступень

ти образуются значительные отрывы потока. Потери кинетической энергии для 1-й ступени составляют 19,6 %, для 2-й – 26,1, а в двух ступенях – 24,9. Полученный уровень потерь в 1-й ступени, с учетом особенностей ее конструкции (парциальность), является приемлемым. Значение потерь кинетической энергии во 2-й ступени очень высокое и может быть объяснено только наличием обширных отрывных зон.

На рис. 3 представлена визуализация результатов расчетов в 3-й и 12-й ступенях ЦВД. В таблице приведены основные интегральные газодинамические характеристики исходных ступеней ЦВД.

Из представленных результатов видно, что потери кинетической энергии в ступенях умень-

шаются по мере увеличения относительной высоты лопаток (от входа к выходу). Величина потерь кинетической энергии практически для всех ступеней больше 10 %, что несколько хуже по сравнению с существующими в мире лучшими образцами современных турбин.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ЗАДАНИЯ ПРОФИЛЕЙ ЛОПАТОК ОСЕВОГО ТИПА КРИВЫМИ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЦВД

Одним из наиболее важных требований, предъявляемых к методам профилирования лопаточных аппаратов, является обеспечение минимума профильных потерь при обтекании лопатки потоком. Согласно [6], обеспечение ус-

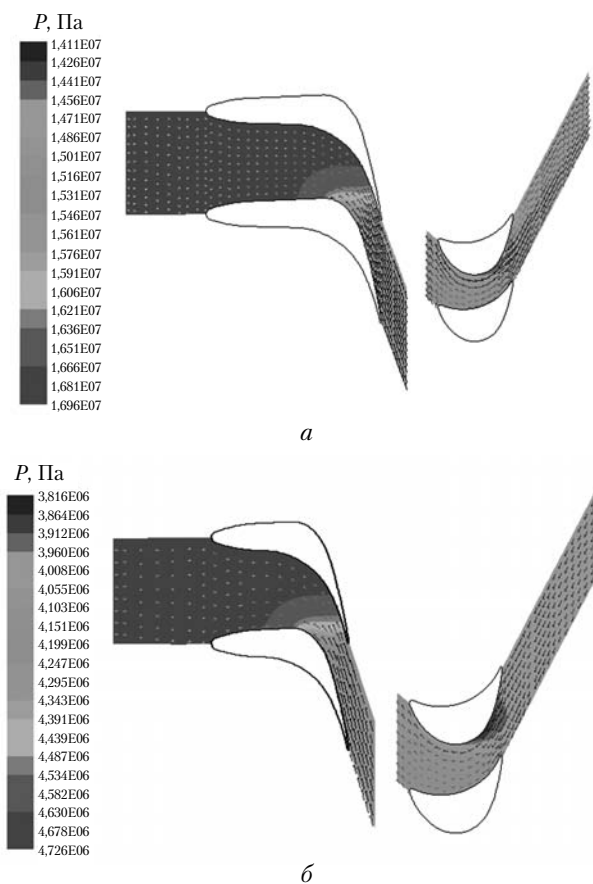


Рис. 3. Изолинии статического давления и векторы скорости в среднем тангенциальном сечении: а – 3-я ступень; б – 12-я ступень

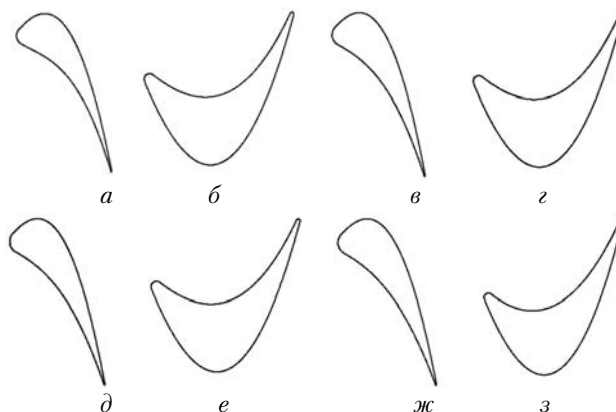


Рис. 4. Вид модернизированных направляющих и рабочих лопаток ЦВД: а – НА 3-й ступени; б – РК 3-й ступени; в – НА 6-й ступени; г – РК 6-й ступени; д – НА 9-й ступени; е – РК 9-й ступени; ж – НА 12-й ступени; з – РК 12-й ступени

ловия минимального значения максимальной кривизны для кривых, описывающих профиль, позволяет улучшать аэродинамические качества турбинных лопаток.

В ИПМаш НАН Украины разработан метод параметризации и аналитического профилирования лопаточных венцов, в котором профили лопаток описываются кривыми четвертого порядка с условием обеспечения минимального значения максимальной кривизны [2]. С использованием этого подхода выполнена

Основные интегральные газодинамические характеристики ступеней ЦВД турбины К-325-23,5

Номер ступени	Расход на входе G_1 , кг/с	Расход на выходе G_2 , кг/с	Мощность N , МВт	Потери кинетической энергии, %	Потери кинетической энергии с выходной скоростью, %	КПД, %
1	270,8	270,6	10,137	19,62	19,01	61,37
2	270,5	271,7	8,7067	26,14	3,78	70,08
3	279,0	279,0	9,1336	13,59	4,39	82,02
4	274,0	273,3	8,4254	14,56	4,52	80,92
5	272,2	272,6	8,2820	13,69	4,56	81,75
6	281,0	281,3	8,5370	12,48	4,74	82,78
7	281,1	281,3	8,6047	11,97	4,72	83,31
8	281,5	281,8	8,8968	11,73	4,62	83,65
9	278,3	278,7	8,6548	10,99	5,55	83,46
10	252,1	252,3	8,2730	11,05	4,11	84,84
11	257,0	257,2	8,5788	10,13	4,15	85,72
12	250,8	249,6	8,2508	8,99	4,66	86,35

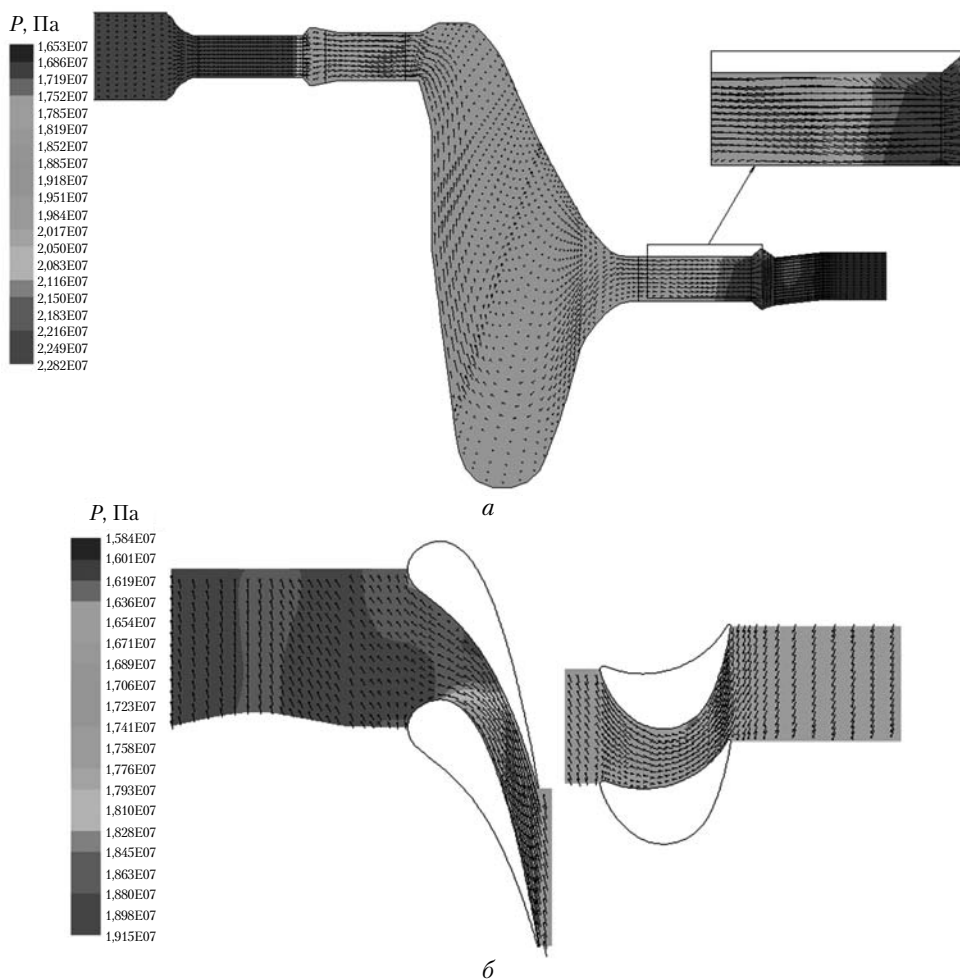


Рис. 5. Ізолинії статического тиску і вектори швидкості: *а* — середнє сечєннє в меридиональній площині; *б* — середнє сечєннє в міжлопатковому каналі НА і РК 2-ї ступєннє

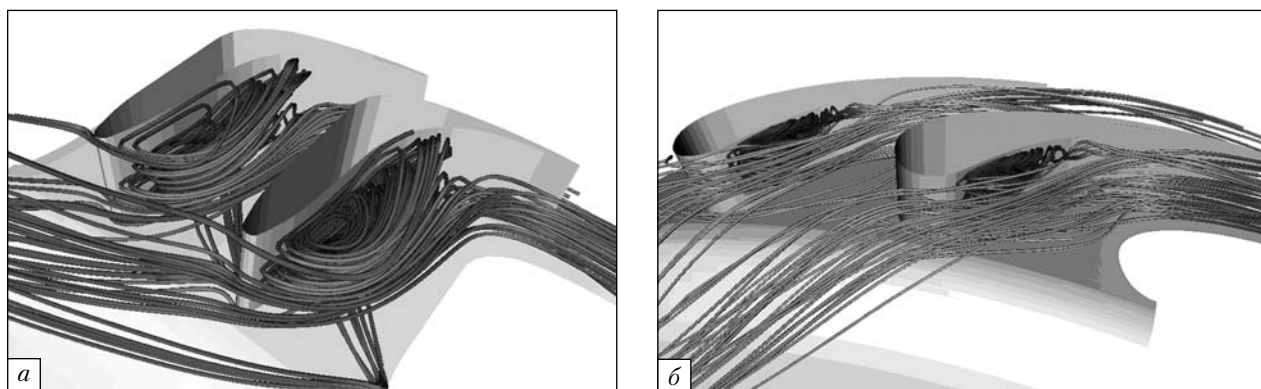


Рис. 6. Визуалїзація лїнїї тєка в міжлопатковому каналі початкового (*а*) і модернїзованого (*б*) НА 2-ї ступєннє

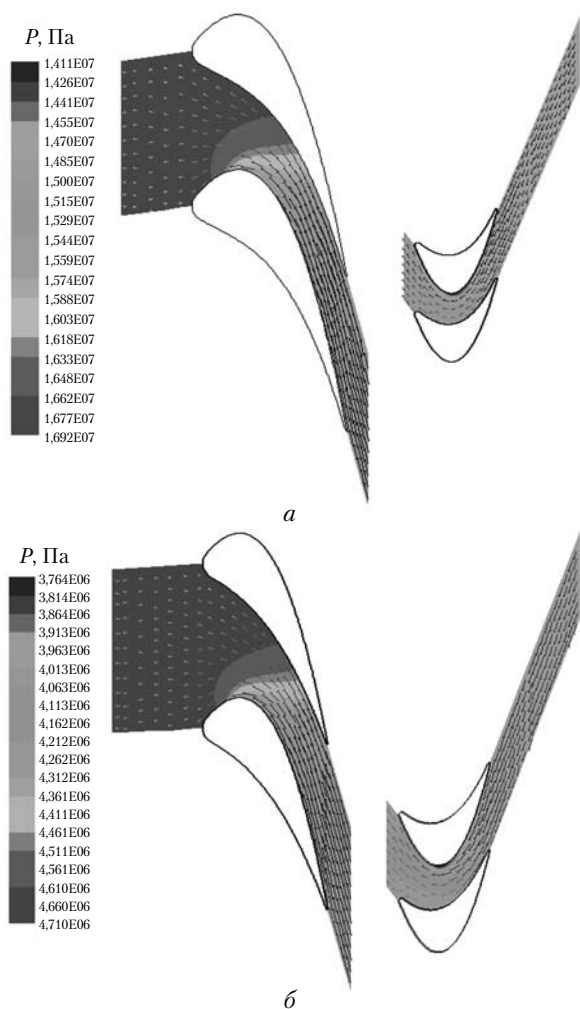


Рис. 7. Распределение статического давления и векторы скорости в среднем тангенциальном сечении модернизированных ступеней ЦВД: *a* – 3-я ступень; *б* – 12-я ступень

модернизация направляющих и рабочих лопаток ступеней ЦВД турбины К-325-23,5.

На рис. 4 представлен вид модернизированной проточной части ЦВД. Конструкция 1-й ступени осталась неизменной, во 2-й ступени применен модернизированный НА, а в остальных ступенях используются новые лопатки как НА, так и РК.

На рис. 5 и рис. 6, *б* показана визуализация результатов расчета в модернизированной проточной части отсека 1-й и 2-й ступеней ЦВД на номинальном режиме.

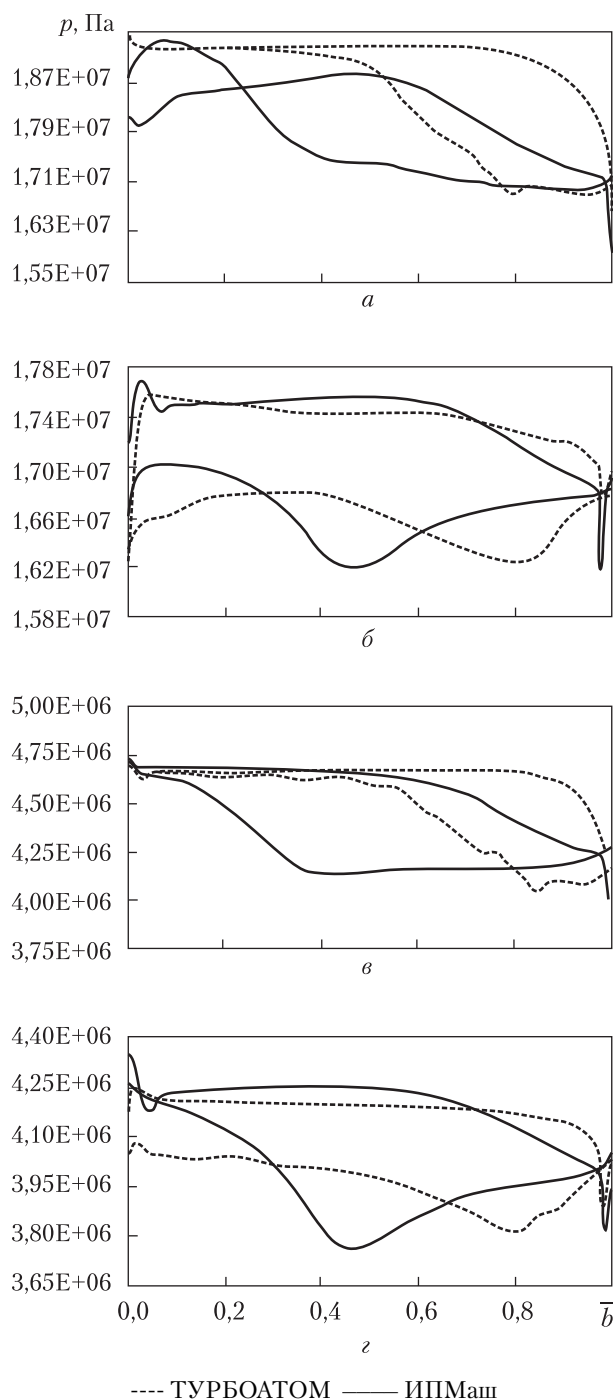


Рис. 8. Распределение давления вдоль поверхности профиля исходных и модернизированных направляющих и рабочих лопаток ступеней ЦВД турбины К-325-23,5: *a* – НА 2-й ступени; *б* – РК 2-й ступени; *в* – НА 12-й ступени; *г* – РК 12-й ступени

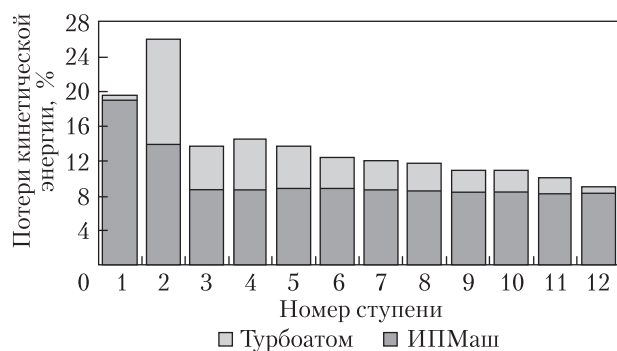


Рис. 9. Потери кінетическої енергії в исходних и модернізованих ступенях ЦВД парової турбіни К-325-23,5

В модернізованій проточній часті суттєво зменшилися отрывні течення во 2-й ступені, внаслідок чого значительно підвищилася ефективність її роботи. Так, втрати кінетическої енергії для 1-й ступені становлять 19,1 %, для 2-й — 14,0 і в двох ступенях — 18,7. Це свідчить про те, що пропонується лопатка НА забезпечує більш сприятливе обтекання при нерасчетних кутах навіювання потоку як в оточуючому напрямленні, так і в меридіональній площині, а також при нерівномірному розподілі параметрів по висоті каналу.

Совершенствование ступеней с 3 по 12 ЦВД, целью которых было снижение потерь кінетическої енергії, проводилось в два етапи. На первом етапі виконані багатоваріантні газодинамічні розрахунки з новими робочими лопатками. Кількість робочих лопаток, по сравнению с исходным вариантом, не змінювалось. На втором етапі здійснювалась заміна исходних направляючих лопаток на нові — с широкохордними профілями. Це дозволило скоротити число направляючих лопаток без шкоди для міцнісних характеристик.

Розрахункові дослідження проводились при тих же граничних умовах, що і в исходних ступенях.

На рис. 7 представлена візуалізація результатів розрахунків модернізованих 3-й і 12-й ступеней ЦВД. На рис. 8 приведено розподілення тиску вздовж поверхностей про-

филей исходных и модернізованих направляючих и робочих лопаток ступеней ЦВД турбіни К-325-23,5. Из представлених результатів видно, що модернізована лопатка решітки НА навантажена більш рівномірно по довжині профілю. В модернізованих лопатках статическе тискування на сторонах розриву і тискування вирівнюється в районі вихідних кромки. Це призводить до зменшенню величини «розриву» потоку на кромках і, як наслідок, до зниженню кромочних втрат.

ОЦЕНКА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕРНИЗОВАННОЙ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ЦВД

На рис. 9 приведено распределение расчетного значения потерь кінетическої енергії по проточній часті ступеней для исходного (ОАО «Турбоатом») и для модернізованного (ИПМаш НАН Украины) ЦВД турбіни К-325-23,5.

Уровень потерь кінетическої енергії в модернізованих ступенях ЦВД снизился с 13,75 до 9,96 %, а КПД ЦВД увеличился с 85,89 до 89,68 %. Прогнозируемая суммарная мощность предлагаемого ЦВД составляет 108,865 МВт, что на 4,374 МВт выше, чем у исходной конструкции (104,491 МВт).

Из представленных результатов исследования видно, что с помощью разработанных в ИПМаш НАН Украины методики проектирования и метода газодинамического расчета за счет совершенствования формы профилей лопаток НА и РК можно существенно снизить потери кінетическої енергії и, соответственно, значительно повысить эффективность ЦВД турбіни К-325-23,5.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны современные инструменты повышения эффективности паровых турбин — метод расчета пространственных течений реальной рабочей среды и способ профилирования лопаточных аппаратов. Их использование

для проектирования проточных частей паровых турбин позволяет находить прогрессивные решения, которые невозможно получить другими, ранее используемыми подходами.

2. За счет использования новой формы лопатки НА 2-ой ступени в разработанной проточной части существенно уменьшились отрывы потока, что привело к снижению потерь кинетической энергии в первых двух ступенях с 24,9 до 18,7 %.

3. Замена профилей лопаток НА и РК ступеней давления на усовершенствованные с учетом модернизации 2-ой ступени позволила повысить суммарный КПД ЦВД с 85,89 до 89,69 %, что дало прирост мощности на 4,37 МВ, т.е. на 4,19 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Русанов А.В., Ершов С.В.* Математическое моделирование нестационарных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин. — Харьков: ИПМаш НАН Украины, 2008. — 275 с.
2. *Русанов А.В., Пащенко Н.В., Косьянова А.И.* Метод аналитического профилирования лопаточных венцов проточных частей осевых турбин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2009. — № 2/7(38). — С. 32—37.
3. *Свідоцтво* про державну реєстрацію прав автора на твір, ПА № 77. Державне агентство України з авторських та суміжних прав. Комплекс програм розрахунку тривимірних течій газу в багатовінцевих турбомашинах «FlowER» / С.В. Єршов, А.В. Русанов. — 19.02.1996.
4. *Lampart P.* Validation of turbomachinery flow solver on turbomachinery test cases / P. Lampart, S. Yerшов, A. Rusanov // International conference SYMKOM'02: Compressor & turbine stage flow path theory, experiment & user verification, Ciepłne Maszyny Przepływowe. Turbomachinery, Politechnika Lodzka, Lodz, Poland. — 2002. — № 122. — P. 63—70.
5. *Хомылев С.А., Резник С.Б., Ершов С.В.* Численное исследование обтекания турбинных решеток профилей: часть 1 — верификация расчетного метода // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. — 2008. — № 6. — С. 23—31.
6. *Бойко А.В., Говорущенко Ю.Н.* Основы теории оптимального проектирования проточной части осевых турбомашин. — Харьков: Вища школа, 1989. — 217 с.

*А.В. Русанов, А.І. Косьянова,
П.М. Сухоребрий, О.М. Хорев*

ГАЗОДИНАМІЧНЕ ВДОСКОНАЛЮВАННЯ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ ЦИЛІНДРА ВИСОКОГО ТИСКУ ПАРОВОЇ ТУРБИНИ К-325-23,5

Наведено результати газодинамічного вдосконалення циліндра високого тиску парової турбіни К-325-23,5. Спроектовано нові направляючі та робочі лопатки вінців ступенів циліндра, проведено газодинамічний розрахунок вихідної та модернізованої проточних частин. Виконано оцінку очікуваного сумарного економічного ефекту від впровадження запропонованих конструкцій.

Ключові слова: парова турбіна, циліндр високого тиску, проточна частина, просторова течія, розрахункові дослідження.

*A.V. Rusanov, A.I. Kosyanova,
P.N. Soukhorebry, O.N. Khoriev*

GAS-DYNAMIC DEVELOPMENT OF STEAM TURBINE K-325-23,5 HIGH-PRESSURE CYLINDER SETTING

The results of gas-dynamic improvement of the high-pressure cylinder of steam turbine K-325-23,5 are presented. New guide and rotor blades of the high-pressure cylinder are designed. Gas-dynamic investigation of the initial and modernized setting is carried out. The assessment of expected total economic effect from application of the offered designs to production is executed.

Key words: steam turbine, high-pressure cylinder, setting, spatial flow, computational investigation.

Стаття надійшла до редакції 31.05.12