

А.В. Русанов, д-р техн. наук, заместитель директора по научной работе (Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков)

Численное исследование и аэродинамическое усовершенствование отсека первых двух ступеней ЦВД паровой турбины

Представлены результаты численного исследования вязких турбулентных течений пара и повышения газодинамической эффективности отсека первых двух ступеней цилиндра высокого давления паровой турбины К-325-23,5. Предложены три варианта модернизации проточной части за счет применения цилиндрических широкохордных лопаток направляющего аппарата второй ступени ЦВД, малочувствительных к нерасчётным углам натекания потока. Выполнен анализ структуры потока, а также сравнение интегральных характеристик исходной и модернизированной конструкций.

Ключевые слова: проточная часть, трехмерное вязкое течение, цилиндр высокого давления, широкохордная лопатка.

Наведено результати чисельного дослідження в'язких турбулентних течій пари та підвищення газодинамічної ефективності відсіку перших двох ступенів циліндра високого тиску парової турбіни К-325-23,5. Запропоновано три варіанти модернізації проточної частини за рахунок використання циліндричних широкохордних лопаток направляючого апарату другої ступені ЦВД, малочутливих до нерозрахункових кутів натікання потоку. Виконано аналіз структури потоку, а також порівняння інтегральних характеристик вихідної та модернізованих конструкцій.

Ключові слова: проточна частина, тривимірна в'язка течія, циліндр високого тиску, широкохордна лопатка.

The results of numerical research of viscous turbulent flows of steam and increase of gas-dynamic efficiency of the compartment, which consists of the first two stages of the high-pressure cylinder of steam turbine K-325-23,5 are presented. Three variants of flowing part modernization at the expense of application of the second stage directing device cylindrical blades which are insensitive to the unsettled angles of the flow accumulation are offered. The analysis of structure of stream, and also comparison of integral descriptions initial and modernized designs is executed.

Keywords: flowing part, three-dimensional viscid flow, cylinder high-pressure, shoulder-blade.

Улучшение структуры потока в отсеке первых двух ступеней оказывает существенное влияние на общее повышение газодинамической эффективности ЦВД. Одним из направлений решения этой задачи является использование лопаток направляющего аппарата (НА) второй ступени, менее чувствительных к нерасчётным углам натекания потока, который существенно изменяется при переходе на частичные (промежуточные) режимы работы турбины.

В статье приведены результаты исследований возможности повышения газодинамической эффективности первых двух ступеней ЦВД паровой турбины К-325-23,5 за счет использования широкохордных лопаток направляющего аппарата второй ступени, которые являются продолжением работ [1, 2, 3, 4].

Объект исследования

В качестве объекта исследования рассмотрены первые две ступени ЦВД турбины К-325-23,5, вид которых представлен на рис. 1, а в табл. 1 – основные геометрические характеристики.

В табл. 2 представлены параметры, характеризующие исследуемые режимы работы первых двух ступеней ЦВД паровой турбины К-325-23,5. Для регулирования режима работы используется парциальный подвод пара через блоки клапанов (секторов) и сопловые

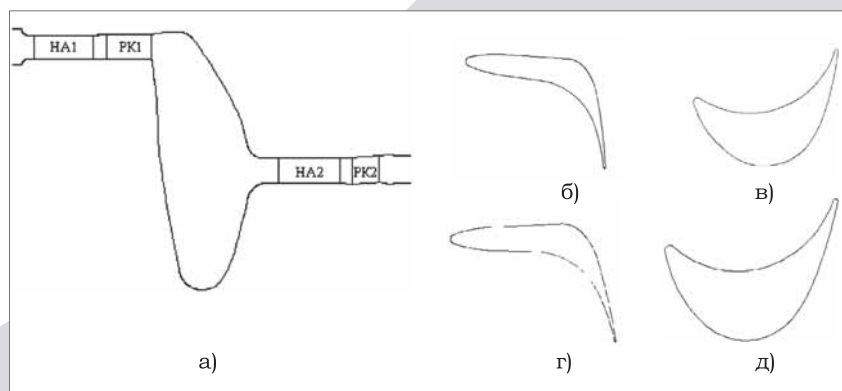


Рис. 1. Проточная часть первых двух ступеней ЦВД паровой турбины. Профили лопаток 1-й и 2-й ступеней: а) меридиональное сечение; б) НА 1-й ступени; в) РК 1-й ступени; г) НА 2-й ступени; д) РК 2-й ступени

Таблица 1. Геометрические характеристики ступеней ЦВД паровой турбины

Параметр	НА1	ПК1	НА2	ПК2
l/b (на среднем диаметре)	0,468 ¹⁾	0,569	0,491 ¹⁾	0,958
D_{cp} , м	1,182	1,183	0,8645	0,8675
t/b (на среднем диаметре)	0,893 ¹⁾	0,814	0,732 ¹⁾	0,722
D/l	39,4	35,8	27,4	25,9
Z , шт	52 ²⁾	78	58	108
$\alpha_{1эф}$, $\beta_{2эф}$, градус	9,85	17,00	12,68	19,82

1) Рассчитано по величине хорды «исходного» профиля ($b=64,1$ мм).

2) Степень парциальности 0,8.

Таблица 2. Граничные условия для расчетов 1-й и 2-й ступеней ЦВД

Параметр	Режим			
	№1	№2	№3	№4
Полное давление перед 1-й ст., МПа	22,80	21,88	20,57	9,051
Полная температура перед 1-й ст., °С	535,5	533,6	538,2	475,0
Статическое давление за 2-й ст., МПа	16,810	13,439	10,822	4,754
Степень парциальности	0,8	0,6	0,4	0,4

коробки перед первой ступенью ЦВД. Парциальный подвод пара приводит к неравномерности потока в окружном направлении в первых ступенях ЦВД турбины, а также к большим динамическим нагрузкам. Камера смешения предназначена для снижения окружной неравномерности потока перед НА второй ступени.

Исследование пространственной структуры течения выполнено с помощью численного моделирования трёхмерных вязких турбулентных течений сжимаемого газа [4, 6]. Метод обладает необходимой достоверностью получаемых результатов как по качественной структуре потока, так и по количественной оценке аэродинамических характеристик проточных частей турбомашин [7, 8].

Расчёты двух ступеней выполнены с использованием уравнения состояния совершенного газа на сетке с суммарным числом 2.232.832 ячеек при условиях, соответствующих номинальному режиму работы турбины – режим №1 и частичным режимам работы – режимы №2, 3, 4. Частота вращения ротора составляет 3000 мин⁻¹.

Результаты исследования

При исследовании простран-

ственной структуры течения установлено, что распределение газодинамических полей и интегральные характеристики являются нестационарными (особенно в первой ступени). В связи с этим для более корректной оценки получаемых результатов выполнен ряд исследований, позволивших выделить периоды пульсаций и вычислить средние (за период) значения газодинамических характеристик.

В табл. 3 представлены газодинамические характеристики исходной конструкции проточной части первых двух ступеней ЦВД для четырёх режимов работы.

Из полученных результатов видно, что при переходе на ча-

Таблица 3. Газодинамические характеристики исходной конструкции проточной части первых двух ступеней ЦВД

Параметр	Исходная конструкция. Режимы работы турбины			
	1	2	3	4
P_{0ex} , МПа	22,8	21,887	20,565	9,051
T_{0ex} , К	808,5	806,6	811,2	748
1-я ступень				
$\xi_{1ст}$, %	19,46	25,09	30,07	29,41
$N_{1ст}$, МВт	10,659	16,882	16,301	7,065
$\alpha_{вex}$, градус	67,87	45,3	37,58	43,92
2-я ступень				
α_{ex} , градус	68,94	60,69	51,38	61,46
$\xi_{2ст}$, %	18,38	16,81	14,36	23,21
$N_{2ст}$, МВт	7,394	8,438	6,558	2,679
Суммарные характеристики 2-х ступеней				
ξ , %	20,52	22,98	26,48	28,3
N , МВт	18,053	25,32	22,859	9,744
G , кг/с	249,741	234,05	188,95	84,556

стичные режимы изменение среднего значения тангенциального угла α_{ex} перед НА 2-й ступени составляет до 20° , что подтверждает необходимость использования лопаток, малочувствительных к нерасчетным углам набегающего потока.

На рис. 2 показана визуализация течения в исследуемой проточной части на номинальном режиме работы турбины. Видно образование значительных отрывов потока как в НА 2-й ступени, так и в РК 1-й

ступени. Область отрывных течений занимает половину межлопаточного канала НА.

Уровень потерь в 1-й ступени является приемлемым, если учесть особенность её конструкции (парциальность и камера смешения). Значение потерь кинетической энергии во второй ступени очень высокое и может быть объяснено в первую очередь наличием существенных зон отрывных течений в камере смешения.

Для всех частичных режимов работы турбины характерны пульсации во времени газодинамических характеристик. При переходе со 2-го к 4-му режиму область отрывных течений в канале РК первой ступени увеличивается, а её размеры в отдельные моменты превышают $2/3$ ширины канала. В отличие от первого режима наблюдается периодическое образование вихрей возле входной кромки лопатки РК, а также их дальнейшее продвижение вдоль канала. Для режимов 3 и 4 обратное течение (вихрь) оканчивается практически возле выходной кромки РК первой ступени, что является основной причиной распространения более существенной тангенциальной неравномерности потока, чем для режимов 1 и 2, в камере смешения.

Картина течения в меридиональной плоскости для режимов 2-4 также характеризуется наличием значительных отрывных зон. Наиболее существенные изменения для различных моментов времени на периоде наблюдаются за выходной кромкой РК первой ступени на расстоянии, равном приблизительно одной ширине лопатки. Переход от номинального к частичным режимам сопровождается смещением струи основного потока в меридиональной плоскости от периферийного к корневому обводу камеры смешения.

Можно предположить, что наиболее существенной причиной пульсаций газодинамических полей и интегральных характеристик в отсеке первых двух ступеней ЦВД являются отрывные течения в канале РК 1-й ступени и камере смешения. Формирование отрывов в канале РК 1 связано с обтеканием входной кромки (большими углами атаки), а в камере смешения – с двумя поворотами канала почти на 90° .

Из приведенных результатов видно, что абсолютный тангенциальный угол потока перед НА 2-й ступени существенно отличается от осевого, что приводит к образованию зоны отрыва в канале НА. В связи с этим предложены три вари-

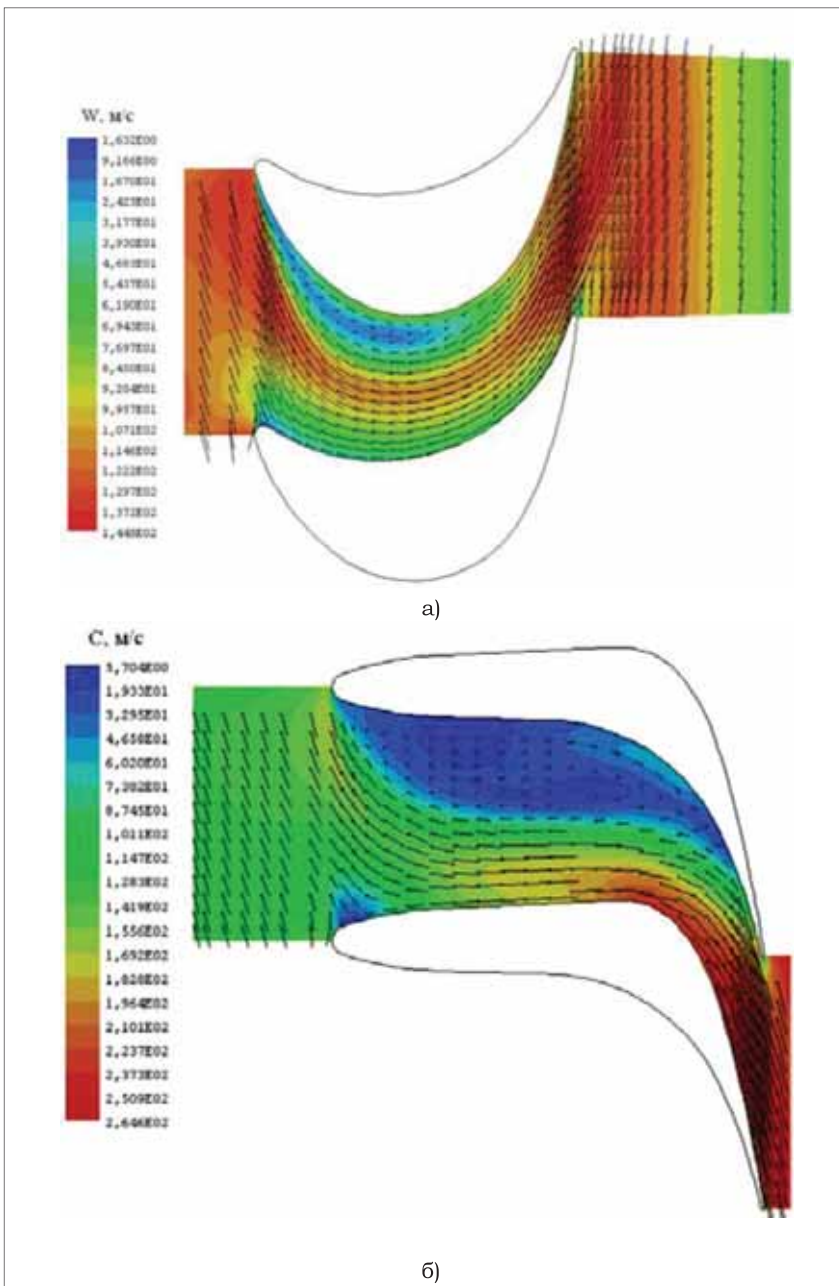


Рис. 2. Изолинии и векторы скорости в среднем сечении канала:
а) РК 1-й ступени; б) НА 2-й ступени

анта лопаток НА 2-й ступени (вариант 1, 2 и 3 модернизированной конструкции), менее чувствительных к среднему по всем режимам углу натекания. За счет того, что предложенные профили НА 2-й ступени выполнены без удлинителя, но при этом сохранена ширина решетки, число лопаток уменьшилось с 58 до: 34 (вариант 1), 25 (вариант 2) и 34 (вариант 3). Вид исходного и модернизированных профилей лопаток НА 2 представлен на рис. 3.

На рис. 4 и 5 приведены результаты расчетов течения в среднем сечении канала РК 1-й ступени и НА 2-й ступени на номинальном режиме работы турбины, а на рис. 6, 7 и 8 – на частичных режимах.

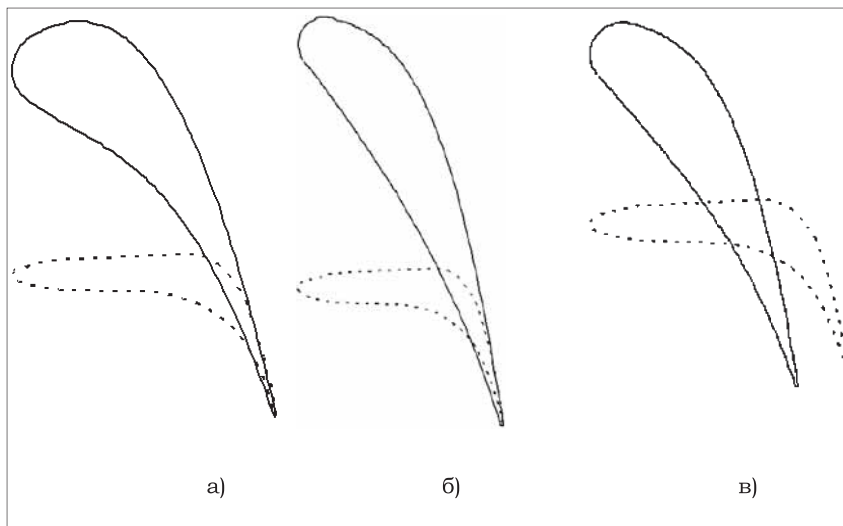


Рис. 3. Профили лопаток НА 2-й ступени: а) вариант 1; б) вариант 2; в) вариант 3; - - - исходный профиль; — — модернизированный профиль

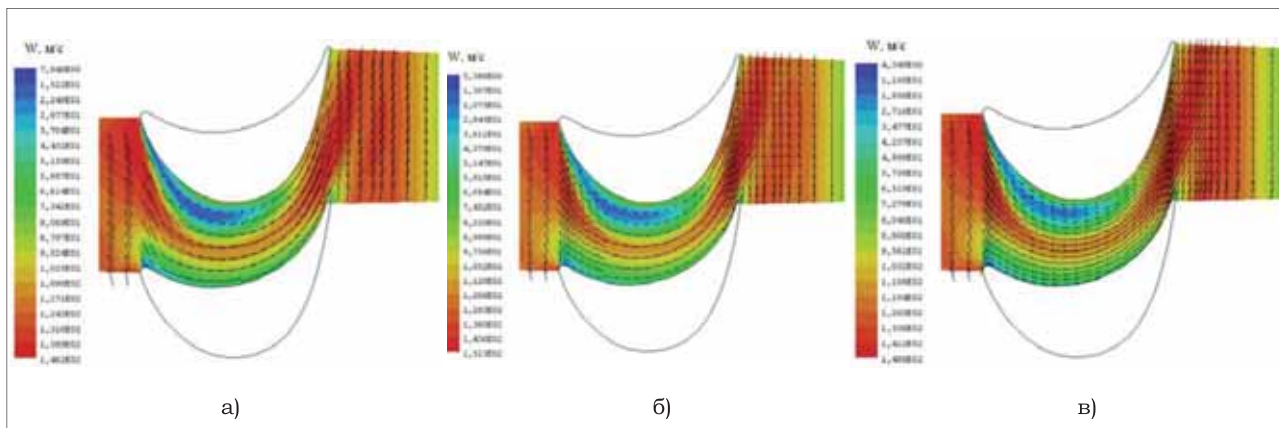


Рис. 4. Изолинии относительной скорости и проекции векторов скорости в среднем сечении канала РК 1-й ступени: а) модернизация 1; б) модернизация 2; в) модернизация 3

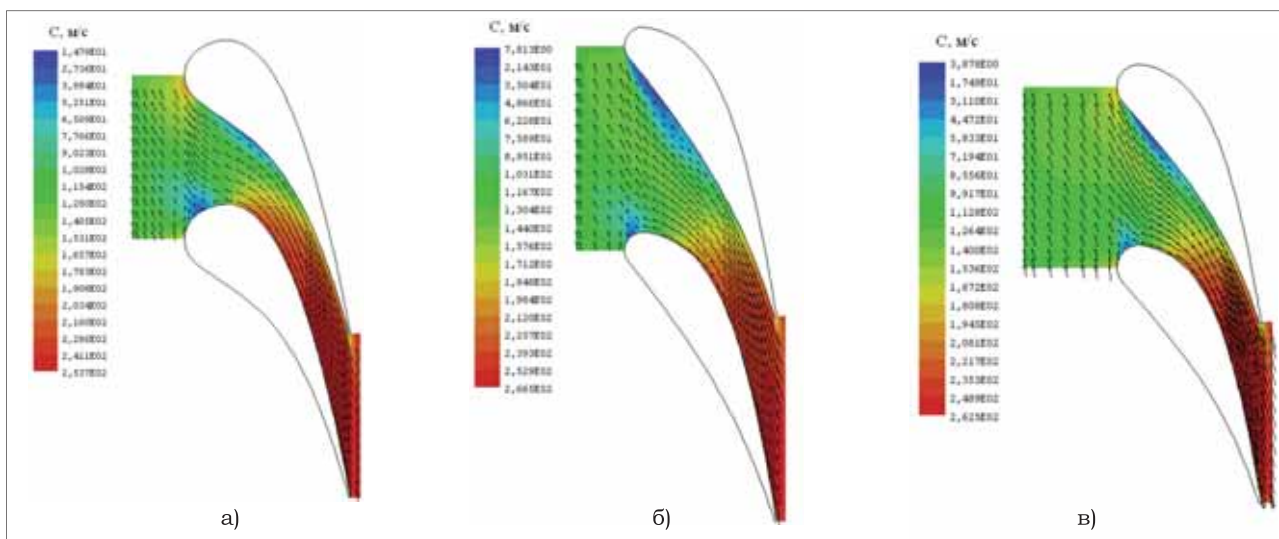


Рис. 5. Изолинии абсолютной скорости и проекции векторов скорости в среднем сечении канала НА 2-й ступени: а) модернизация 1; б) модернизация 2; в) модернизация 3

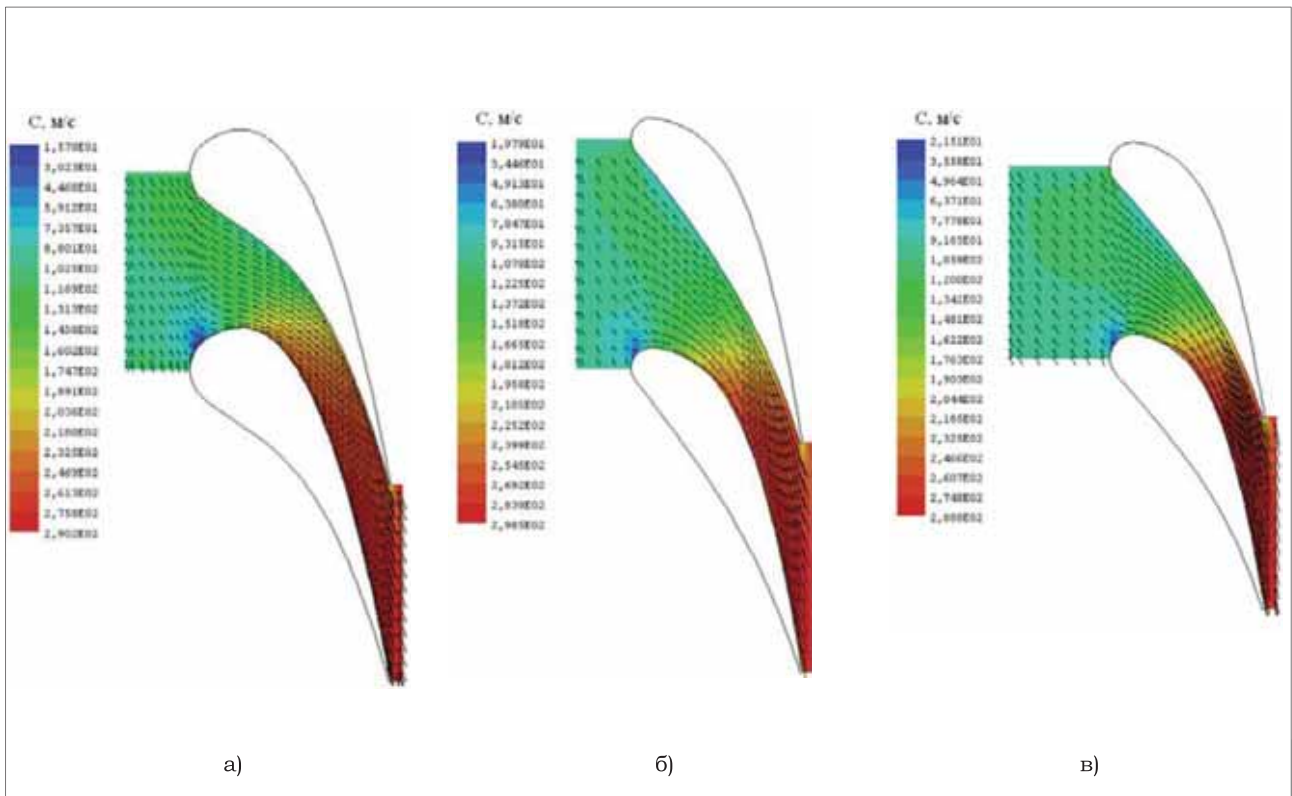


Рис. 6. Режим 2. Изолинии абсолютной скорости и проекции векторов скорости в среднем сечении канала НА 2-й ступени: а) модернизация 1; б) модернизация 2; в) модернизация 3

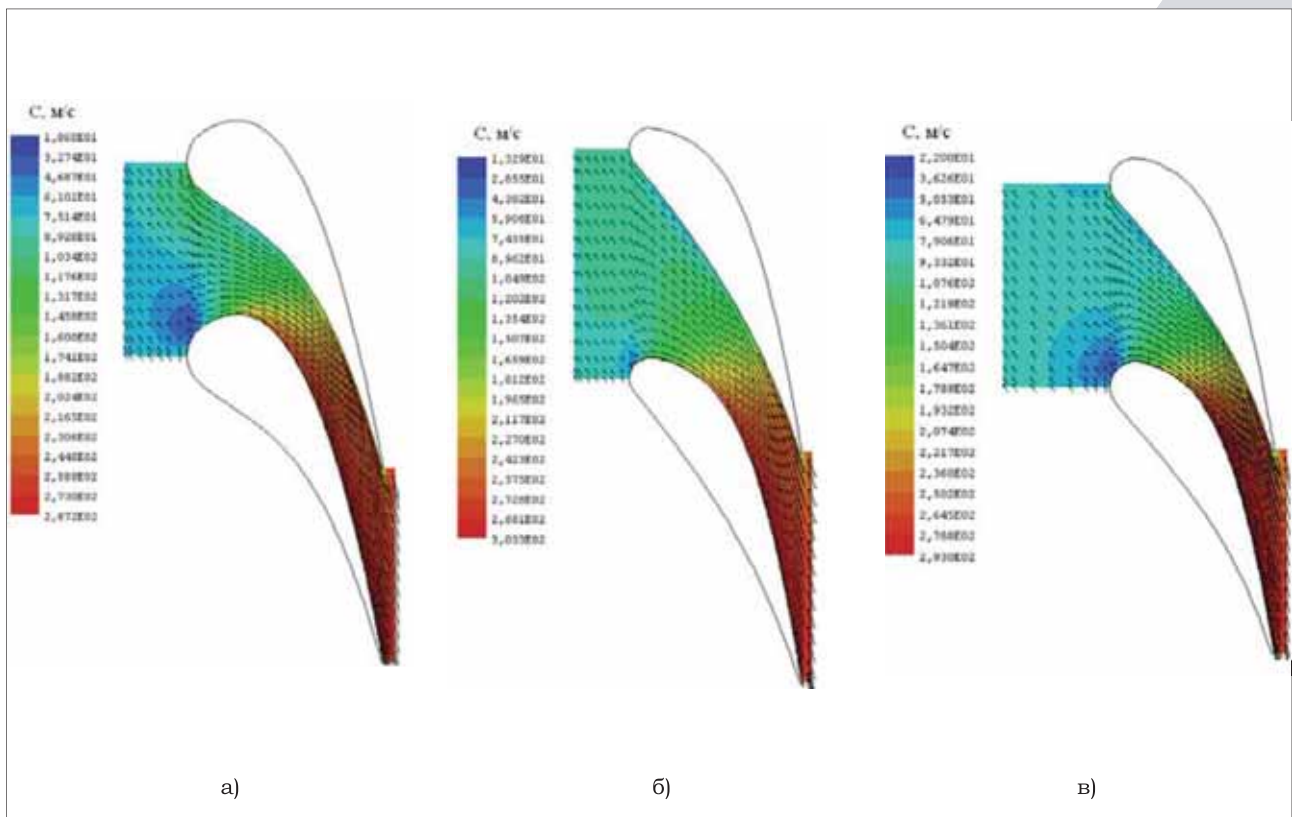


Рис. 7. Режим 3. Изолинии абсолютной скорости и проекции векторов скорости в среднем сечении канала НА 2-й ступени: а) модернизация 1; б) модернизация 2; в) модернизация 3

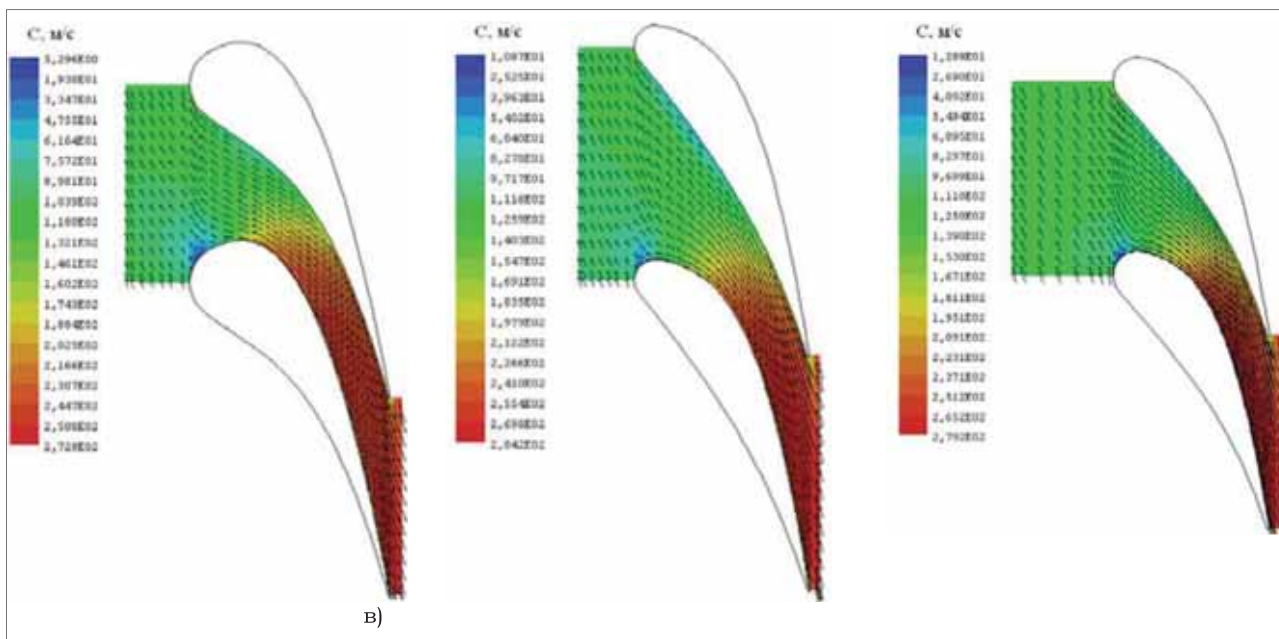


Рис. 8. Режим 4. Изолинии абсолютной скорости и проекции векторов скорости в среднем сечении канала НА 2-й ступени: а) модернизация 1; б) модернизация 2; в) модернизация 3

Видно, что в модернизированных лопатках НА отрывы потока существенно ниже по сравнению с исходной конструкцией, однако при этом размеры отрывных зон в РК 1 остаются значительными.

На рис. 9 приведены интегральные характеристики 3-х вариантов модернизированной конструкции первых двух ступеней ЦВД паровой турбины К-325-23,5, полученные по осреднённым на периоде газодинамическим параметрам.

Использование ширококордной лопатки НА – вариант 1 позволяет снизить суммарные потери кинетической энергии на всех режимах работы на 0,9 – 2,3 %; применение лопатки НА – вариант 2 позволяет для режимов работы 1-3 снизить суммарные потери кинетической энергии на 0,8 – 3,2 %, а для режима 4 потери изменяются в пределах погрешности метода; использование лопатки НА – вариант 3 приводит к уменьшению суммарных потерь кинетической энергии на всех режимах работы на 0,2 – 3,7 %.

На номинальном режиме работы для модернизированных конструкций 1, 2, 3 наблюдается увеличение суммарной мощности на 0,88

МВт, 1 МВт и 1,18 МВт, а также уменьшение потерь кинетической энергии на 0,96, 3,22 и 3,7 % соответственно. Каждая из модернизаций позволяет улучшить газодинамические характеристики второй ступени ЦВД. Однако использование разработанных лопаток не приводит к снижению уровня нестационарных пульсаций в отсеке первых двух ступеней ЦВД. Так, амплитуды пульсаций мощности для номинального режима работы достигают 1,45 %, а для частичных режимов – до 30 % для исходной конструкции и для модернизированных конструкций. По-видимому, для уменьшения нестационарных пульсаций необходимы как уменьшение теплового перепада на регулирующей ступени (на частичных режимах работы), так и модернизация конструкции камеры смещения.

Выводы

На основании исследований и анализа структуры течения в первых двух ступенях ЦВД паровой турбины К-325-23,5 с учетом нестационарных газодинамических явлений предложено три варианта модернизации конструкции лопаток НА 2, лучший из которых (ва-

риант 2) позволяет снизить потери кинетической энергии на 0,8 – 3,2% и увеличить мощность на 0,32 МВт – 1,45 МВт в зависимости от режима работы.

Для уменьшения нестационарных газодинамических пульсаций и повышения КПД отсека первых двух ступеней в дальнейшей работе планируется выполнить модернизации лопаток РК 1 и камеры смещения.

Список литературы

1. Русанов А.В. Повышение эффективности работы 2-й ступени ЦВД турбины К-325-23,5 при работе на нерасчетных углах обтекания потока / А.В. Русанов, Е.В. Левченко, В.Л. Швецов, А.И. Косьянова // Вестник НТУ "ХПИ". – Харьков, 2010. Вып. 3. – С. 12–18.
2. Русанов А.В. Повышение газодинамической эффективности первых двух ступеней ЦВД турбины К-325-23,5 / А.В. Русанов, Е.В. Левченко, В.Л. Швецов, А.И. Косьянова // Компрессорное и энергетическое машиностроение, 2011. – №1(23) – С. 28-32.
3. Русанов А.В. Оценка возможности применения поворотных ло-

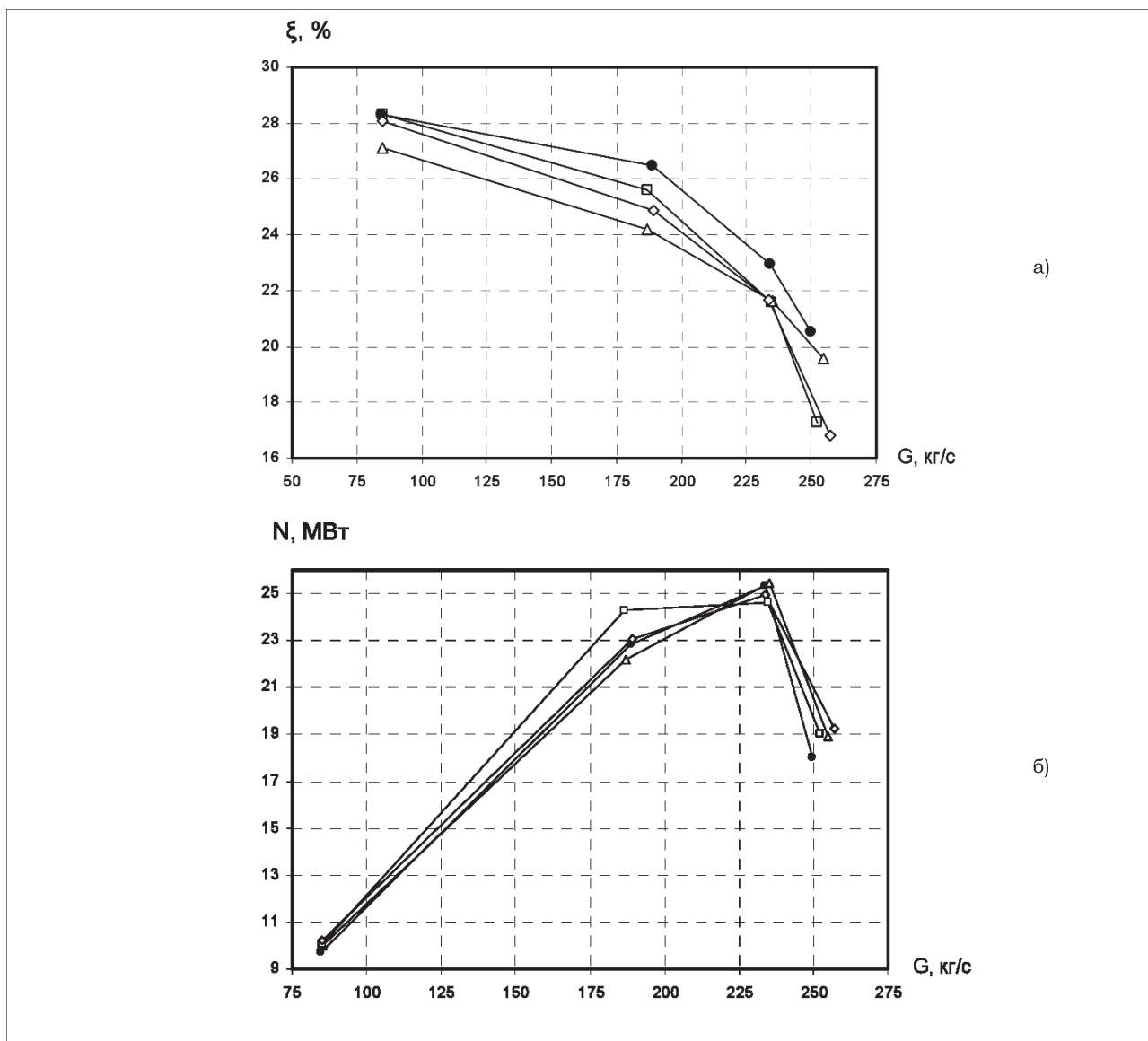


Рис. 9. Сравнение интегральных характеристик исходной и модернизированной конструкций:
 —●— исходная конструкция; —Δ— модернизация 1; —□— модернизация 2; —◇— модернизация 3

потоков направляющего аппарата ступеней осевого и радиально-осевого типов ЦВД для регулирования режима работы паровой К-325-23,5 / А.В. Русанов, А.И. Косьянова // Вестник НТУ "ХПИ". – Харьков, 2012. Вып. 7. – С. 39–48.

4. Русанов А.В. Газодинамическое совершенствование проточной части цилиндра высокого давления паровой турбины К-325-23,5 / А.В. Русанов, А.И. Косьянова, П.Н. Сухоробрый, О.Н. Хорев // Наука та інновації. – 2013. – 9, № 1. – С. 33–40.

5. Свідомство про державну реєстрацію прав автора на твор,

ПА № 77. Державне агентство України з авторських та суміжних прав. Комплекс програм розрахунку тривимірних течій газу в багатовісцевих турбомашин "FlowER" / С.В. Єршов, А.В. Русанов. – 19.02.1996.

6. Русанов А.В. Математическое моделирование нестационарных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин / А.В. Русанов, С.В. Ершов // Монография. – Харьков, ИПМаш НАН Украины, 2008. – 275 с.

7. Lampart P. Validation of turbomachinery flow solver on turbomachinery test cases / P.

Lampart, S. Yershov, A. Rusanov // International conference SYMKOM'02: Compressor & turbine stage flow path theory, experiment & user verification, Ciepłne Maszyny Przepływowe. Turbomachinery, Politechnika Lodzka, Lodz, Poland. – 2002, No. 122. – P. 63–70.

8. Хомылев С.А. Численное исследование обтекания турбинных решеток профилей: часть 1 – верификация расчетного метода / С.А. Хомылев, С.Б. Резник, С.В. Ершов // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование, 2008. – № 6. – С. 23–31.