

УДК 621.165
DOI: 10.12737/24895

А.А. Кондратьев, В.А. Рассохин, С.Ю. Олейников, Е.А. Кондратьева, А.В. Осипов

РАЗВИТИЕ ПАРОВЫХ ТУРБИН НА СВЕРХКРИТИЧЕСКИЕ И СУПЕРСВЕРХКРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПАРА

Рассмотрены основные этапы развития парового турбостроения на сверхкритические и суперсверхкритические параметры пара на входе в турбину. Описана опытно-промышленная эксплуатация паровой турбины СКР-100-300. Приведена оценка эффективности перехода к суперсверхкритическим параметрам по ряду факторов. Представлены результаты расчетного исследования серийной паровой турбины К-300-240 с целью по-

лучения более высокого значения КПД в регулирующей ступени. Предложена и обоснована конструкция регулирующей ступени на базе профилей ЛПИ.

Ключевые слова: паровые турбины, начальные параметры пара, КПД турбоустановки, регулирующая ступень, оптимизационный расчет, математическая модель.

A.A. Kondratiev, V.A. Rassokhin, S.Yu. Oleinikov, E.A. Kondratieva, A.V. Osipov

STEAM TURBINE DEVELOPMENT FOR SUPERCRITICAL STEAM PARAMETERS

The paper reports the expediency and substantiation of the necessity for the gradual transition to power units on supercritical steam parameters in world power engineering. Basic stages in the development of steam turbine manufacturing with supercritical steam parameters are considered. The parameter increase at the input makes a profound impact upon the design of a flowing part of turbines. To operate a great difference in enthalpies in a cylinder without changing stages number one has to modernize them and sometimes to change the design completely. In the paper there is considered the expediency of the application of axial high-loaded stages developed by the Polytechnics of Leningrad (LPI). There are also described the stages of designing steam turbine plants

with critical and supercritical steam parameters at the input in a turbine. As an example there is analyzed SKR-100-300 steam turbine with the initial steam parameters of 29.4MPa and 650S. The results of solution computations directed to the efficiency increase of a regulatory stage of K-300-240 steam turbine with supercritical parameters of 580C and 29.0 MPa are presented. The application as a profile of an impeller the blade design of LPI allows increasing turbine plant efficiency in a wide range of mode parameters and also reducing a general number of turbine stages.

Key words: steam turbine, initial steam parameters, turbine efficiency factor, adjusting stage, optimization computation, simulator.

Введение

История развития энергетики – это история повышения начальных параметров пара. С начала 60-х годов XX века в СССР и других энергетически развитых странах начался быстрый переход от докритических и критических параметров пара $P_0=3,0...17,0$ МПа, $T_0=400...540^\circ\text{C}$ к сверхкритическим (СКД) $P_0=24...24,7$ МПа, $T_0=545...565^\circ\text{C}$. К концу 80-х годов энергетика СССР имела большой опыт освоения и использования энергоблоков СКД, чем какая-либо другая страна. Переход к энергоблокам СКД происходил довольно трудно, в борьбе мнений ведущих

специалистов энергетической отрасли. И только приобретенный опыт энергетики всего мира окончательно доказал целесообразность и эффективность их использования. В настоящее время промышленная теплоэнергетика уже сделала реальные шаги к последовательному переходу к энергоблокам на суперсверхкритические параметры (ССКП) $P_0=29,0$ МПа, $T_0=580^\circ\text{C}$. Из публикаций зарубежных компаний имеется информация о разработках турбин на начальную температуру пара $T_0=720^\circ\text{C}$.

Целесообразность постепенного перехода к энергоблокам на суперсверхкритические параметры пара

Повышение начальных параметров пара – это один из наиболее эффективных способов повышения КПД теплоэлектростанций (ТЭС). Для стран, таких как Россия, где климатические условия позволяют иметь глубокий вакуум в конденсаторе, главными мерами являются повышение параметров пара и введение второго пром-перегрева, благодаря которому достигается экономия топлива до 4-7% и уменьшается конечная влажность пара в последних ступенях турбины. Следует отметить, что повышение параметров дает эффект независимо от типа используемого топлива.

Повышение начальных параметров при традиционном способе сжигания – это наиболее простой и действенный способ вовлечения в энергетику твердого топлива, запасов которого хватит на сотни лет. Нет

сомнения в том, что твердое топливо будет в перспективе вытеснять жидкое и газообразное.

Переход к ССКП дает значительный эффект не только в традиционных технологиях сжигания топлива, но и во всех комбинированных парогазовых технологиях с развитой паротурбинной частью. Ведутся работы по использованию пара СКД и ССКП в паротурбинной части утилизационных парогазовых установок (ПГУ).

Не стоит забывать о том, что повышение параметров пара и, как следствие, уменьшение тепловых выбросов – перспективный и взвешенный путь решения экологической проблемы глобального потепления климата[2].

История освоения суперсверхкритических параметров пара

Интерес к повышению начальных параметров существовал всегда. Он увеличивался всякий раз с ростом цен на топливо и появлением новых, более жаропрочных материалов и снижался с появлением более дешевых видов топлива, например ядерного. История освоения ССКП насчитывает более 50 лет. Она берет начало с создания в США энергоблока Эддистоун-1 мощностью 325 МВт на параметры пара 35,9 МПа, 648°C/565°C/565°C.

В 1966 г. на Каширской гидроэлектростанции (ГРЭС) началась первая опытно-промышленная эксплуатация паровой турбины СКР-100-300, построенной Харьковским турбинным заводом (ХТЗ) на начальные параметры 29,4 МПа, 650°C с противодавлением 3,03 МПа. В течение нескольких лет наша энергетика получала уникальный опыт работы на ССКП. В этот период была проверена эксплуатационная надежность основных элементов паротурбинных установок (ПТУ), выполненных из различных сталей аустенитного класса, исследованы их температурные режимы. Среди многих грамотных технических решений, использованных в турбине СКР-100-300, особое место занимает система

охлаждения ротора, разработка которой представляет серьезную проблему и сегодня. Результаты работы энергоблока на Каширской ГРЭС дали полное основание сделать вывод о технической возможности создания надежных и высокоэффективных паровых котлов и турбин для энергоблоков мощностью 800 МВт и более на начальные параметры 30,0 МПа, 650°C. Было выполнено расчетное обоснование и эскизное проектирование котла паропроизводительностью 2400 т/ч на кузнецком угле и турбины типа К-800-30-650 с промежуточным перегревом до 565°C. С учетом ряда дополнительных усовершенствований энергоблок К-800-30-650 должен был дать экономии до 130 тыс. тонн условного топлива в год по сравнению с типовым энергоблоком К-800-23,5.

Первым энергоблоком ССКП нового поколения стал энергоблок Кавагое-1 на параметры 30,5 МПа, 566°C/566°C/566°C. Физический пуск был осуществлен в конце 1988 г., а с 30 июня 1989 г., после проведения необходимых испытаний, началась промышленная энергетическая эксплуатация блока. Уже через 3 года введен в работу энергоблок Кавагое-2. В апреле 1993

г. состоялся энергетический пуск блока Хекинен-3 (Япония) мощностью 700 МВт на параметры пара 25,0 МПа, 538°С/593°С. Эксплуатация этих блоков позволила детально изучить вопросы разработки и совершенствования турбин ССКП в области аэродинамики проточной части, техноло-

гий охлаждения турбинных лопаток, а также стала толчком для разработки и внедрения новых материалов.

В настоящее время практически все ведущие турбостроительные заводы создают паровые турбины ССКП нового поколения.

Перспективы российских турбостроительных заводов на примере Ленинградского металлического завода (филиала ОАО «Силовые машины»)

Ленинградский металлический завод (ЛМЗ) относится к числу ведущих фирм по разработке и производству энергетических паровых турбин как у нас в стране, так и за рубежом. В течение последних лет, совершенствуя энергетическое оборудование и тепловые схемы, увеличивая мощность вплоть до 1200 МВт, отечественная энергетика заняла одно из лидирующих мест в мире по конструированию турбин на сверхкритические параметры пара, позволяющие существенно повысить КПД энергоблоков. Достижение высоких показателей паротурбинных блоков обеспечивалось прежде всего за счет проведения комплексных исследований головных образцов турбин в период их испытаний и при вводе в эксплуатацию. Именно тогда выявлялись конструкторские, технологические и эксплуатационные недостатки, устранение которых способствовало повышению технико-экономических показателей выпускаемого оборудования. Достигнутые показатели не уступали лучшим образцам аналогичного зарубежного оборудования.

Глобальной возможностью в повышении тепловой экономичности ТЭС является повышение начальных параметров пара. Увеличение температуры свежего пара и пара после промперегрева на каждые 10°С позволяет выиграть в экономичности 0,5%, а при повышении давления пара на 1,0 МПа экономичность увеличивается на 0,2%. Эти показатели подтверждены на ряде энергетических промышленных установок с применением паровых турбин ССКП. Изменение начальных параметров пара дает существенные возможности в повышении технико-экономических показателей ПТУ (рис. 1).

На сегодняшний день ОАО «Силовые машины» имеет портфель заказов на

турбины с повышенными параметрами пара, в том числе для индийских станций «Сипат» и «Барх». Первые турбины из этой серии уже изготовлены и введены в промышленную эксплуатацию. Конструкция и основные характеристики турбоагрегата представлены на рис. 2. В части цилиндра высокого давления (ЦВД) применена схема с реактивным облопачиванием. Проточная часть цилиндра среднего давления (ЦСД) выполнена двухпоточной. Цилиндр низкого давления (ЦНД) может быть выполнен с лопатками последней ступени длиной 960, 1000 или 1200 мм в зависимости от условий эксплуатации.

Рабочие лопатки длиной 1200 мм последней ступени ЦНД изготовлены из титанового сплава. Ленинградский металлический завод и Завод турбинных лопаток стали первыми в мире, кто освоил и внедрил лопатки такой высоты в серийное производство. А успешный ввод этих турбин в производство стал начальным этапом освоения суперсверхвысоких параметров для нашего энергомашиностроения [5].

Решающей задачей для создания энергоблока на ССКП является освоение линейки материалов с необходимыми характеристиками длительной прочности и малоциклового усталости. Головными материаловедческими институтами и организациями ведется большая работа по разработке российских марок стали для турбин с суперсверхкритическими параметрами свежего пара. В свою очередь ОАО «Силовые машины», имея колоссальный опыт в области конструирования, производства и ввода в эксплуатацию ПТУ различной мощности, готово к масштабному внедрению новейших достижений в области энергетического турбостроения при созда-

нии современных конкурентоспособных агрегатов. В соответствии с государственными инвестиционными программами развития энергетического машиностроения в ОАО «Силовые машины» большое внимание уделяется научным исследованиям,

направленным на разработку самых современных технических решений и уникальных технологий в области турбостроения для обеспечения уровня мировых технико-экономических показателей энергетического оборудования.

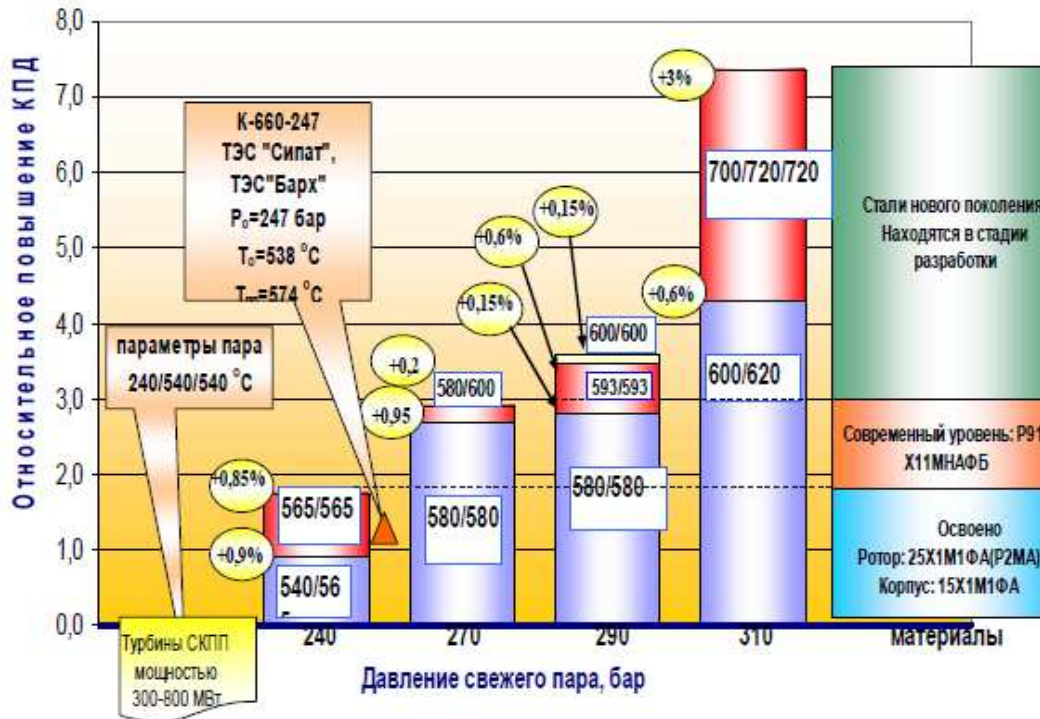


Рис. 1. Увеличение относительного КПД энергоблоков в зависимости от повышения параметров пара на входе в турбину и после промперегрева

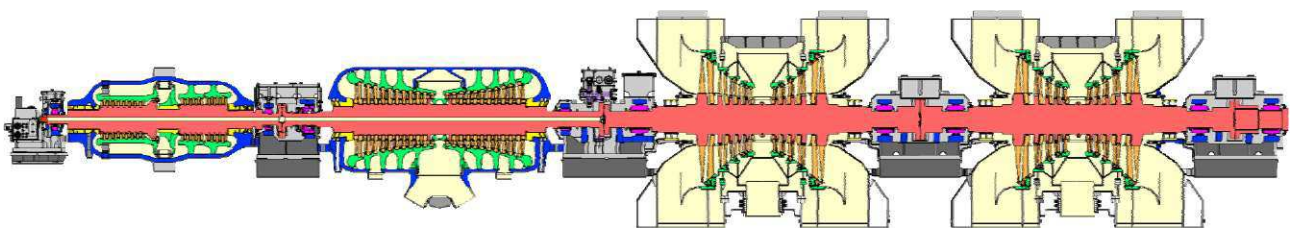


Рис. 2. Паровая турбина К-660-247

(электрическая мощность – 660 МВт, давление свежего пара – 25,0 МПа, температура свежего пара - 537°С, давление промперегрева – 4,86 МПа, температура промперегрева – 574°С, расход пара – 2024,0 т/ч)

Обоснование необходимости энергоблоков на суперсверхкритические параметры пара в мировой энергетике

Эффективность перехода к ССКП необходимо оценивать по многим факторам: технико-экономическим показателям, инвестированию на начальной стадии, эксплуатационным затратам, экологичности, возможности работы на частичных нагрузках. Важно, что все оценки необходимо делать в сравнении с альтернативными установками, такими как: ПГУ с

внутрицикловой газификацией, ПГУ с циркулирующим кипящим слоем, утилизационные ПГУ. Целесообразность повышения параметров пара обоснована в десятках работ. Обратимся к данным, где положительный эффект представлен в наиболее наглядной форме (рис. 3).

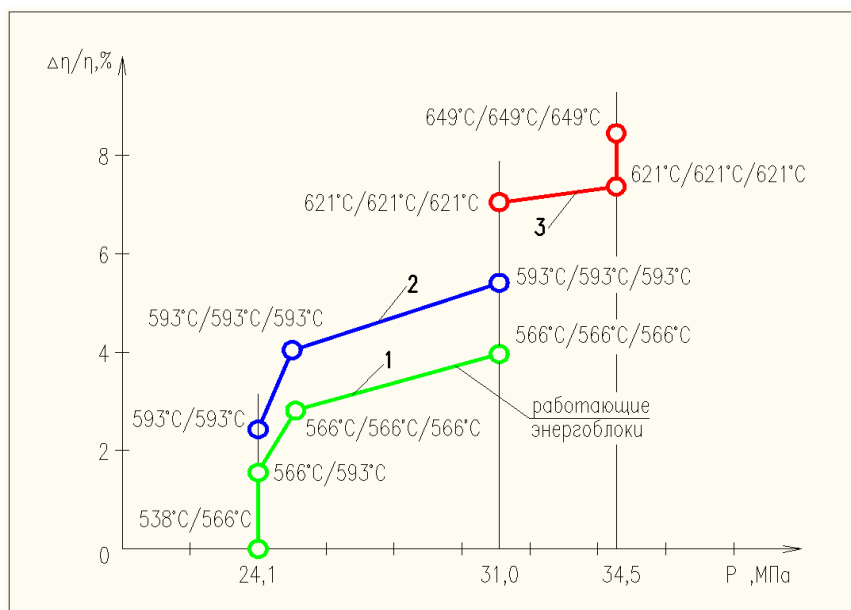


Рис. 3. Относительное повышение КПД турбинной установки по отношению к КПД турбин с параметрами 24,1 МПа, 538°C

В рамках температур, уже освоенных в мировой практике (566°C), при переходе от 24,1 до 31,0 МПа и введении второго промперегрева (566°C/566°C/566°C) относительное повышение КПД составит 4% в сравнении с параметрами 24,1 МПа, 538°C/566°C. Эффект будет таким же, если поднять температуры перед цилиндрами до 593°C, незначительно увеличивая давление на входе в турбину. Дальнейшее увеличение начального давления и температуры, а также увеличение температуры после промперегрева ведет к однозначному повышению КПД ПТУ и энергоблока в целом. Представленные на рис. 3 расчетные данные полностью подтверждены при испытаниях и в период

работы на мощности энергоблоков Кавагое-1 и Кавагое-2, на которых получена экономия топлива в 5,3% по сравнению с обычными энергоблоками СКД на параметры 24,0 МПа, 538°C/566°C.

Повышение параметров на входе оказывает существенное влияние на конструкцию проточной части турбин. Для того чтобы сработать больший перепад энтальпий в цилиндре, не меняя количества ступеней, приходится модернизировать их, а иногда и полностью менять конструкцию. В такой ситуации целесообразно рассмотреть применение высоконагруженных ступеней осевого типа конструкции Ленинградского политехнического института (ЛПИ).

Турбины конструкции ЛПИ: преимущества, характеристики, опыт разработки и реализация

Жесткая конкуренция в современной энергетике заставляет одновременно со снижением стоимости установок стремиться к повышению их термодинамической эффективности. Совершенствование характеристик проточных частей паровых турбин в ближайшем будущем будет связано с повышением срабатываемого в одной ступени перепада энтальпии при сохранении высокого КПД. Эта задача актуальна не только для энергетических установок средней и малой мощности, но и для

мощных паровых турбин.

Гарантией успешного внедрения турбинных ступеней конструкции ЛПИ являются методы оптимального проектирования и профилирования. Они разработаны на основе обобщения результатов теоретических и экспериментальных работ. В широком интервале изменения геометрических и режимных параметров было исследовано свыше 70 профилей сопловых и рабочих лопаток и более 100 турбинных ступеней осевого и радиального

типов. На базе этих методов созданы программные комплексы одно- и многорежимной оптимизации турбин нового класса, в том числе и на заданные графики нагрузок. Экспериментально (на натуральных и модельных стендах) доказана возможность срабатывания ступенями конструкции ЛПИ осевого и радиального типов больших перепадов энтальпии при сохранении высокой экономичности за счет снижения потерь при сверх- и трансзвуковых скоростях потока, а также потерь на выходе [3].

Для модернизации паровых турбин на базе профилей ЛПИ разработаны конструкции высоконагруженных одно- и двухвенечных регулирующих ступеней. Их использование позволит повысить эффективность всей турбины в широком диапазоне режимов работы при заметном сокращении общего числа ступеней. Проточную часть паровых турбинных ступеней конструкции ЛПИ характеризуют малые значения углов. Так, использование соплового аппарата (СА) с $\alpha_1=5^\circ$ обеспечивает увеличение высоты лопатки или степени парциальности в 3 раза (по сравнению с $\alpha_1=15^\circ$ при неизменном диаметре) либо дает возможность во столько же раз

(с целью снижения числа ступеней) увеличить диаметр и, следовательно, окружную скорость при неизменной высоте лопатки. Таким образом, удается снизить коэффициент потерь энергии – либо вторичных, либо дополнительных от парциальности [1].

Работами сотрудников кафедры «Турбины, гидромашины и авиационные двигатели» СПбПУ и Дрезденского технического университета экспериментально доказано снижение эрозионного износа сопловых и рабочих лопаток ЛПИ по сравнению с лопатками традиционного типа. Исследования по созданию нового класса регулирующих ступеней паровых турбин мощностью до 5...6 МВт, проведенные совместно с предприятием «Siemens», показали значительное преимущество турбин ЛПИ, особенно двухступенчатых, перед регулирующими ступенями фирмы «Siemens». Использование разработок кафедры «Турбины, гидромашины и авиационные двигатели» позволит не только повысить экономичность всей турбины, но и сократить число ступеней давления [6].

Расчетное исследование с целью определения возможности срабатывания в серийной паровой турбине К-300-240 большего перепада энтальпий в РС при более высоком значении КПД за счет изменения ее конструкции при повышении параметров пара до суперсверхкритических $T_0=580^\circ\text{C}$, $P_0=29,0$ МПа

Повышение начальных параметров пара на входе в турбину – это один из самых эффективных способов повышения КПД турбоустановки. Для примера мы рассмотрим модернизацию серийной паровой турбины К-300-240 путем применения в качестве регулирующей ступени ЦВД ступени конструкции ЛПИ и увеличения параметров пара на входе до суперсверхкритических.

На основании предварительного выбора геометрических и режимных параметров турбины были определены исходные данные для проведения оптимизационных расчетов турбины (рис. 4). Расчеты проводились по программе ONE для одноступенчатой турбины конструкции ЛПИ, разработанной на кафедре «Турбины, гидромашины и авиационные двигатели» СПбПУ.

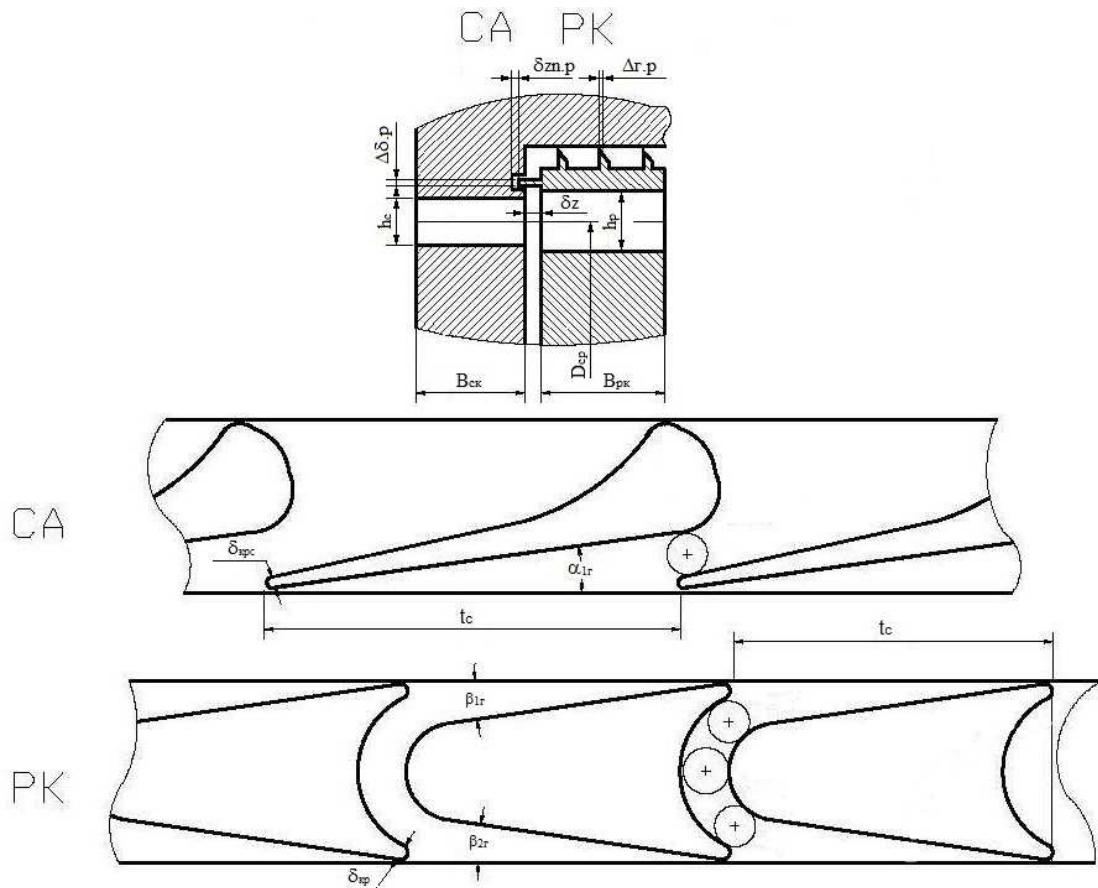


Рис. 4. Проточная часть РС натурной паровой турбины конструкции ЛПИ

В основу программы ONE заложены экспериментальные характеристики потерь кинетической энергии в СА и рабочем колесе (РК) турбины, исследованные в широком диапазоне режимных и геометрических параметров. Математическая модель одноступенчатой турбины конструкции ЛПИ (рис. 5) представляет собой законченный моделирующий алгоритм, составленный из отдельных блоков, в которых описываются процессы в проточной части турбины с учетом их связей и взаимного влияния. Блочная модель элемента проточной части

содержит в себе основные уравнения, описывающие термогазодинамические процессы, подмодель определения коэффициентов потерь энергии и расхода, а также вычислительные процедуры решения уравнений, аппроксимации и логического развертывания. Коэффициенты потерь энергии и коэффициенты расхода однозначно определяются в зависимости от геометрических и режимных параметров, циркулирующих в модели, и представляются в виде эмпирических зависимостей, удобных для расчета на ЭВМ [4].

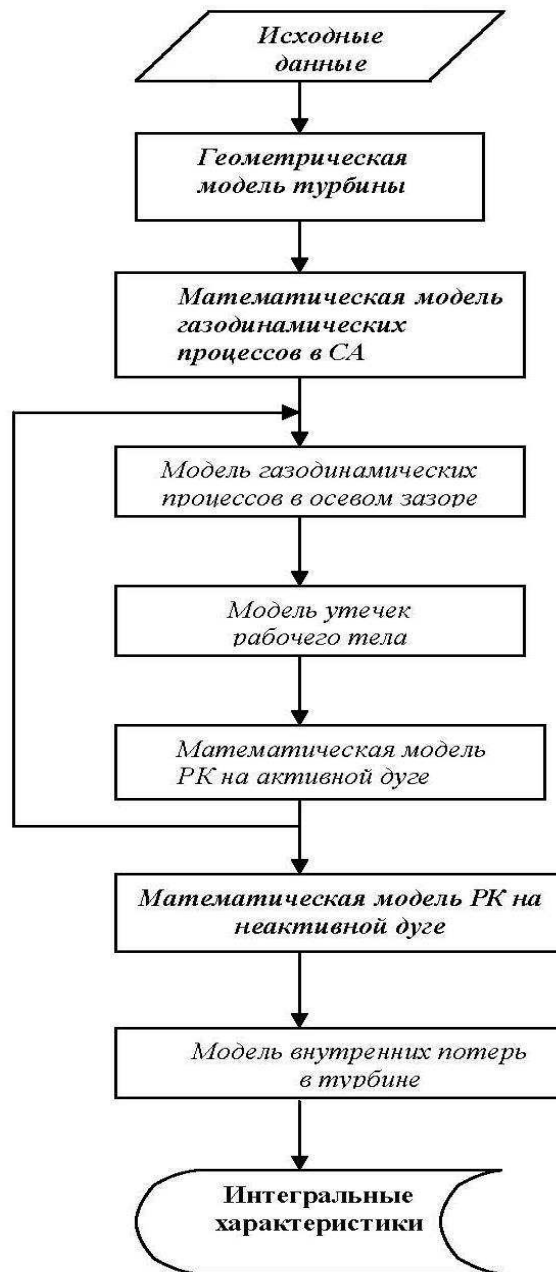


Рис. 5. Расчетная схема математической модели турбины

Входные данные для расчета натурной РК паровой турбины на параметры пара $T_0 = 580^\circ\text{C}$, $P_0 = 29,0$ МПа в программе ONE приведены в табл. 1.

При выборе оптимальных параметров варьировались следующие геометрические величины:

– высота сопловой лопатки СА – $h_c = 0,020 \dots 0,028$ м;

– геометрическая степень расшире-

ния СА – $f_5 = 1 \dots 1,5$;

– высота рабочей лопатки РК – $h_{p1} = 0,023 \dots 0,034$ м;

– угол входа в РК – $\beta_{1r1} = 7 \dots 12^\circ$;

– угол выхода из РК – $\beta_{2r1} = 7 \dots 12^\circ$.

Кроме того, варьировались величины осевых и радиальных зазоров, ширины и число лопаток.

Таблица 1

Входные данные для расчета натурной РС паровой турбины

Параметр	Обозначение		Размерность	Величина
	в программе	в тексте		
Открытый осевой зазор на периферии	$\delta_{zn.p}$	$\delta_{zn.p}$	м	0,00248
Осевая толщина гребня бандажного уплотнения	$\Delta_{г.р}$	$\Delta_{г.р}$	м	0,000248
Межвенцовый зазор	δz	δz	м	0,0033
Высота сопловой лопатки	h_c	h_c	м	0,0235
Угол выхода из соплового аппарата	$\alpha_{1г}$	$\alpha_{1г}$	град	5,0
Толщина выходной кромки лопатки соплового аппарата	$\delta_{крс}$	$\delta_{крс}$	м	0,00124
Высота лопатки рабочего колеса	h_p	h_p	м	0,027
Ширина лопатки рабочего колеса	$B_{рк}$	$B_{рк}$	м	0,03
Количество лопаток в рабочем колесе	z_p	z_p	шт.	75
Угол входа в рабочее колесо	$\beta_{1г}$	$\beta_{1г}$	град	11,2
Угол выхода из рабочего колеса	$\beta_{2г}$	$\beta_{2г}$	град	11,0
Толщина входной и выходной кромок рабочей лопатки	$\delta_{кр}$	$\delta_{кр}$	м	0,00124
Средний диаметр регулирующей ступени	$D_{ср}$	$D_{ср}$	м	1,188

В табл. 2 представлены результаты расчета РС паровой турбины на параметры

пара $T_0=580^\circ\text{C}$, $P_0=29,0\text{МПа}$ (оптимальный вариант на номинальном режиме).

Таблица 2

Результаты расчета РС паровой турбины на номинальном режиме

Параметр	Обозначение		Размерность	Величина
	в программе	в тексте		
Степень реактивности	RO	ρ_T	-	0,05
Число U/C_0	U/C_0	U/C_0	-	0,346
Внутренний КПД турбины	КПД внутр	η_v	-	0,765
Внутренняя мощность турбины	$N_{внутр}$	N_v	кВт	20606,5
Теоретическая (располагаемая) мощность турбины	$N_{теор}$	$N_{расп}$	кВт	27661,52

Заключение

Целью расчетного исследования было получение максимального КПД регулирующей ступени при заданных начальных параметрах пара на входе и значении давления на выходе из ступени P_2 на номинальном режиме. В рамках расчетного ис-

следования показано, что при увеличении параметров пара на входе до суперсверхкритических возможно сработать больший перепад энтальпий в РС при более высоком значении КПД (76,5% по сравнению с 74,5% у серийной паровой турбины К-300-

240) за счет изменения ее конструкции. При этом конструкция ступеней давления ЦВД остается неизменной. Полученные результаты позволяют нам с оптимизмом и большой долей уверенности сказать, что возможно не только разрабатывать новые

турбоустановки на суперсверхкритические параметры с РС конструкции ЛПИ, но и модернизировать существующие серийные паровые турбины, что становится актуальным в период стагнации производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рассохин, В.А. Турбины конструкции ЛПИ: преимущества, характеристики, опыт разработки и реализация / В.А.Рассохин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. - 2011. - № 4 (135). - С. 41-51.
2. Иванов, В.А. Многоцелевые автономные энергетические установки / В.А.Иванов, В.Н.Бусурин, В.А.Рассохин // Теплоэнергетика. - 1993. - № 3. - С. 65-68.
3. Рассохин, В.А. Принципы создания проточных частей перспективных турбин на основе профилей ЛПИ с большим относительным шагом / В.А.Рассохин, В.Н.Садовничий, А.К.Шемагин // Тез. докл. XLIV Науч.-техн. сессии по проблемам газовых турбин. - М., 1996.
4. Бусурин, В.Н. Разработка и оптимизация паровых турбин ГПУ малой мощности на

основе малорасходных ступеней ЛПИ / В.Н.Бусурин, В.А.Рассохин, В.Н.Садовничий // Тез. докл. XLV Науч.-техн. сессии по проблемам газовых турбин. - СПб., 1997.

5. Гаев, В.Д. Основные направления модернизации паротурбинного оборудования ОАО «Силовые машины» при техническом перевооружении электростанций / В.Д.Гаев // Конференция-семинар РАО «ЕЭС» «Инновационные технологии в энергетике»: тез. докл. - М., 2007.
6. Бусурин, В.Н. Высоконагруженные малорасходные ступени ЛПИ для перспективных турбоустановок / В.Н.Бусурин, В.А.Рассохин, В.Н.Садовничий // Исследование элементов теплоэнергетических установок: сб. науч. тр. - Брянск: БГТУ, 1999.

1. Rassokhin, V.A. Turbines of LTI design: advantages, characteristics, experience in development and realization / V.A.Rassokhin // *Scientific-Engineering Gazette of S-PbSPU*. - 2011. - № 4 (135). - pp. 41-51.
2. Ivanov, V.A. *Multi-purpose Autonomous Power Supply Plants* / V.A.Ivanov, V.N.Busurin, V.A.Rassokhin // *Heat Power Engineering*. - 1993. - № 3. - pp. 65-68.
3. Rassokhin, V.A. Principles of flowing parts creation for promising turbines based on LPI profiles with large relative pitch / V.A.Rassokhin, V.N.Sadovnichy, A.K.Shemagin // *Abstracts of Reports on the XLIV-th Sc.-Eng. Session on the Problems of Gas Turbines*. - M., 1996.
4. Busurin, V.N. Development and optimization of low-power steam turbines of SPU based on

economical stages of LPI / V.N.Busurin, V.A.Rassokhin, V.N.Sadovnichy // *Abstracts of Reports on the XLV-th Sc.-Eng. Session on the Problems of Gas Turbines*. - S-Pb., 1997.

5. Gaev, V.D. Basic directions in steam turbine equipment modernization of OJ-S Co. "Power Machines" at technical renovation of power stations / V.D.Gaev // *Conf.-Seminar of RJ-SCo."SPS" "Innovation Technologies in Power Engineering": Abstracts of Reports*. - M., 2007.
6. Busurin, V.N. High-loaded economical stages of LPI for promising turbine plants / V.N.Busurin, V.A.Rassokhin, V.N.Sadovnichy // *Study of Elements in Heat Power Plants: Proceedings*. - Bryansk: BSTU, 1999.

Статья поступила в редколлегию 21.03.2016.

Рецензент: д.т.н., профессор
Брянского государственного
технического университета
Обозов А.А.

Сведения об авторах:

Кондратьев Алексей Анатольевич, аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, e-mail: alexeykondratyev@mail.ru.

Рассохин Виктор Александрович, д.т.н., профессор Санкт-Петербургского политехнического уни-

верситета Петра Великого, e-mail: v-rassokhin@yandex.ru.

Олейников Сергей Юрьевич, к.т.н., доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, e-mail: olenikov@yandex.ru.

Кондратьева Екатерина Алексеевна, аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, e-mail: alexeykondratyev@mail.ru.

Kondratiev Alexey Anatolievich, Post graduate student of Peter the Great Polytechnic University of Saint-Petersburg, e-mail: alexeykondratyev@mail.ru.

Rassokhin Victor Alexandrovich, D. Eng., Prof. of Peter the Great Polytechnic University of Saint-Petersburg, e-mail: v-rassokhin@yandex.ru.

Oleynikov Sergey Yurievich, Can. Eng., Assistant Prof. of Peter the Great Polytechnic University of Saint-Petersburg, e-mail: olennikov@yandex.ru.

Осипов Александр Вадимович, к.т.н., доцент Брянского государственного технического университета, e-mail: avo-turbo@mail.ru.

Kondratieva Katherine Alexeevna, Post graduate student of Peter the Great Polytechnic University of Saint-Petersburg, e-mail: alexeykondratyev@mail.ru.

Osipov Alexander Vadimovich, Can. Eng., Assistant Prof. of Bryansk State Technical University, e-mail: avo-turbo@mail.ru.