

DOI: 10.18721/JEST.230104

УДК 621

*Ю.К. Петреня, В.В. Глухов, С.А. Иванов*

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ РАЗДЕЛЬНЫХ И СОВМЕЩЕННЫХ ЦИЛИНДРОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН НА ОСНОВЕ КОНКУРЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Сформулирован метод DfC проектирования для конкуренции (Design for Competition) с использованием критериев привлекательности на рынке энергооборудования. Отмечено, что метод DfC — более общий по сравнению с традиционно применяемым изготовителями оборудования методом DtC проектирования по стоимости (Design to Cost). Рассмотрено применение метода DfC и критериев привлекательности при проектировании паровых турбин с отдельными и совмещенными цилиндрами высокого и среднего давления. Показано, что с переходом параметров в область суперсверхкритических (ССКП) и выше для единичной мощности более 600 МВт (с учетом имеющихся технических ограничений) целесообразно применять конструктивные схемы турбин с совмещенными цилиндрами.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ; ПАРОВЫЕ ТУРБИНЫ; ЦИЛИНДР; ПРОТОЧНАЯ ЧАСТЬ; КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА; ССКП; КОНКУРЕНЦИЯ; ЭНЕРГЕТИКА.

*Ссылка при цитировании:*

Ю.К. Петреня, В.В. Глухов, С.А. Иванов. Проектирование конструкции отдельных и совмещенных цилиндров паровых турбин на основе конкурентных характеристик // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. Т. 23. № 1. С. 36–47. DOI: 10.18721/JEST.230104

*Yu.K. Petrenya, V.V. Glukhov, S.A. Ivanov*

## **DESIGN OF CONSTRUCTIONS OF SEPARATE/COMBINED STEAM TURBINE CYLINDERS BASED ON COMPETITION-ORIENTED PARAMETERS**

A design for competition (DfC) method using the attractiveness criteria has been proposed for the power equipment market. It is noted that the method is more general compared with the DtC (Design to Cost) method traditionally used by OEMs. The application of DfC with the attractiveness criteria for design of steam turbines with separate and combined high and medium pressure cylinders is presented. It is shown that it is expedient to use structural schemes of turbines with combined cylinders with the parameters increasing to reach and exceed the supercritical region values for a unit capacity of 600 MW (including the existing technical limitations).

DESIGNING; STEAM TURBINES; CYLINDER; PATH FLOW; CONSTRUCTIVE LAY-OUT; USC; COMPETITION; ENERGY; POWER CAPACITY.

*Citation:*

Yu.K. Petrenya, V.V. Glukhov, S.A. Ivanov, Design of constructions of separate/combined steam turbine cylinders based on competition-oriented parameters, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology, 23 (1) (2017) 36–47, DOI: 10.18721/JEST.230104

В последние десятилетия произошли принципиальные изменения рынков энергетики и энергомашиностроения: обострилась конкуренция, ускорился процесс развития, основной ввод новых энергетических мощностей сместил-

ся в азиатский регион, произошел существенный рост производственного потенциала энергомашиностроения.

Сложилась ситуация, которой никогда не было в прошлом: мощности по производству

энергооборудования значительно (до полутора раз) превышают потребность рынка. Таким образом, рынок изготовителей энергетического оборудования из рынка продавца перешел в рынок покупателя, что оказывает влияние на критерии привлекательности, важные для разработчиков и изготовителей энергооборудования. Если в прошлом основными показателями были, в первую очередь, мощность и эффективность при некотором ограничении уровня стоимости, то в настоящее время фактически происходит переход к более сложным, комбинированным показателям [1–5].

В данной работе предложен подход к определению таких показателей на примере паровых турбин сверхкритических (СКП) и суперсверхкритических (ССКП) параметров пара и показано их влияние на выбор метода проектирования, компоновку турбины и конструкцию цилиндров.

#### **О критериях привлекательности энергооборудования для покупателя**

Наиболее общим и адекватным критерием привлекательности энергооборудования с точки зрения покупателя следует считать величину интегральной прибыли  $\Pi$  (competitiveness from customer point of view), которую он получает за период владения оборудованием. Ее величина будет зависеть от мощности и эффективности, стоимости энергооборудования, капитальных затрат, затрат на эксплуатацию и ремонт и других величин, которые, в свою очередь, существенно взаимосвязаны между собой. Некоторые варианты таких зависимостей будут даны в статье дальше применительно к паровым турбинам.

Ниже приведены выражения для оценки экономического эффекта, получаемого владельцем оборудования за определенный срок службы (расчетный ресурс, назначенный ресурс или полный ресурс). Для электростанции доходная часть определяется объемом электроэнергии (или электроэнергии и тепла) и эффективностью ее выработки, в то время как расходная часть объединяет капитальные (включая стоимость оборудования) и эксплуатационные затраты.

$$\Pi(T) = (\Pi - C) P (T - t) - K_1 - K_2,$$

где  $\Pi$  — цена энергоресурса;  $C$  — себестоимость энергоресурса;  $P$  — производительность энер-

гооборудования в единицу времени;  $T$  — проектный ресурс времени;  $t$  — время профилактики и ремонта;  $K_1$  и  $K_2$  — капитальные затраты в начальный период и в процессе эксплуатации. Все параметры, входящие в расчетную формулу, зависят от конструктивных параметров энергооборудования —  $x_i$ . Задача покупателя — приобрести оборудование с параметрами  $x_i$ , обеспечивающими максимум  $\Pi(x_i)$ .

Объем вырабатываемых энергоресурсов (электроэнергия, пар, тепло) коррелирует с мощностью энергооборудования, ресурсом его эксплуатации, оперативностью проведения ремонтных работ и другими параметрами. При оценке срока возврата инвестиций

$$V = (K_1 - K_2) / (\Pi - C) P T_0,$$

где  $T_0$  — расчетный годовой ресурс рабочего времени; как правило, рассматривается расчетный (проектный) ресурс, хотя при реализации мероприятий по продлению срока службы фактический срок эксплуатации может значительно превышать проектный ресурс.

На практике подход, основанный на максимизации прибыли от владения энергооборудованием, может дополняться другими факторами, например специальными требованиями к условиям финансирования проекта, к срокам поставки оборудования, удобству ремонта оборудования и т. п. Величина ожидаемой прибыли от владения оборудованием позволяет выполнить ранжирование поставщиков оборудования и получить важные оценки возврата инвестиций, будущего потока прибыли и срока окупаемости инвестиций.

#### **О критериях привлекательности энергооборудования для поставщика**

Можно уверенно полагать, что критерий привлекательности с точки зрения поставщика оборудования должен отличаться от аналогичного критерия с позиции покупателя. При анализе своей конкурентоспособности (в рамках конкретного энергооборудования) поставщик оперирует фактически тремя показателями: вероятностью выигрыша тендера  $\alpha$ ; величиной своей прибыли  $P$ ; необходимыми дополнительными затратами  $M$  и возможными потерями  $L$  в случае проигрыша тендера.

Поставщик оценивает привлекательность оборудования при выпуске на своих предприятиях

по соотношению этих величин и аналогичных у конкурента:

$\alpha_0$  меньше или больше  $\alpha_1$ ?

$P_0$  меньше или больше  $P_1$ ?

$M_0$  меньше или больше  $M_1$ ?

$L_0$  меньше или больше  $L_1$ ? (1)

Можно выразить коэффициент  $k$  привлекательности оборудования для поставщика в следующем виде:

$$k = b_1 \alpha + b_2 P + b_3 M + b_4 L, \quad (2)$$

где  $b_i$  — коэффициенты значимости.

Очевидно, что существует связь между коэффициентами привлекательности энергооборудования для покупателя и для поставщика, так как вероятность выигрыша тендера является функцией от  $k$ , т. е. зависит от прибыли  $\Pi(T)$  покупателя.

### О критериях оптимального проектирования паровых турбин

Паровые турбины относятся к основному оборудованию тепловых электростанций. Капитальные и эксплуатационные затраты для них в первую очередь связаны с массогабаритными характеристиками и тепловой схемой турбины, что в свою очередь зависит от количества и компоновки цилиндров высокого, среднего и низкого давлений.

При одинаковой тепловой схеме паровой турбины экономический результат для владельца оборудования будет в основном определяться мощностью и эффективностью использования турбины.

В качестве примера выбора конструктивного решения при оптимизации привлекательности оборудования рассмотрим сравнение конструкции для вариантов отдельных или совмещенных цилиндров высокого (ЦВД) и среднего (ЦСД) давления паровой турбины.

Показатель прибыли  $\Pi_1$  в случае отдельных цилиндров высокого и среднего давления определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \Pi_1 = & (N_{HP} + N_{IP} + N_{LP})tc_e - \\ & - (1 - \eta_{netto})Fc_f - C_{HP} - C_{IP} - C_{LP} - \\ & - C_{capex} - P_s - \dots, \end{aligned} \quad (3)$$

или

$$\begin{aligned} \Pi_1 = & (N_{HP} + N_{IP} + N_{LP})tc_e - \\ & - (1 - \eta_{netto})Fc_f - C_{HP} - C_{IP} - C_{LP} - \\ & - C_{capex} - P_s - \dots, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $N_x$  — мощность, МВт; HP и IP, HIP и LP — соответственно цилиндры высокого и среднего давления, совмещенные цилиндры высокого и среднего давления и цилиндр низкого давления;  $\eta_{netto}$  — КПД нетто, определяемый как  $\eta_{netto} = \eta\eta_{loss}$ ;  $\eta_{loss}$  — суммарные потери выработки электроэнергии на станции;  $\eta$  — КПД турбины;  $t$  — проектный ресурс, тыс. час.;  $F$  — топливо (в тоннах условного топлива);  $c_e, c_f$  — средневзвешенные за период эксплуатации стоимости соответственно электроэнергии и топлива;  $C_x$  — стоимость цилиндра;  $C_{capex}$  — капитальные затраты (пропорциональные площади, объему, весу) — на фундамент и т. п., дают дополнительный экономический эффект при совмещенных цилиндрах на стадии обоснования возврата инвестиций;  $P_s$  — прибыль поставщика оборудования.

При проектировании *раздельных цилиндров высокого и среднего давления* в качестве функции оптимизации в первом приближении может рассматриваться

$$\begin{aligned} \max \Pi_1 = & f(N_{HP}, N_{IP}, \eta, C_{HP}, C_{IP}) = \\ & = (N_{HP} + N_{IP})tc_e - \\ & - (1 - \eta_{HP+IP})Fc_f - C_{HP} - C_{IP}, \end{aligned} \quad (5)$$

или

$$\begin{aligned} \max \Pi_1 = & (N_{HP} + N_{IP})tc_e - \\ & - (-\eta_{HP+IP})Fc_f - \alpha_1 (N_{HP} + N_{IP}) - \\ & - \beta_1 \eta_{HP+IP}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\alpha_1, \beta_1$  — коэффициенты.

Прибыль заказчика при *совмещенных цилиндрах*

$$\begin{aligned} \Pi_2 = & (N_{HIP} + N_{LP})tc_e - \\ & - (1 - \eta_{netto})Fc_f - C_{HIP} - C_{LP} - \\ & - C_{capex} - P_s - \dots, \end{aligned} \quad (7)$$

или

$$\begin{aligned} \Pi_2 = & N_{HIP}tc_e - (1 - \eta_{HIP})Fc_f - \\ & - C_{HIP} - C_{LP} + N_{LP}tc_e - C_{capex} - P_s - \dots \end{aligned} \quad (8)$$

При проектировании совмещенного цилиндра высокого и среднего давления (ЦВСД) в качестве функции оптимизации может рассматриваться

$$\begin{aligned} \max (P_2) &= N_{HIP} t c_e - (1 - \eta_{HIP}) F c_f - C_{HIP} = \\ &= f(N_{HIP}, \eta_{HIP}, C_{HIP}), \end{aligned} \quad (9)$$

или

$$\begin{aligned} \max (P_2) &= \alpha_2 N_{HIP} + \beta_2 \eta_{HIP} - \\ &- C_{HIP}(N_{HIP}, \eta_{HIP}), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\alpha_2, \beta_2$  — коэффициенты.

Фактически поиск максимумов функций (5), (6), (9), (10) в первом приближении определяет оптимальный метод проектирования и выбора конструкции.

Выбор конструкции цилиндров зависит от технических требований, в первую очередь — от уровня мощности и эффективности, а также ряда других факторов, к которым относятся параметры пара, выбор типа облопачивания (активное, реактивное), наличие или отсутствие внутреннего цилиндра, выбор технологии изготовления (литье, поковки), величина коэффициентов запаса прочности и др. Оптимальное проектирование в этом случае фактически сводится к решению оптимизационной задачи, целевыми функциями которой служат мощность и эффективность, а варьируемыми параметрами, имеющими ограниченные интервалы изменения, — стоимость и другие из вышеуказанных факторов.

Выбор между отдельными и совмещенным цилиндрами проводится из сравнения  $\max P_1$  и  $\max P_2$ .

Получение указанных функций аналитическим путем затруднено. Поэтому целесообразно исследовать наличие корреляционных зависимостей между техническими параметрами и экономическими показателями на примере проектов цилиндров паровых турбин.

Ниже представлены результаты исследования корреляции между техническими (эффективность, мощность, параметры пара) и экономическими (себестоимость, капитальные вложения) параметрами для цилиндров высокого давления, среднего давления и совмещенного цилиндра высокого и среднего давления (ЦВСД) паровых турбин.

### Методика оценки

Удельная себестоимость проектирования и изготовления турбины обратно пропорциональна ее мощности. Эта качественная оценка может быть применена как к турбине в целом, так и к отдельным цилиндрам. Однако при этом не рассматривается такая существенная величина, как экономичность. Конструкция и экономичность ЦНД в основном зависят от давления в конденсаторе и выбора последней ступени. Конструкция и экономичность ЦВД и ЦСД определяется комплексом параметров: начальными параметрами пара; типом облопачивания; совмещенными или отдельными проточными частями; типом применяемых уплотнений; типом парораспределения и др. [6–10]. При этом для корректного сравнения различных вариантов исполнения проточных частей должно обеспечиваться условие одинакового качества профилирования лопаточного аппарата.

Для оценки влияния экономичности проточной части (КПД цилиндра) на себестоимость при разработке новых турбин можно использовать базу статистических данных по ранее изготовленным турбинам.

Оценка себестоимости выполнена для турбин с параметрами пара ДКП (докритические параметры), СКП, ССКП. Перечень турбин с указанием начальных параметров пара приведен в табл. 1.

Для упрощения задачи расчета себестоимости отдельного цилиндра принято, что основное влияние оказывают такие конструктивные узлы как облопаченный ротор и наружный цилиндр.

Вводится понятие «условной стоимости»  $C_{усл}$ , руб./кг, представляющей собой отношение себестоимости цилиндра к его массе:

$$\begin{aligned} C_{усл} &= (M_{рл} C_{рл} + M_p C_p + M_{ц} C_{ц}) / \\ &/ (M_{рл} + M_p + M_{ц}), \end{aligned} \quad (11)$$

где  $M_{рл}, C_{рл}$  — чистая масса, кг, и себестоимость, руб./кг, соответствующего материала рабочих лопаток;  $M_p, C_p$  — чистая масса и себестоимость соответствующего материала ротора;  $M_{ц}, C_{ц}$  — чистая масса и себестоимость соответствующего материала наружного цилиндра. Здесь и далее величины себестоимости и стоимости в рублевом выражении не являются реальными на текущий момент времени; они используются для сравнительных оценок.

Таблица 1

**Типы и параметры пара паровых турбин**

Наименование	$P_0$ , МПа	$T_0$ , °С	$T_{пп}$ , °С	Схема турбины
<i>Турбины на докритические параметры пара</i>				
К – 100–8,8	8,8	535	–	ЦВД + ЦНД
К – 200–130	12,8	540	540	ЦВД + ЦСД + ЦНД
К – 225–12,8–3	12,8	540	540	ЦВД + ЦСД + ЦНД
К – 225–12,8–3Р	12,8	560	560	ЦВД + ЦСД + ЦНД
<i>Турбины на сверхкритические параметры пара</i>				
К – 300–240	23,5	540	540	ЦВД + ЦСНД + ЦНД
К – 330–240–6МР	23,5	540	540	ЦВД + ЦСНД + ЦНД
К – 330–240	23,5	540	540	ЦВД + ЦСНД + ЦНД
К – 500–240–4	23,5	540	540	ЦВД + ЦСД + 2×ЦНД
К – 660–247	24,2	537	565	ЦВД + ЦСД + 2×ЦНД
К – 800–240–5	23,5	540	540	ЦВД + ЦСД + 3×ЦНД
К – 1200–240–3	23,5	540	540	ЦВД + ЦСД + 3×ЦНД
<i>Турбины на суперсверхкритические параметры пара</i>				
К – 660–270	26,5	610	610	ЦВСД + ЦНД

Для определения условной себестоимости в расчете приняты следующие данные по основным конструкционным материалам для изготовления лопаточного аппарата, наружных цилиндров и роторов:

<i>Материал</i>	<i>Область применения</i>
ЭИ680/ЭП291 .....	Лопаточный аппарат
18Х11МНФБ-Ш .....	Лопаточный аппарат
15Х11МФ-Ш .....	Лопаточный аппарат
20Х13-Ш .....	Лопаточный аппарат
15Х1М1ФЛ .....	Наружные цилиндры
Сталь 25Л .....	Наружные цилиндры
Р2МА .....	Роторы
X10CrMoVNb9–1 .....	Роторы

На графиках (рис. 1) представлен факторный анализ влияния на себестоимость выбранных узлов по указанной методике для отдельных цилиндров ЦВД, ЦСД.

Наибольшее влияние имеет себестоимость наружных цилиндров. Себестоимость роторов и лопаток оказывают почти равное влияние. Такая пропорция также справедлива и для ЦСД. Исключением является совмещенный цилиндр

ЦВСД турбины К-660 ССКП: практически равное влияние на себестоимость оказывают себестоимости наружного цилиндра и ротора (соответственно 0,45 и 0,39 от общей себестоимости), тогда как себестоимость лопаток оказывает значительно меньшее влияние (0,16).

**Зависимость условной стоимости ЦВД от мощности** (рис. 2). При рассмотрении зависимости  $C_{усл} = f(N_{цвд})$  выделяются две линии:

для турбин классического дизайна зависимость имеет практически линейную форму в диапазоне турбин от К-200 ДКП до К-1200 СКП (как правило, доля мощности ЦВД составляет порядка 30 % от мощности турбины);

для турбин нового поколения такая пропорция мощности сохраняется, но при этом условная стоимость ЦВД увеличивается. Это обусловлено необходимостью повышения экономичности за счет перехода на реактивное облопачивание, ужесточение цилиндра и, соответственно, увеличение его массы. Значения условной стоимости находятся в диапазоне 600–720 руб./кг.

**Зависимость для ЦСД** имеет подобный характер:  $C_{усл} = f(N_{цсд})$  (рис. 3). Доля мощности ЦСД составляет порядка 50 % от мощности турбины.

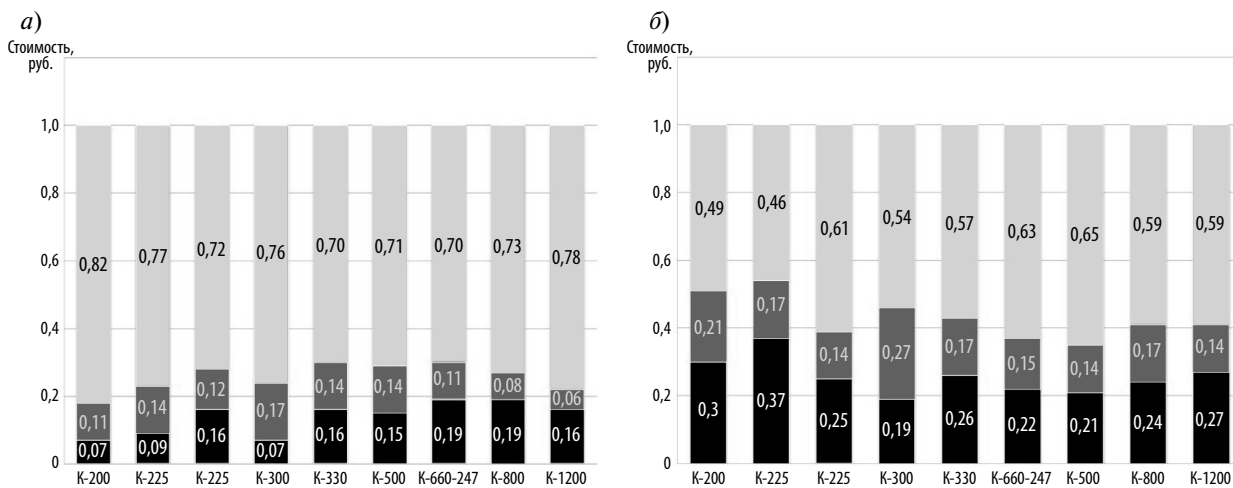


Рис. 1. Факторный анализ условной себестоимости ЦВД (а) и ЦСД (б):  
 — с/с РЛ;  — с/с ротор;  — с/с цилиндр

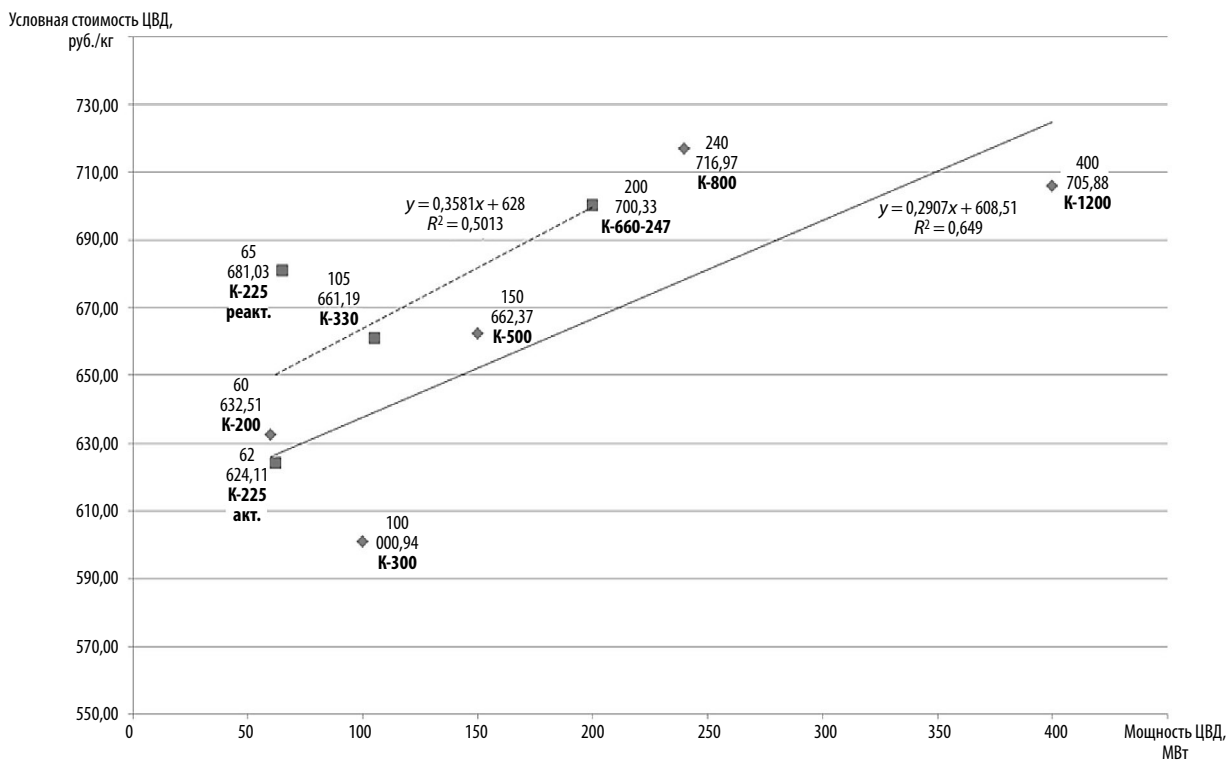


Рис. 2. Зависимость условной стоимости ЦВД от мощности:  
 — старые;  — новые; ————— — линейная (старые); - - - - - — линейная (новые)

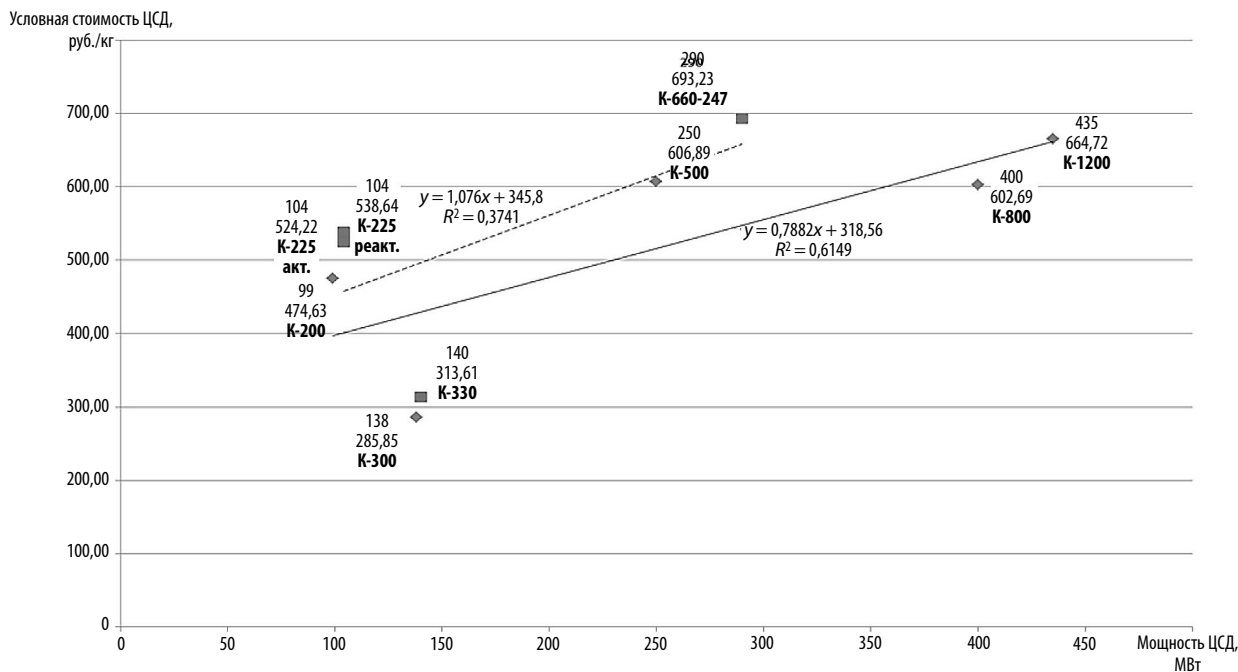


Рис. 3. Зависимость условной стоимости ЦСД от мощности:

◆ — старые; ■ — новые; — — — — — линейная (старые); - - - - - линейная (новые)

Учитывая схожее конструктивное исполнение ЦСД турбин классического и нового дизайна, абсолютные значения мощности близки. При этом значения условной стоимости находятся в диапазоне 280–700 руб./кг.

Если суммировать значения мощности ЦВД и ЦСД и построить зависимость  $C_{\text{усл}} = f(N_{\text{цвд}} + N_{\text{цсд}})$  (рис. 4), то можно выделить следующие характерные диапазоны для разных параметров пара:

для турбин СКП диапазон мощности, вырабатываемой частями ВД и СД, — от 230 до 850 МВт (при этом условная стоимость прямо пропорциональна мощности и находится в диапазоне 360–680 руб./кг.);

для ЦВСД турбин ССКП мощностью 370 МВт условная стоимость составляет 913 руб./кг. Условная стоимость ЦВСД турбины СКП той же мощности составляет 655 руб./кг., т. е. при повышении параметров СКП до уровня ССКП условная стоимость повышается на 39 %. При построении аппроксимирующей прямой относительно турбин параметров СКП для турбин параметров ССКП на основе данных К-660 ССКП, условная стоимость прямо пропорциональна мощности и находится в диапазоне 800–1200 руб./кг.

**Зависимость КПД (ЦВД + ЦСД) от мощности** (рис. 5). Для возможности сравнения КПД проточной части совмещенного ЦВСД с КПД проточных частей отдельных цилиндров ЦВД и ЦСД можно применить средневзвешенный КПД проточных частей (КПД<sub>ср</sub>, %), представляющий собой отношение

$$\text{КПД}_{\text{ср}} = \frac{(\text{КПД}_{\text{вд}} \cdot N_{\text{вд}} + \text{КПД}_{\text{сд}} \cdot N_{\text{сд}})}{(N_{\text{вд}} + N_{\text{сд}})}, \quad (12)$$

где  $\text{КПД}_{\text{вд}}$ ,  $N_{\text{вд}}$  — внутренний относительный КПД проточной части и мощность ЦВД;  $\text{КПД}_{\text{сд}}$ ,  $N_{\text{сд}}$  — внутренний относительный КПД проточной части и мощность ЦСД.

В рассматриваемой зависимости  $\text{КПД}_{\text{ср}} = f(N_{\text{цвд}} + N_{\text{цсд}})$ , построенной в относительных величинах мощности, имеют место две области:

КПД турбин мощностью 200–1200 МВт «старого» дизайна находится в диапазоне 87,5–88,3 %;

КПД турбин мощностью 225–660 МВт нового дизайна находится в диапазоне 89,5–90,8 %.

Отдельно показан КПД<sub>ср</sub> турбины ССКП с КПД 90,5 %.

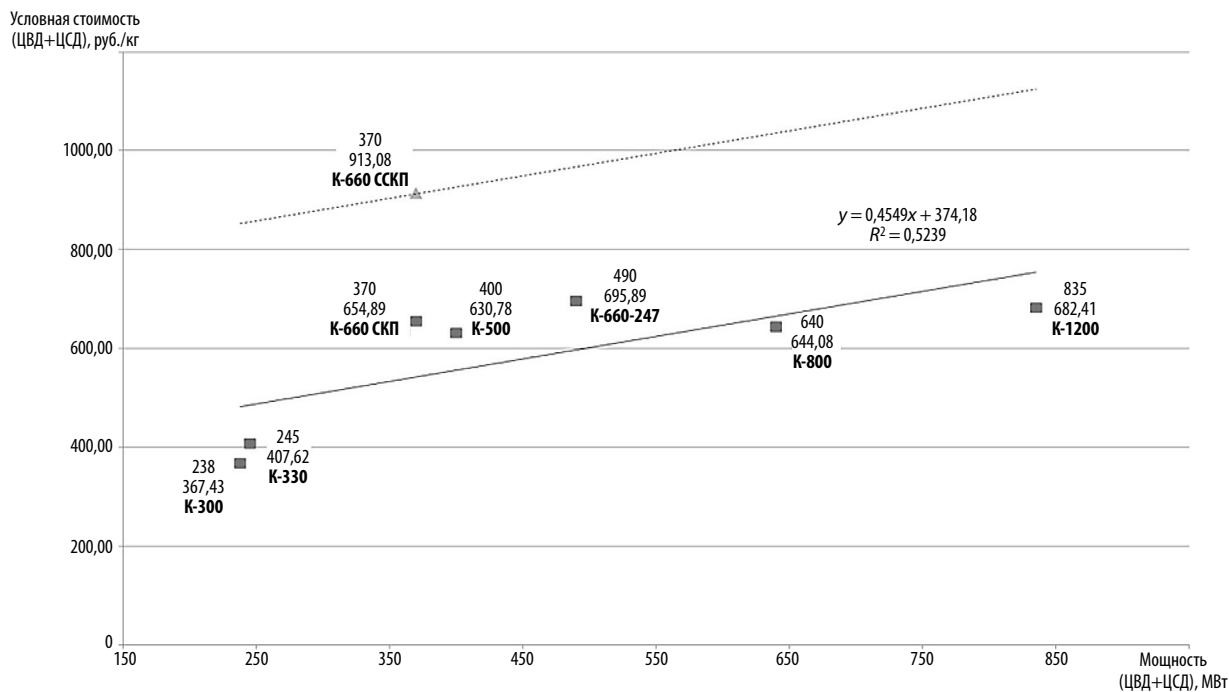


Рис. 4. Зависимость условной стоимости (ЦВД + ЦСД) от мощности:  
■ — СКП; ▲ — ССКП; ———— — линейная (СКП); ..... — линейная (ССКП прогноз)

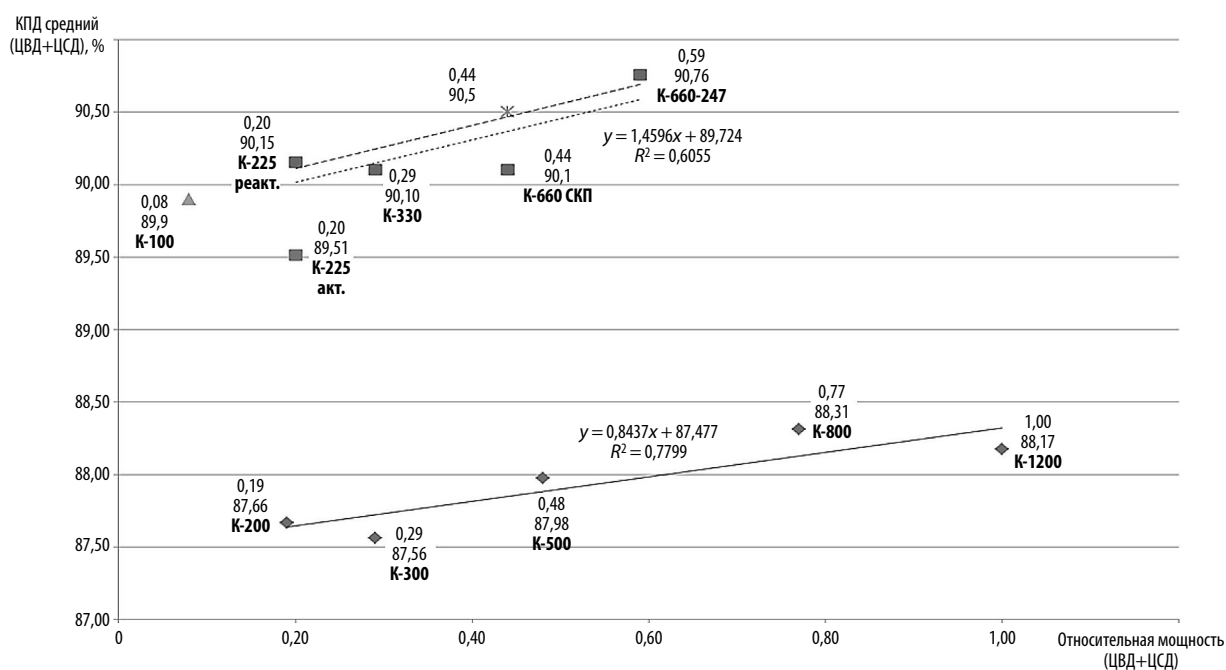


Рис. 5. Зависимость среднего КПД (ЦВД + ЦСД) от относительной мощности:  
◆ — старые; ▲ — К-100; ■ — новые; \* — К-660 ССКП;  
————— — линейная (старые); ..... — линейная (новые); ..... — линейная (прогноз ССКП)



На графике  $KPD_{cp} = f(N_{цвд + цсд})$  наглядно виден переход по КПД (ЦВД + ЦСД) между классическим и современным уровнем паровых турбин. Линии, построенные аппроксимацией значений КПД соответствующих областей, расположены практически параллельно друг другу. Такой переход можно объяснить повышением уровня КПД за счет совершенствования проектирования лопаточного аппарата. Для проточных частей нового дизайна, спроектированных по одним критериям, но на повышенные параметры пара (ССКП), при той же относительной мощности повышение КПД<sub>ср</sub> составляет 0,4 %.

Дальнейшее повышение КПД проточных частей ЦВД и ЦСД и осуществление перехода к новому уровню паровых турбин должны быть осуществлены за счет следующего:

повышения начальных параметров пара с одновременным освоением новых жаропрочных сплавов и разработкой систем охлаждения высокотемпературных узлов турбины;

разработки новых методов профилирования и внедрения новых высокоэкономичных профилей направляющих и рабочих лопаток;

совершенствования тепловых схем турбоустановки, систематизации потерь и поиска путей их снижения.

Таким образом, можно найти корреляцию между техническими и экономическими показателями. Для турбин СКП (на примере К-300 и К-330) — относительное повышение КПД на

2,9 % соответствует относительному повышению  $C_{усл}$  на 10,94 %. При переходе от СКП к ССКП для турбин мощностью 660 МВт относительное повышение КПД<sub>ср</sub> составляет 0,44 % при относительном повышении  $C_{усл}$  на 39,4 %.

При совмещении проточных частей ВД и СД в ЦВСД КПД<sub>ср</sub> уменьшается на 0,73 % при относительном снижении  $C_{усл}$  как минимум на 5,9 %. Минимальный уровень оценки обусловлен применением метода консервативной оценки с ограниченным объемом узлов, влияющих на стоимость изделия. Если учитывать в изменении стоимости другие узлы (такие, как внутренние цилиндры, подшипники, диафрагмы, обоймы диафрагм), разница в  $C_{усл}$  турбины с отдельными и совмещенными ЦВД и ЦСД достигнет величины 8–10 %. Используя на стадии подготовки ТКП аппроксимационные линии, построенные для турбин определенной мощности с отдельными ЦВД и ЦСД и для совмещенного ЦВСД, можно определить конструкцию турбины исходя из условия максимального КПД либо из минимальной стоимости.

Как следует из сравнения по условной себестоимости, выигрыш от совмещения ЦВД и ЦСД для турбин СКП составляет величину порядка 6 %, что указывает на некоторый положительный эффект от этого технического решения. Однако для корректного решения задачи о выборе общей концепции турбины необходимо учитывать увеличение стоимости ЦНД при переходе от отдельных ЦВД и ЦСД к совмещенному ЦВСД.

Таблица 2

Сравнение технико-экономических показателей турбины СКП мощностью 660 МВт с отдельными и совмещенными частями ВД и СД

Вариант конструкции	Мощность, МВт	Средневзвешенный КПД проточной части, %		Себестоимость, %	Мощность ЦНД, МВт	КПД ЦНД (сухой), %	Стоимость ЦНД, %
		без учета ЦНД	с учетом ЦНД				
ЦВД + ЦСД	490	90,76	90,2	106,26	170	89,2	90–150
ЦВСД	370	90,1	89,9	100,00	290	89,6	100
Разница между вариантами	120	0,66	0,3	6,26	120	0,4	(+ 10)–(–50)

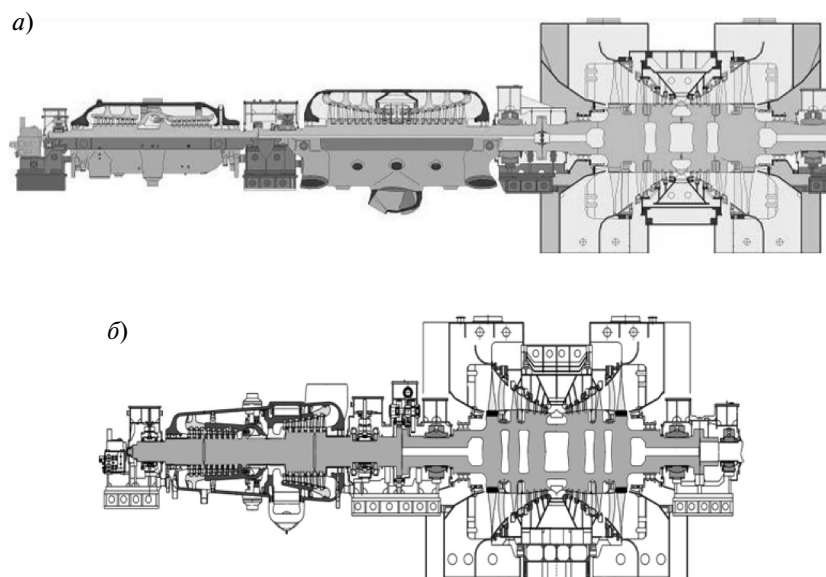


Рис. 6. Трехцилиндровая (ЦВД, ЦСД, ЦНД) (а) и двухцилиндровая (ЦВСД + ЦНД) (б) турбины мощностью 660 МВт разработки ОАО «Силловые машины»

Исходя из технически обоснованного уровня разделительного давления перед ЦНД стоимость одного ЦНД (принята по табл. 2 за 100 %) может быть несколько больше стоимости ЦНД в компоновке турбины по схеме ЦВД + ЦСД + ЦНД, но значительно меньше в компоновке турбины по схеме ЦВД + ЦСД + 2 ЦНД.

При том, что распределение веса турбины между (ЦВД + ЦСД) и ЦНД находится примерно в соотношении порядка 40 : 60, стоимость этих цилиндров обратно пропорциональна весу. В силу необходимости применять более дорогие марки сталей при проектировании высокотемпературных узлов ВД и СД в блоках ССКП актуальность снижения стоимости оборудования за счет совмещения частей ВД и СД только возрастает.

В качестве примера применения совмещенных цилиндров ЦВСД можно привести данные по турбине ССКП мощностью 600 МВт фирмы МНИ (Mitsubishi Heavy Industry), которая была установлена на ТЭС «Hirono № 5», Япония, и находится в эксплуатации с 2004 года. Турбина рассчитана на работу с параметрами пара 24,6 МПа/600/600 °С. Турбина представляет собой двухцилиндровый агрегат в компоновке ЦВСД + ЦНД. Этот блок интересен тем, что в нем впервые фирма МНИ на основе своего опыта разработок и эксплуатации турбин ССКП

с отдельными цилиндрами применила для них совмещенный ЦВСД. С целью минимизации массогабаритных характеристик турбины был специально разработан ЦНД с лопаткой последней ступени 48 дюймов (3000 об./мин.) на повышенный массовый расход пара. Практика одной из ведущих мировых турбиностроительных фирм подтвердила целесообразность и техническую возможность создания турбин на ССКП мощностью порядка 600 МВт с совмещенным ЦВСД.

### Выводы

Предложенный метод DfC проектирования для конкуренции (Design for Competition) является более общим по сравнению с традиционно применяемым изготовителями оборудования методом DtC проектирования по стоимости (Design to Cost).

Конструирование энергооборудования тесно связано с решением оптимизационной задачи, учитывающей технические требования и критерии привлекательности для изготовителя (поставщик) и заказчика (потребитель) энергооборудования, а также принципиальное различие основ этих критериев.

Корреляционные зависимости между техническими параметрами и экономическими

показателями паровых турбин, построенные на базе статистических данных изготовителя оборудования, могут применяться в задаче оптимизации, если затруднено получение соответствующих аналитических зависимостей. Использование критериев привлекательности с точки зрения заказчика и поставщика демонстрирует, что целесообразность перехода от конструктивной схемы турбины с отдельными цилиндрами высокого и среднего давления к схеме с совмещенным цилиндром возрастает при увеличении параметров и мощности с учетом имеющихся технических ограничений.

Для паровых турбин класса мощности 600 МВт при переходе к суперсверхкритическим параметрам и дальнейшем их повышении применять совмещенный цилиндр высокого и среднего давления предпочтительнее, чем схему с отдельными цилиндрами.

Критерии привлекательности, которые различаются для поставщика (competitiveness from supplier point of view) и заказчика (competitiveness from customer point of view), и их согласование — один из главных факторов, который влияет не только на рынок, но и на конструкцию и технические параметры энергооборудования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. World Energy Outlook Special Report 2015: Energy and Climate Change — Executive Summary // IEA PUBLICATIONS. Paris: Printed in France by IEA. June 2015.

2. Michael E. Porter, Klaus Schwab. The Global Competitiveness Report // World Economic Forum. Geneva, Switzerland. 2008. 513 p.

3. **Саритх М.** Конкурентоспособность: многоуровневый анализ. М., 2004.

4. **Глухов В.В., Маринина Т.В., Коробко С.Б.** Экономика знаний: Учебник. СПб.: Питер, 2003.

5. **Глухов В.В., Некрасова Т. П.** Экономика и менеджмент высоких технологий. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999.

6. **Петреня Ю.К. [и др.]** Конструктивные особенности ЦВД и ЦСД с применением принудительного охлаждения для турбин на суперсверхкритические параметры пара // Теплоэнергетика. 2008. № 1. С. 32–36.

7. **Авруцкий Г.Д., Савенкова И.А., Лазарев М.В., Акуленко В.В., Шварц А.Л., Иванов С.А.** Разработка

технических решений по созданию турбоустановки для блока суперкритических параметров пара // Электрические станции. 2005. № 10. С. 36–40.

8. **Лисянский А.С., Иванов С.А., Петреня Ю.К., Ранцев А.Ю.** Современные паровые турбины для блоков на суперсверхкритические параметры пара // XI Научно-техническая конференция «Повышение эффективности, надежности, ресурса действующего и вновь создаваемого энергетического оборудования». НПО ЦКТИ. 11 октября 2012 г., Санкт-Петербург.

9. **Иванов С.А., Цветков К.О.** Паровая турбина мощностью 660 МВт на суперсверхкритические параметры пара // Электрические станции. 2015. № 2. С. 50–53.

10. **Костюк А.Г., Грибин В.Г., Трухний А.Д.** Концепция паровых турбин нового поколения для угольной энергетики России. Ч. 1. Экономическое и техническое обоснование концепции // Теплоэнергетика. 2010. № 12. С. 23–31.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ПЕТРЕНЯ Юрий Кириллович** — доктор физико-математических наук член-корреспондент РАН, заместитель генерального директора — технический директор ПАО «Силовые машины». E-mail: Lavrova\_ES@spb.power-m.ru

**ГЛУХОВ Владимир Викторович** — доктор экономических наук профессор, первый проректор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. E-mail: vicerektor.me@spbstu.ru

**ИВАНОВ Сергей Алексеевич** — заместитель главного конструктора паровых турбин СКБ «Турбина» ПАО «Силовые машины». E-mail: ivanov\_sa@lmz.power-m.ru

### REFERENCES

1. World Energy Outlook Special Report 2015: Energy and Climate Change — Executive Summary // IEA PUBLICATIONS. Paris, Printed in France by IEA. June 2015.

2. **Michael E. Porter, Klaus Schwab.** The Global Competitiveness Report. World Economic Forum, Geneva, Switzerland 2008. 513 p.

3. **Saritkh M.** Konkurentosposobnost: mnogo-urovnevyy analiz. M., 2004. (rus.)
4. **Glukhov V.V., Marinina T.V., Korobko S.B.** Ekonomika znaniy: Uchebnyk. SPb.: Piter, 2003. (rus.)
5. **Glukhov V.V., Nekrasova T.P.** Ekonomika i menedzhment vysokikh tekhnologiy. SPb.: Izd-vo SPbGTU, 1999. (rus.)
6. **Petrenya Yu.K. [i dr.]** Konstruktivnyye osobennosti TsVD i TsSD s primeneniyyem prinuditelnogo okhlazhdeniya dlya turbin na supersverkhkriticheskiye parametry para [Features of HPC and MPC with forced cooling turbine on supercritical steam parameters]. *Teploenergetika*. 2008. № 1. S. 32–36. (rus.)
7. **Avrutskiy G.D., Savenkova I.A., Lazarev M.V., Akulenko V.V., Shvarts A.L., Ivanov S.A.** Razrabotka tekhnicheskikh resheniy po sozdaniyu turbostanovki dlya bloka superkriticheskikh parametrov para [Development of technical solutions for the creation turbine unit for supercritical steam parameters]. *Elektricheskiye stantsii*. 2005. № 10. S. 35–40. (rus.)
8. **Lisyanskiy A.S., Ivanov S.A., Petrenya Yu.K., Rantsev A.Yu.** «Sovremennyye parovyie turbiny dlya blokov na supersverkhkriticheskiye parametry para» [Modern steam turbines for units on supercritical steam parameters]. *XI Nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Povysheniye effektivnosti, nadezhnosti, resursa deystvuyushchego i vnov sozdavayemogo energeticheskogo oborudovaniya»*. NPO TsKTI, 11 oktyabrya 2012 g. Sankt-Peterburg. (rus.)
9. **Ivanov S.A., Tsvetkov K.O.** Parovaya turbina moshchnostyu 660 MVt na supersverkhkriticheskiye parametry para [Steam turbine of 660 MW supercritical steam parameters]. *Elektricheskiye stantsii*. 2015. № 2. S. 50–53. (rus.)
10. **Kostyuk A.G., Gribin V.G., Trukhniy A.D.** Kontseptsiya parovykh turbin novogo pokoleniya dlya ugolnoy energetiki Rossii. Ch. 1. Ekonomicheskoye i tekhnicheskoye obosnovaniye kontseptsii [The concept of a new generation of steam turbines for coal power in Russia. Part 1. The economic and technical feasibility of the concept]. *Teploenergetika*. 2010. № 12. S. 23–31. (rus.)

#### AUTHORS

**PETRENYA Yurii K.** — PJSC «Power Machines». E-mail: Lavrova\_ES@spb.power-m.ru

**GLUKHOV Vladimir V.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. E-mail: vicerektor.me@spbstu.ru

**IVANOV Sergei A.** — Special Design Bureau «Turbina», PJSC «Power Machines». E-mail: ivanov\_sa@lmz.power-m.ru

**Дата поступления статьи в редакцию: 21.12.2016.**