

DOI 10.5862/JEST.238.1

УДК 621.165.5

И.А. Кудрявцев, А.С. Ласкин

АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВХОДНЫХ УСТРОЙСТВ ЦИЛИНДРОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ МОЩНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

I.A. Kudryavtsev, A.S. Laskin

AERODYNAMIC DEVELOPMENT OF INPUT DEVICES OF HPC OF POWERFUL STEAM TURBINES BASED ON NUMERICAL SIMULATION

Представлены результаты исследования структуры потока во входных устройствах ЦВД мощных паровых турбин. Сопоставлены результаты численного моделирования четырех входных устройств различной конструкции. На основании сопоставления предлагается входное устройство с улучшенными аэродинамическими характеристиками.

ПАРОВАЯ ТУРБИНА; ЦВД; ВХОДНОЕ УСТРОЙСТВО; ПОТОК; ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ; СТЕПЕНЬ НЕРАВНОМЕРНОСТИ; ПОТЕРИ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.

The data obtained through investigating the flow structure in input devices of high pressure cylinders (HPC) of powerful steam turbines are presented in this article. Results of numerical simulation are compared for four constructions of the input devices. As a result of this study, we have constructed an input device with improved aerodynamic characteristics.

STEAM TURBINE; HPC; INPUT DEVICE; FLOW; NUMERICAL SIMULATION; AERODYNAMIC CHARACTERISTICS; DEGREE OF IRREGULARITY; KINETIC ENERGY LOSS.

Введение

Современная энергетика основывается на централизованной выработке электроэнергии крупными тепловыми (ТЭС) и атомными (АЭС) электростанциями, работающими на общую энергосистему. Доля электроэнергии, производимой в мире на таких станциях, достигает 82 % от общего энергопотребления [1]. На любой электростанции (ТЭС, АЭС) ключевую роль в процессе преобразования тепловой энергии в электрическую играет паротурбинная установка (ПТУ), от совершенства которой напрямую зависит эффективность всей станции. Таким об-

разом, задача повышения КПД вводимых в эксплуатацию крупных паровых турбин весьма актуальна.

Один из возможных способов повышения экономичности ПТУ — аэродинамическое совершенствование входных устройств ее цилиндров.

Информация в научно-технической литературе о конструкциях входных устройств паровых турбин (ПТ) и о структуре потока, присущей этим конструкциям, весьма ограничена. Актуальность совершенствования мощных ПТ и недостаточная освещенность в литературе конструкций входных устройств стали основаниями

для выбора в качестве объекта исследования входного устройства цилиндра высокого давления (ЦВД) ПТУ для АЭС.

Цель нашей работы – сравнить эффективность различных способов подвода рабочего тела к ЦВД турбоустановки и определить конструкцию входного устройства, оптимальную с аэродинамической точки зрения, т.е. обладающую наименьшими потерями кинетической энергии и минимальной окружной неравномерностью потока перед лопаточным аппаратом (ЛА). По приближенной оценке за счет совершенствования входного устройства ЦВД для турбины типа К-1000-60/3000 можно ожидать повышения внутреннего относительного КПД ЦВД на величину примерно до 0,4 %. Цель применения усовершенствованной конструкции входного устройства – повысить вибрационную надежность ЛА, а также внутренний относительный КПД ЦВД и турбоустановки в целом.

Изучение процессов, протекающих во входном устройстве ЦВД турбины АЭС, осуществлялось на основе численного моделирования в CFD пакете FlowSimulation. Рассматриваемый CFD пакет позволяет рассчитывать широкий круг различных течений на основе $k-\epsilon$ модели турбулентности. Результаты проведенной верификации [2] свидетельствуют, что CFD пакет FlowSimulation может быть применен для выполнения численного моделирования сложных течений во входном устройстве ЦВД паровой турбины АЭС; в частности, он позволяет изучить структуру потока и оценить потери кинетической энергии во входных устройствах различных конструкций.

Постановка задачи

В современных атомных турбоустановках ОАО «Силловые машины» применен подвод пара к нижней части ЦВД. Такая конструкция обладает хорошими монтажными и эксплуатационными характеристиками. Однако такой способ подвода пара может стать источником существенной неравномерности потока (окружной и радиальной), а также значительных углов атаки перед направляющим аппаратом (НА) первой ступени, что может приводить к увеличению потерь кинетической энергии не только первой, но и последующих ступеней отсека.

Заводы-изготовители атомных турбин используют различные способы подвода пара к цилиндрам. В турбоустановках Alstom, Siemens и др. часто применяется подвод пара к верхней и к нижней частям цилиндров. Такой способ подвода вызывает определенные сложности при эксплуатации, однако он более целесообразен с точки зрения минимизации неравномерности потока перед ЛА и снижения потерь кинетической энергии.

Основная задача численных исследований – определить аэродинамические характеристики различных конструкций входных устройств с целью их сравнения и обоснования выбора варианта входного устройства, обладающего наименьшими потерями кинетической энергии и минимальной степенью неравномерности потока перед НА.

Входное устройство исходного варианта

В качестве исходного варианта для исследования структуры потока и совершенствования выбрана одна из широко применяемых конструкций входного устройства ЦВД турбоустановки К-1000-60/3000. Именуется далее как исходный вариант. На рис. 1 изображены: конструкция внутренних полостей входного устройства, а также внутренний объем проточной части расчетной модели с контрольными сечениями.

Входное устройство состоит из трех основных частей: крышки 1 внутреннего корпуса, нижней части 2 внутреннего корпуса и сборного коллектора 3. Пространство внутреннего корпуса представляет собой цилиндр, переходящий в две расположенные симметрично относительно вертикальной плоскости улитки.

Пар из четырех подводящих труб 4 подается в сборный коллектор 3. После смешения в цилиндрической части сборного коллектора пар направляется далее в улитки 7 внутреннего корпуса. В области перехода цилиндрической части в улитки выполнен разделитель потока 6. Пар из пространства улиток через кольцевой зазор поступает к НА.

Расчетная модель представляет собой проточную часть входного устройства исходного варианта (рис. 1, в) с соблюдением основных геометрических характеристик. В расчетной мо-

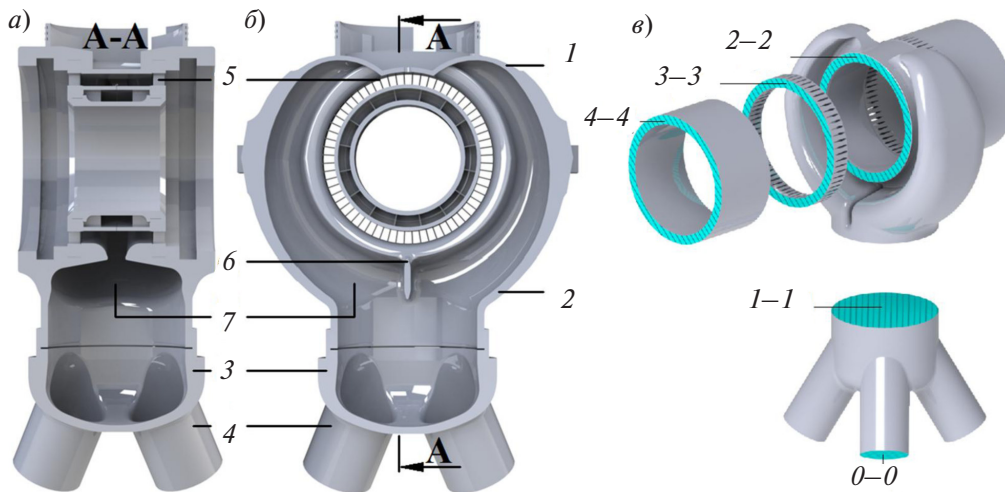


Рис. 1. Продольный разрез (а), поперечный разрез (б), внутренний объем проточной части расчетной модели с контрольными сечениями (в): 1 – крышка; 2 – нижняя часть; 3 – сборный коллектор; 4 – подводящие трубы; 5 – НА; 6 – разделитель потока; 7 – улитки

дели вместо НА первой ступени натурной турбины применена имитационная направляющая решетка (ИНР). Лопатки ИНР выполнены незакрученными, из симметричного аэродинамического профиля Мунк-3, с хордой $b = 200$ мм. Высота лопаток и их число соответствуют конструкции турбины прототипа ($l_1 = 107$ мм, $z_1 = 64$ шт.) В расчетной модели длина выходного участка за ИНР увеличена до 800 мм; он представляет собой обечайку с постоянными значениями корневого и среднего радиусов по длине. Конструкции ИНР и выходного участка оставались одинаковыми для всех исследованных конструкций входных устройств.

При численном моделировании в качестве рабочего тела использовался воздух. Допустимость такого подхода в данном случае оправдана тем, что влажность пара перед первой ступенью ЦВД турбины прототипа составляет $y \approx 0,5$ %. Для потока в подводящей трубе турбины прототипа число Маха – $M = 0,11$; число Рейнольдса – $Re = 4,7 \cdot 10^7$; $k \approx 1,3$. Соответствующие значения при численном моделировании составляли: $M = 0,1$; $Re = 3 \cdot 10^7$; $k \approx 1,4$.

Проведенные расчеты для всех исследованных вариантов входных устройств проверялись на достижение сеточной сходимости. С этой целью для каждого варианта входного устройства производилось численное моделирование на

четырёх расчетных сетках различной густоты. Сопоставление результатов показало, что сходимость достигалась на расчетных сетках в диапазоне $2 \cdot 10^6 - 2,5 \cdot 10^6$ ячеек; дальнейшее сгущение не привело бы к существенному уточнению результатов.

Контрольные сечения исходного варианта (рис. 1, в): 0-0 – сечение в подводящих трубах перед сборным коллектором; 1-1 – сечение на выходе из сборного коллектора; 2-2 – сечение перед ИНР; 3-3 – сечение за ИНР; 4-4 – сечение на выходе из расчетной модели. В качестве контрольных сечений в ИНР приняты условные поверхности, расположенные на удалении 15 мм от входной и выходной кромок ИНР, т.е. соответствуют сечениям 2-2 и 3-3. Контрольные сечения 2-2, 3-3, 4-4 оставались одинаковыми для всех конструкций входных устройств. На рис. 2 показаны: контрольные сечения в ИНР; угол α между положительным направлением оси u и проекцией вектора скорости на плоскость $z-u$; угол γ между положительным направлением оси z и проекцией вектора скорости на меридиональную плоскость $r-z$, а также межлопаточный объем с контрольными поверхностями.

В качестве аэродинамических характеристик были приняты коэффициенты потерь кинетической энергии и степень неравномерности потока. Приводятся коэффициенты потерь кинетической энергии и степень неравномерности потока.

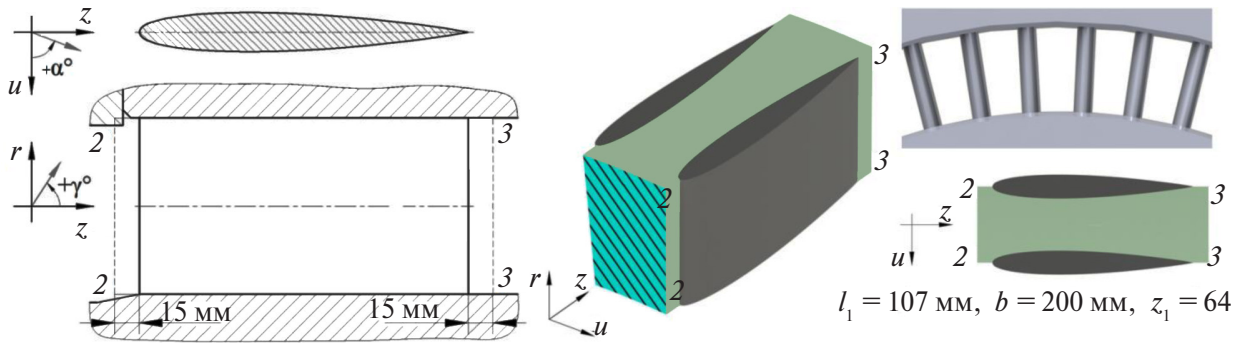


Рис. 2. Имитационная направляющая решетка и контрольные сечения

тической энергии: интегральные $\left(\zeta_{\Sigma} = \frac{\overline{p_i^* - p_{i+1}^*}}{\overline{p_0 - p_4}} \right)$ и локальные $\left(\zeta = \frac{\overline{p_i^* - p_{i+1}^*}}{p_i - p_{i+1}} \right)$,

где $\overline{p^*}$, \overline{p} – осредненные по расходу соответственно полное и статическое давление; $i = 0, 1, 2, 3$ – номер контрольного сечения.

Степень окружной неравномерности потока оценивается в контрольных сечениях 2–2 и 3–3. Каждое контрольное сечение представляет собой совокупность контрольных поверхностей межлопаточных объемов ИНР. На рис. 2 изображена аксонометрическая проекция межлопаточного объема с контрольной поверхностью в сечении 2–2. Степень окружной неравномерности потока – $\kappa = \frac{c_{\max} - c_{\min}}{\overline{c}}$, где c_{\max} , c_{\min} – максимальное и минимальное значения осредненной по расходу скорости, определяемое для контрольных поверхностей межлопаточных объемов ИНР в соответствующих контрольных сечениях; \overline{c} – осредненная по расходу скорость по всему контрольному сечению.

При исследовании конструкций входных устройств неравномерность потока представляет собой следующее: в сечении 2–2 – сумму неравномерностей от входного устройства и потенциальной неравномерности от лопаток ИНР; в сечении 3–3 – сумму неравномерности от входного устройства и дополнительной неравномерности привносимой кромочными следами.

Проведенное численное моделирование позволило изучить структуру потока, характерную для исходного варианта входного устройства.

Было выявлено наличие следующих вихревых областей: в сборном коллекторе между потоками из подводящих труб; в верхней части входного устройства, где происходит слияние потоков из улиток; обширная вихревая область присутствует перед ИНР ниже горизонтального разъема. В улитках поток закручивается, линии тока представляют собой сложные пространственные кривые, что и обуславливает возникновение повышенных потерь кинетической энергии в исходном входном устройстве.

Интегральный коэффициент потерь кинетической энергии входного устройства составляет $\zeta_{\Sigma 0-2} = 0,26$. Интегральные коэффициенты потерь кинетической энергии: в сборном коллекторе – $\zeta_{\Sigma 0-1} = 0,032$, в области улиток – $\zeta_{\Sigma 1-2} = 0,228$, в ИНР – $\zeta_{\Sigma 2-3} = 0,242$.

Локальные коэффициенты потерь кинетической энергии составляют: в сборном коллекторе – $\zeta_{0-1} = 0,097$, в области улиток – $\zeta_{1-2} = 0,237$, в ИНР – $\zeta_{2-3} = 0,308$.

Значения углов α на входе в ИНР находятся в диапазоне $\alpha_{2-2} \approx 90-130^\circ$, достигая максимальных значений в области горизонтального разъема. Диапазон значений углов γ_{2-2} на входе в ИНР от -2° до $+9^\circ$.

Степень окружной неравномерности потока на входе в ИНР составляет $\kappa_{2-2} = 0,282$, на выходе из ИНР – $\kappa_{3-3} = 0,32$. Применяемый способ подвода рабочего тела приводит к формированию значительных углов атаки и неравномерностей потока перед ИНР, что является источником повышенных потерь в НА. Одна из причин возникновения окружной неравномерности потока – вихревая область перед ИНР, расположенная ниже горизонтального разъема.

Эта вихревая область распространяется через ИНР, что в совокупности с кромочными следами приводит к увеличению степени окружной неравномерности потока на выходе из ИНР. Высокая неравномерность потока в отсеке ЦВД может привести к возбуждению колебаний рабочих лопаток (РЛ) и снижению КПД цилиндра.

Входное устройство варианта 1

Для снижения уровней потерь кинетической энергии и неравномерностей потока, обнаруженных в исходном варианте, предложена конструкция входного устройства варианта 1. Было предположено, что источником повышенных потерь кинетической энергии в улитках выступает неравномерность после смешения потоков из четырех подводящих труб. Для снижения этой неравномерности был удлинен до 2,5 м цилиндрический участок сборного коллектора. В остальном конструкция входного устройства варианта 1 аналогична исходному варианту. На рис. 3 изображены конструкция внутренних полостей входного устройства варианта 1, а также

внутренний объем проточной части расчетной модели с контрольными сечениями.

Рабочее тело от четырех подводящих труб 4 подается в сборный коллектор 3 с удлиненной цилиндрической частью; затем поток направляется в пространство внутреннего корпуса, в котором течение рабочего тела аналогично исходному варианту.

Расчетная модель представляет собой проточную часть входного устройства варианта 1. Контрольные сечения варианта 1 аналогичны исходному варианту и представлены на рис. 3, в.

Интегральный коэффициент потерь кинетической энергии входного устройства варианта 1 составляет $\zeta_{\Sigma 0-2} = 0,251$. Интегральные коэффициенты потерь кинетической энергии: в сборном коллекторе – $\zeta_{\Sigma 0-1} = 0,035$, в области улиток – $\zeta_{\Sigma 1-2} = 0,216$, в ИНР – $\zeta_{\Sigma 2-3} = 0,252$.

Локальные коэффициенты потерь кинетической энергии входного устройства варианта 1 составляют: в сборном коллекторе – $\zeta_{0-1} = 0,107$, в области улиток – $\zeta_{1-2} = 0,212$, в ИНР – $\zeta_{2-3} = 0,306$.

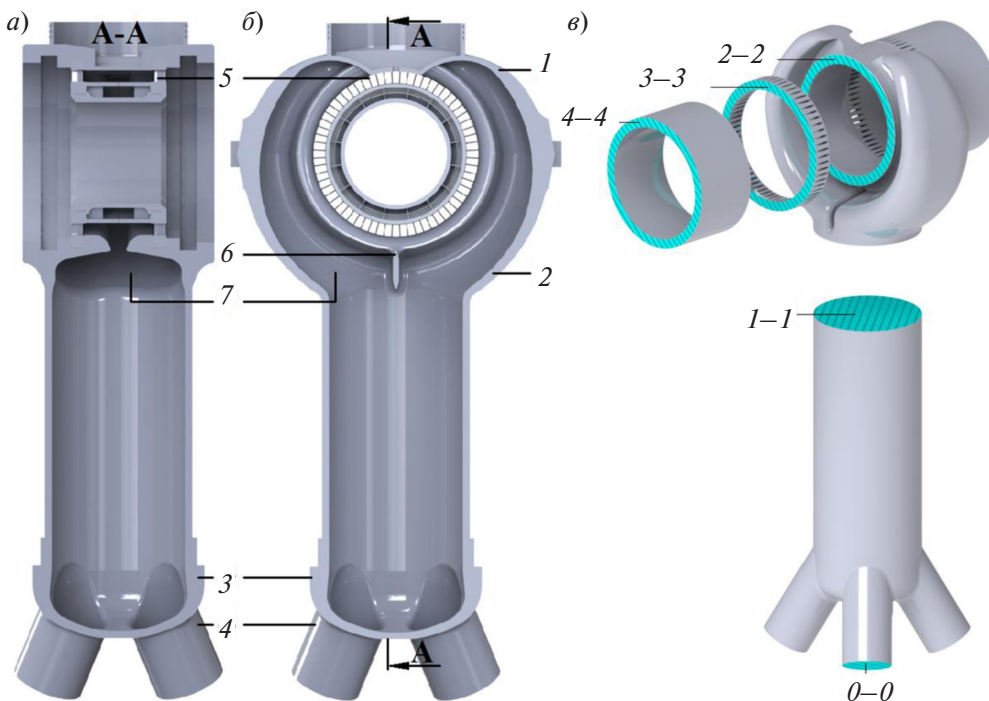


Рис. 3. Продольный разрез (а), поперечный разрез (б), внутренний объем (в) проточной части расчетной модели с контрольными сечениями: 1 – крышка; 2 – нижняя часть; 3 – сборный коллектор; 4 – подводящие трубы; 5 – ИНР; 6 – разделитель потока; 7 – улитки

Значения углов α и γ на входе в ИНР, а также неравномерности потока сохранились практически на уровне исходного варианта. Степень окружной неравномерности потока на входе в ИНР составляет $\kappa_{2-2} = 0,27$, на выходе из ИНР – $\kappa_{3-3} = 0,302$. Большая степень окружной неравномерности потока после прохождения ИНР обусловлена теми же причинами, что и в исходном варианте.

Сопоставление величин ξ_{Σ} и κ показало, что уменьшение неравномерности потока на входе в улитки не оказало существенного влияния на аэродинамические характеристики входного устройства варианта 1 по сравнению с исходным вариантом. Интегральный коэффициент потерь кинетической энергии входного устройства $\xi_{\Sigma 0-2}$ уменьшился на 3 %. Интегральный коэффициент потерь кинетической энергии для области улиток $\xi_{\Sigma 1-2}$ уменьшился на 5 %. Степень окружной неравномерности потока на входе в ИНР κ_{2-2} уменьшилась на 4 %.

Проведенное численное моделирование показало, что для входного устройства варианта 1 характерно формирование вихревых областей аналогично исходному варианту. Конструкции исходного варианта и варианта 1 с подводом рабочего тела к нижней части цилиндра обладают сравнительно высокими потерями кинетической энергии и неравномерностью потока перед отсек ЦВД. Можно сделать вывод, что измене-

ние структуры потока перед улитками не привело к существенному уменьшению потерь кинетической энергии для потока в улитках.

Для решения задачи аэродинамического совершенствования целесообразно перейти к существенно иной конструкции входного устройства, где должна быть решена задача значительного уменьшения степени неравномерности и потерь кинетической энергии.

Входное устройство варианта 2

С целью улучшения аэродинамических характеристик входного устройства разработан второй вариант конструкции, в котором подвод рабочего тела осуществляется четырьмя радиально расположенными трубами и подводными камерами.

На рис. 4 изображены конструкция внутренних полостей входного устройства варианта 2, а также внутренний объем проточной части расчетной модели с контрольными сечениями.

Рабочее тело от четырех подводных труб направляется в четыре пароподводящие камеры 1, обеспечивающие радиальный подвод пара. Пароподводящая камера представляет собой соединение цилиндрического участка трубы и диффузора. Рабочее тело из пароподводящих камер через кольцевой зазор поступает к разделителю потока 3. После разделения на два потока рабочее тело подводится к ИНР.

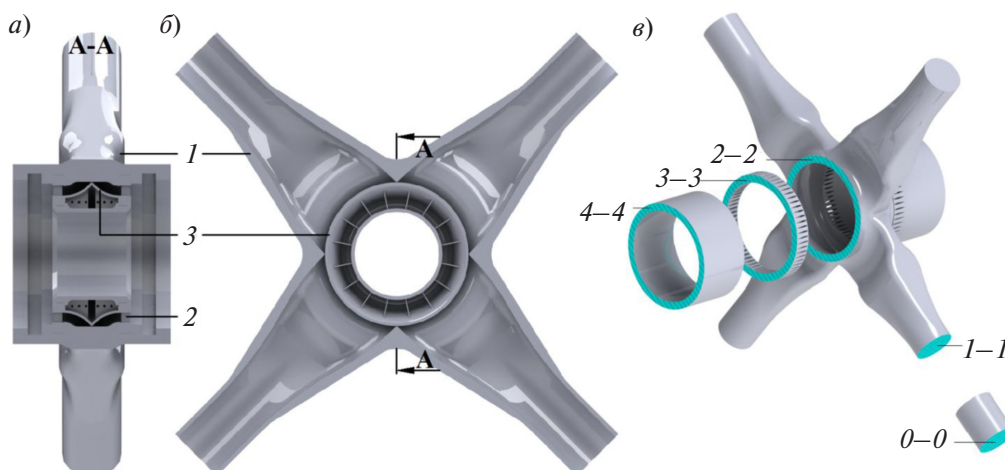


Рис. 4. Продольный разрез (а), поперечный разрез (б), внутренний объем (в) проточной части расчетной модели с контрольными сечениями: 1 – пароподводящая камера; 2 – ИНР; 3 – разделитель потока

Расчетная модель представляет собой проточную часть входного устройства варианта 2 (рис. 4, в). Конструкции ИНР и выходного участка аналогичны исходному варианту. Контрольные сечения варианта 2: $0-0$ – сечение в подводящих трубах перед пароподводящей камерой; $1-1$ – сечение перед входом в диффузор; остальные сечения аналогичны исходному варианту.

Интегральный коэффициент потерь кинетической энергии входного устройства варианта 2 составляет $\zeta_{\Sigma 0-2} = 0,05$. Интегральные коэффициенты потерь кинетической энергии: в цилиндрической части пароподводящей камеры – $\zeta_{\Sigma 0-1} = 0,006$; от входа в диффузор до входа в ИНР – $\zeta_{\Sigma 1-2} = 0,044$; в ИНР – $\zeta_{\Sigma 2-3} = 0,221$.

Локальные коэффициенты потерь кинетической энергии входного устройства варианта 2 составляют: в цилиндрической части пароподводящей камеры – $\zeta_{0-1} = 0,01$; от входа в диффузор до входа в ИНР – $\zeta_{1-2} = 0,053$; в ИНР – $\zeta_{2-3} = 0,233$.

Применяемый способ подвода рабочего тела приводит к формированию существенно меньших углов атаки и неравномерностей потока перед ИНР по сравнению с исходным вариантом. В сформированном внутреннем потоке отсутствуют какие-либо существенные вихревые области и зоны отрывных течений.

Значения углов α на входе в ИНР находятся в диапазоне $\alpha_{2-2} \approx 83-95^\circ$. Диапазон значений углов γ_{2-2} на входе в ИНР – от -4° до $+1^\circ$.

Степень окружной неравномерности потока на входе в ИНР составляет $\kappa_{2-2} = 0,167$, на выходе из ИНР – $\kappa_{3-3} = 0,098$. Подача на вход ИНР более равномерного потока и отсутствие в нем вихревых областей приводит к снижению неравномерности потока после ИНР, даже несмотря на наличие дополнительной неравномерности, привносимой кромочными следами. Это обстоятельство свидетельствует, что причина увеличения неравномерности потока за ИНР в исходном варианте заключалась в наличии вихревой области перед ИНР. При прочих равных условиях поток меньшей неравномерности, характерный для варианта 2, позволит улучшить вибрационную надежность РЛ и повысить КПД цилиндра по сравнению с исходным вариантом.

Примененный во входном устройстве варианта 2 способ подвода рабочего тела обеспечи-

вает равномерное распределение потока перед ИНР. Принятые конструктивные решения позволили улучшить аэродинамические характеристики входного устройства по сравнению с исходным вариантом. Интегральный коэффициент потерь кинетической энергии входного устройства варианта 2 $\zeta_{\Sigma 0-2}$ уменьшился на 80 %. Степень окружной неравномерности потока на входе в ИНР уменьшилась на 41 %.

Входное устройство варианта 2 обладает улучшенными аэродинамическими характеристиками, однако его реализация сопряжена с трудностями при размещении входного устройства внутри цилиндра, главная из которых обусловлена радиальным расположением подводящих труб. Сложности в реализации варианта 2 стали предпосылками для создания новой конструкции входного устройства, обладающей достоинствами варианта 2, но более технологичной.

Входное устройство варианта 3

Для преодоления технологических сложностей при реализации входного устройства варианта 2 разработано входное устройство варианта 3 с вертикальным расположением осей подводящих труб.

Рассматриваемый способ подвода рабочего тела к цилиндру с вертикальным расположением осей подводящих труб применен в турбоустановке К-800-240-5, имеющей длительный опыт эксплуатации, а также в турбоустановке К-800-130/3000 на Белоярской АЭС. Это свидетельствует о технологической возможности применения входного устройства варианта 3.

На рис. 5 изображены конструкция внутренних полостей входного устройства варианта 3, а также внутренний объем проточной части расчетной модели с контрольными сечениями.

Входное устройство варианта 3 состоит из трех основных частей: крышки 1 внутреннего корпуса, нижней части 2 внутреннего корпуса и ИНР 3. Крышка и нижняя часть внутреннего корпуса имеют по две пароподводящие камеры 4. Пароподводящая камера представляет собой соединение цилиндрического участка трубы и диффузора с углом раскрытия 6° . Движение рабочего тела во входном устройстве аналогично варианту 2.

Расчетная модель представляет собой проточную часть входного устройства варианта 3

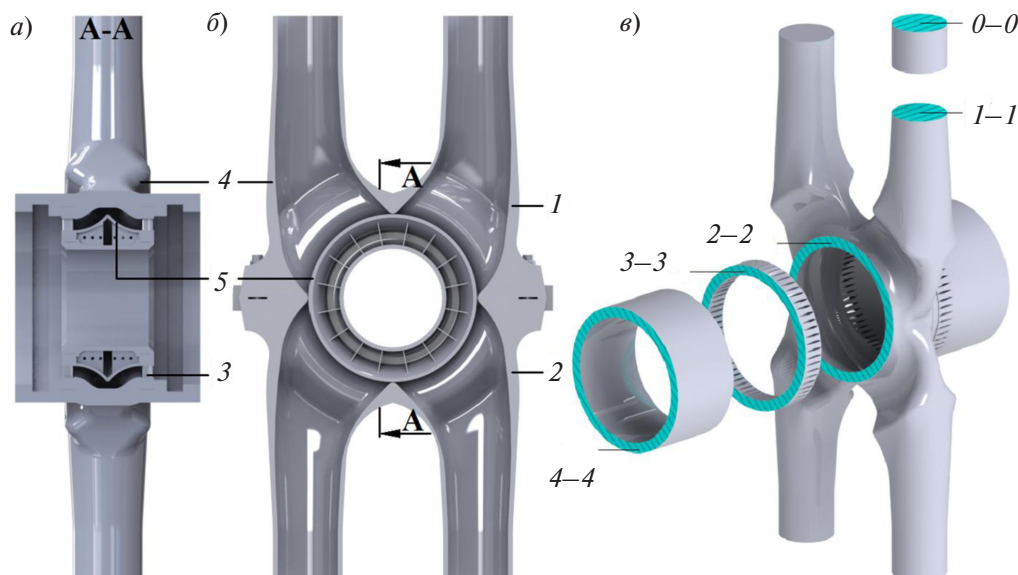


Рис. 5. Продольный разрез (а), поперечный разрез (б), внутренний объем (в) проточной части расчетной модели с контрольными сечениями: 1 – крышка; 2 – нижняя часть; 3 – ИНР; 4 – пароподводящая камера; 5 – разделитель потока

(рис. 5, в). Конструкции ИНР и выходного участка описаны в исходном варианте. Контрольные сечения аналогичны варианту 2.

Интегральный коэффициент потерь кинетической энергии входного устройства варианта 3 составляет $\zeta_{\Sigma 0-2} = 0,072$. Интегральные коэффициенты потерь кинетической энергии: в цилиндрической части пароподводящей камеры – $\zeta_{\Sigma 0-1} = 0,005$; от входа в диффузор до входа в ИНР – $\zeta_{\Sigma 1-2} = 0,067$; в ИНР – $\zeta_{\Sigma 2-3} = 0,2$.

Локальные коэффициенты потерь кинетической энергии входного устройства варианта 3 составляют: в цилиндрической части пароподводящей камеры – $\zeta_{0-1} = 0,008$; от входа в диффузор до входа в ИНР $\zeta_{1-2} = 0,078$; в ИНР – $\zeta_{2-3} = 0,214$.

Предложенная конструкция подвода рабочего тела варианта 3 приводит к формированию существенно меньших углов атаки и неравномерностей потока перед ИНР по сравнению с исходным вариантом, хотя их величины несколько выше полученных в варианте 2. Наблюдаемая структура потока аналогична структуре потока для варианта 2, отсутствуют существенные вихревые области и зоны отрывных течений.

Значения углов α на входе в ИНР находятся в диапазоне $\alpha_{2-2} \approx 80-102^\circ$. Диапазон значений

углов γ_{2-2} на входе в ИНР составляет от -3° до $+3^\circ$.

Степень окружной неравномерности потока на входе в ИНР составляет $\kappa_{2-2} = 0,204$; на выходе из ИНР, как и в варианте 2, неравномерность потока снижается и составляет $\kappa_{3-3} = 0,14$.

Способ подвода рабочего тела при помощи четырех вертикальных пароподводящих камер, реализованный в варианте 3, позволил получить более технологичную конструкцию входного устройства по сравнению с вариантом 2. Входные устройства варианта 3 и варианта 2 обладают сопоставимыми аэродинамическими характеристиками. Для варианта 3 характерно наличие существенно меньших уровней потерь кинетической энергии по сравнению с исходным вариантом. Интегральный коэффициент потерь кинетической энергии входного устройства варианта 3 ($\zeta_{\Sigma 0-2}$) уменьшился на 72%. Степень окружной неравномерности потока на входе в ИНР уменьшилась на 28%.

Заключение

Для сравнения исследованных вариантов входных устройств воспользуемся интегральными характеристиками, представленными на рис. 6 и в таблице.

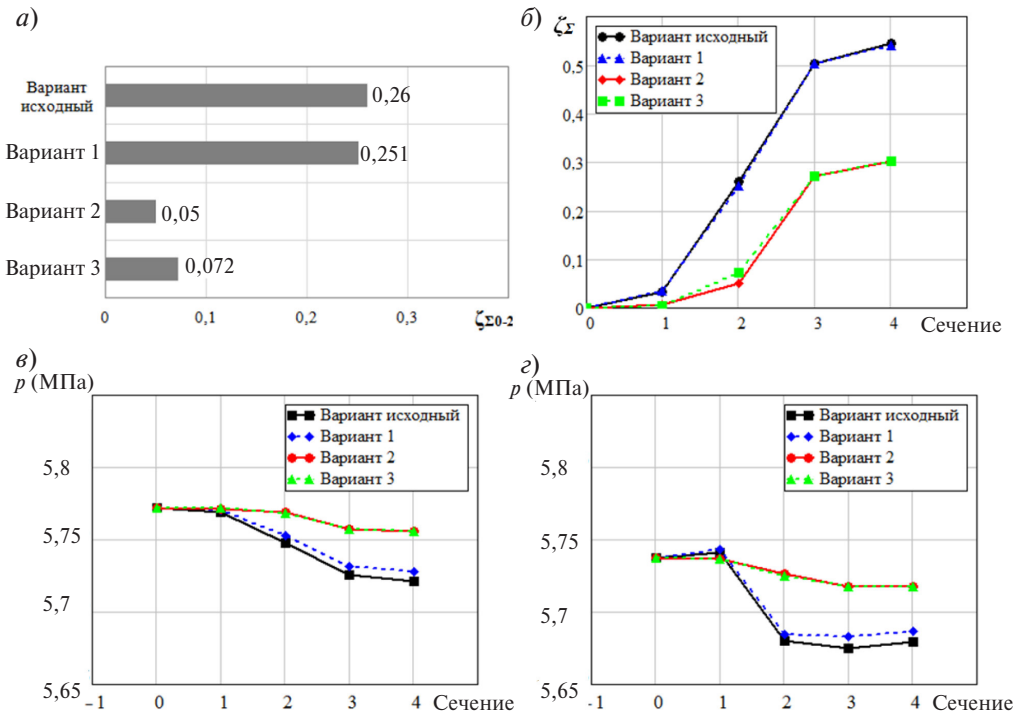


Рис. 6. Интегральные коэффициенты потерь кинетической энергии (а, б), полное давление (в), статическое давление (з)

Характеристики входных устройств

Вариант	$\zeta_{\Sigma 0-1}$	$\zeta_{\Sigma 1-2}$	$\zeta_{\Sigma 0-2}$	$\frac{\zeta_{\Sigma 0-2}}{\zeta_{\Sigma 0-2 \text{ исх}}}$	P_{2-2}/P_{0-0}	κ_{2-2}	$\frac{\kappa_{2-2}}{\kappa_{2-2 \text{ исх}}}$
Исходный	0,032	0,228	0,260	1	0,990	0,282	1
1	0,035	0,216	0,251	0,965	0,991	0,270	0,957
2	0,006	0,044	0,050	0,192	0,998	0,167	0,592
3	0,005	0,067	0,072	0,277	0,998	0,204	0,723

Для исходного входного устройства и варианта 1 уровни интегральных коэффициентов $\zeta_{\Sigma 1-2}$ потерь кинетической энергии для области улиток составляют почти 90 % от коэффициентов $\zeta_{\Sigma 0-2}$ потерь во всем входном устройстве и существенно выше коэффициентов $\zeta_{\Sigma 0-1}$ потерь для потока при внезапном расширении в сборном коллекторе.

При способе подвода рабочего тела к нижней части цилиндра, примененном в исходном входном устройстве и в варианте 1, улитки обладают доминирующим сопротивлением, причем высокий уровень их сопротивления формируется практически независимо от входных условий

перед улитками (об этом свидетельствует исследование варианта 1). Главная составляющая коэффициента потерь кинетической энергии $\zeta_{\Sigma 1-2}$ определяется вихревой структурой потока в области улиток.

Степень окружной неравномерности потока на входе в ИНР для исходного варианта и варианта 1 составляют соответственно $\kappa_{2-2} = 0,282$ и $\kappa_{2-2} = 0,27$.

Из рис. 6 и таблицы следует, что исследованные входные устройства вариантов 2 и 3 имеют почти в четыре раза меньшее сопротивление и почти в два раза меньшую неравномерность потока перед ИНР, имитирующей НА.

Во всех рассмотренных входных устройствах для моделирования условий в выходном сечении применялась одинаковая конструкция решетки симметричных профилей, именуемая ИНР (см. рис. 2). В проведенных исследованиях ИНР выступает в роли индикатора потерь кинетической энергии под влиянием неравномерности потока. Течение в ИНР реагирует на структуру потока, формирующуюся после прохождения входного устройства.

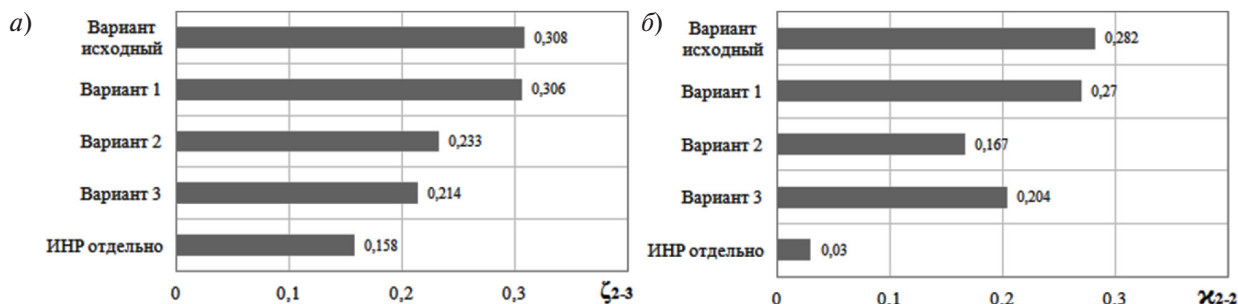


Рис. 7. Локальный коэффициент потерь кинетической энергии в ИНР ζ_{2-3} (а), степень окружной неравномерности перед ИНР κ_{2-2} (б)

Для оценки влияния неравномерности потока на потери кинетической энергии в ИНР проведено численное исследование ее обтекания в равномерном потоке при безударном входе. Локальный коэффициент потерь кинетической энергии в ИНР в этом случае составил $\zeta_{2-3} = 0,158$, что примерно на 49 % меньше, чем для вариантов исходного и первого, а также на 32 и 26 % меньше, чем для второго и третьего вариантов соответственно.

Степень окружной неравномерности потока на входе в ИНР для принятого контрольного сечения 2–2 при обтекании равномерным потоком представляет собой потенциальную неравномерность от лопаток ИНР и составляет $\kappa_{2-2} = 0,03$, что примерно на 90 % меньше, чем для вариантов исходного и первого, и на 80 %, чем для второго и третьего вариантов. Это свидетельствует о том, что основной вклад в формирование окружной неравномерности потока перед ИНР в исследованных конструкциях вносит неравномерность от входного устройства.

На рис. 7 представлены локальные коэффициенты потерь кинетической энергии в ИНР (ζ_{2-3}) и степени окружной неравномерности на входе в ИНР (κ_{2-2}).

Бóльшие потери и неравномерность потока в ИНР рассмотренных входных устройств по сравнению с результатами исследования ИНР в равномерном потоке при безударном входе означают, что для НА первой и последующих ступеней реальной турбины также будут характерны большие потери и неравномерность потока.

Можно сделать вывод, что влияние неравномерной вихревой структуры потока перед ИНР на потери кинетической энергии в ней для ва-

риантов 2 и 3 примерно на 40 % меньше, чем для исходного варианта и варианта 1. Эта оценка может быть приближенно отнесена и к влиянию входных условий в случае натурной проточной части ЦВД.

Способ подвода рабочего тела к верхней и нижней части цилиндра, реализованный в вариантах 2 и 3, приводит к формированию структуры потока с меньшей неравномерностью перед ИНР и существенно меньшими потерями кинетической энергии по сравнению с вариантом подвода к нижней части цилиндра. С аэродинамической точки зрения способ более равномерного подвода рабочего тела к верхней и нижней части цилиндра предпочтителен.

Входное устройство варианта 3 существенно технологичнее по сравнению с вариантом 2, а аэродинамические характеристики этих конструкций сопоставимы. По проведенной оценке для турбины К-1000-60/3000 применение входного устройства варианта 3 позволит увеличить внутренний относительный КПД ЦВД на 0,3 %.

Выводы

1. Для способов подвода рабочего тела к нижней части цилиндра, использованных в конструкциях исходного варианта и варианта 1, степень окружной неравномерности потока перед НА составляет соответственно $\kappa_{2-2} \approx 0,282$ и $\kappa_{2-2} \approx 0,27$, а интегральный коэффициент потерь кинетической энергии входных устройств — $\zeta_{\Sigma 0-2} \approx 0,26$ и $\zeta_{\Sigma 0-2} \approx 0,251$. Почти 90 % от потерь в этих входных устройствах составляют потери в улитках.

2. Способ подвода рабочего тела к верхней и нижней части цилиндра, использованный в кон-

струкциях вариантов 2 и 3, имеет почти в четыре раза меньшее сопротивление и почти в два раза меньшую неравномерность потока перед НА в сравнении с подводом рабочего тела к нижней части цилиндра. Для вариантов 2 и 3 интегральный коэффициент потерь кинетической энергии входных устройств составляет соответственно $\zeta_{\Sigma 0-2} \approx 0,05$ и $\zeta_{\Sigma 0-2} \approx 0,072$, а степень окружной неравномерности потока перед НА – $\kappa_{2-2} \approx 0,167$ и $\kappa_{2-2} \approx 0,204$.

3. С аэродинамической точки зрения подвод рабочего тела к верхней и нижней части цилиндра предпочтительнее; его применение при прочих равных условиях увеличит вибрационную надежность лопаток рабочего.

4. Применение конструкции входного устройства варианта 3 позволит увеличить внутренний относительный КПД ЦВД приблизительно на 0,3 %.

Список принятых сокращений

АЭС	– атомная электростанция
ИНР	– имитационная направляющая решетка
КПД	– коэффициент полезного действия
ЛА	– лопаточный аппарат
НА	– направляющий аппарат
ОАО	– открытое акционерное общество
ПТ	– паровая турбина
ПТУ	– паротурбинная установка
РК	– рабочее колесо
ТЭС	– тепловая электростанция
ЦВД	– цилиндр высокого давления
CFD	– computational fluid dynamics
НРС	– high pressure cylinder

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Pioro I.** Nuclear Power as a Basis for Future Electrical-Energy Generation in the World. // Proceedings of ICAPP. 2014. Paper 14381. P. 2389.
2. **Кудрявцев И.А., Ласкин А.С.** Численное и экспериментальное исследование потока в подводящем тракте цилиндра высокого давления турбины АЭС // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. №4(183). Т. 1. С. 338–344.
3. **Гурский Д.А., Турбина Е.С.** Вычисления в Mathcad12. СПб.: Питер, 2006. 544 с.
4. **Диксон С.Л.** Механика жидкостей и газов. Термодинамика турбомашин: пер. с англ. М.: Машиностроение, 1981. 213 с.
5. **Дейч М.Е.** Техническая газодинамика. Изд. 2-е, переработ. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. 673 с.
6. **Емцев Б.Т.** Техническая гидромеханика. Изд. 2-е, переработ. и доп. М.: Машиностроение, 1987. 440 с.
7. **Лапшин К.Л.** Теория турбомашин: Конспект лекций. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2010. 80 с.
8. Основные элементы SolidWorks // SolidWorks Russia., 2010. 534 с.
9. **Петунин А.Н.** Методы и техника измерений параметров газового потока. М.: Машиностроение, 1972. 332 с.
10. **Повх И.Л.** Аэродинамический эксперимент в машиностроении. Изд. 3-е, доп. и исправл. Л.: Машиностроение, 1974. 480 с.
11. Расширенное моделирование деталей SolidWorks // SolidWorks Russia., 2010. 333 с.
12. **Самойлович Г.С.** Газодинамика: учебник. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990. 384 с.
13. **Трояновский Б.М., Филиппов Г.А., Булкин А.Е.** Паровые и газовые турбины атомных электростанций: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 256 с.
14. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя / Пер. с нем. М.: Наука, 1974. 712 с.
15. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 1040 с.: ил. + DVD – (Мастер).

REFERENCES

1. **Pioro I.** Nuclear Power as a Basis for Future Electrical-Energy Generation in the World. Proceedings of ICAPP 2014, Paper 14381. P. 2389.
2. **Kudryavtsev I.A., Laskin A.S.** Chislennoye i eksperimentalnoye issledovaniye potoka v podvodyashchem trakte tsilindra vysokogo davleniya turbiny AES. [Numerical and experimental research of the flow in inlet manifold hpc of the steam turbine for

NPP]. *St. Petersburg State Politechnical Universiti Journal*. St.Petersburg: SPbGPU Publ., 2013. № 4(183). Т. 1. S. 338–344. (rus)

3. **Gurskiy D.A., Turbina E.S.** Vychisleniya v Mathcad12. [Calculations in Mathcad 12]. St.Petersburg: Piter, 2006. 544 p. (rus)

4. **Dikson S.L.** Mekhanika zhidkostey i gazov. Termodinamika turbomashin: per. s angl. [Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1981. 213 s. (rus)

5. **Deich M.E.** Tekhnicheskaya gazodinamika. Izd. 2-e, pererabot. [Engineering fluid dynamics]. Moscow, Leningrad: Gosenergoizdat, 1961. 673 s. (rus)

6. **Emtsev B.T.** Tekhnicheskaya gidromekhanika. Izd. 2-e, pererabot. I dop. [Engineering hydraulics]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1987. 440 s. (rus)

7. **Lapshin K.L.** Teoriya turbomashin: Konspekt lektsiy. [Theory of turbomachinery: lecture notes]. St. Petersburg: Izd-vo SPbGTU, 2010. 80 s. (rus)

8. Osnovnye elementy SolidWorks. [Basic elements of SolidWorks]. *SolidWorks Russia*. 2010. 534 s. (rus)

9. **Petunin A.N.** Metody i tekhnika izmereniya parametrov gazovogo potoka. [Methods and techniques of measuring the parameters of the gas flow]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1972. 332 s. (rus)

10. **Povh I.L.** Aerodinamicheskiy eksperiment v mashinostroyeniye. [Aerodynamic experiment in mechanical engineering]. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1974. 480 s. (rus)

11. Rasshirennoye modelirovaniye detalei SolidWorks. [Advanced part modeling of SolidWorks]. *SolidWorks Russia*. 2010. 333 s. (rus)

12. **Samoylovich G.S.** Gidrogazodinamika: uchebnik. [Fluid dynamics: textbook]. 2-ye izd. pererab. i dop. Moscow: Mashinostroyeniye, 1990. 384 s. (rus)

13. **Troyanovskiy B.M., Filipov G.A., Bulkin A.E.** Parovye i gazovye turbiny atomnykh elikrostantsiy. [Steam and gas turbines of nuclear power plants]. Moscow; Energoatomizdat, 1985. 256 s. (rus)

14. **Shlikhting G.** Teoriya pogranichnogo sloya: per. s nem. [Boundary layer theory]. Moscow: Nauka, 1974. 712 s. (rus)

15. SolidWorks 2007/2008. Kompyuternoye modelirovaniye v inzhenernoy praktike. [SolidWorks 2007/2008. Computer simulation in engineering practice] / A.A. Alyamovskiy, A.A. Sobachkin, E.V. Odintsov, A.I. Kharitonovich, N.B. Ponomarev. St.Petersburg: BKHV-Peterburg, 2008. 1040 s. (rus)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

КУДРЯВЦЕВ Игорь Александрович – аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
E-mail: ig.kudryavtsev@gmail.com

KUDRYAVTSEV Igor A. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.
E-mail: ig.kudryavtsev@gmail.com

ЛАСКИН Александр Степанович – доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
E-mail: a.s.laskin@mail.ru

LASKIN Aleksandr S. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.
E-mail: a.s.laskin@mail.ru