

А.С. СТЕПЧЕНКО, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;
Е.Н. ДУДКИНА, асп., НТУ «ХПИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТИПОВОГО РЯДА КОНСТРУКЦИЙ КОРПУСОВ ЦИЛИНДРА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ МОЩНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН: ЧАСТЬ I. КЛАССИФИКАЦИЯ И РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ.

Наведений аналіз основних типів корпусів циліндра низького тиску парових турбін, на підставі якого розроблена система принципів класів конструкцій, визначені і вицленовані змінювані елементи структури. Для кожного типу розроблена геометрична модель принципів класу.

The analysis of the basic types of the low pressure cylinder cases of steam turbines on the basis of which the steam of basis classes of designs is developed, changeable elements of structure a certain and isolated. The geometrical model of a basic class is developed for each type.

1 Введение. Современные турбоагрегаты ТЭС и АЭС состоят из нескольких корпусных конструкций называемых цилиндрами. В зависимости от параметров пара на входе в цилиндр их условно разделяют на цилиндры высокого давления (ЦВД), среднего давления (ЦСД) и низкого давления (ЦНД).

ЦНД современной турбины составляет более 80 % по габаритам и объему эксплуатационного обслуживания от всего турбоагрегата. С ростом единичной мощности турбоагрегатов и повышением начальных параметров пара количество ЦНД в одной турбине постепенно возрастало. В настоящее время большинство турбоагрегатов крупной единичной мощности имеет до трех ЦНД, а в некоторых турбинах, например К-500-65/3000 ОАО «Турбоатом», число ЦНД достигает четырех. С увеличением единичной мощности, соответственно, увеличиваются и размеры рабочих лопаток последних ступеней, что обуславливает изменение массогабаритных показателей элементов ЦНД турбины. В турбоагрегатах большой мощности металлозатраты на изготовление статорной части цилиндра низкого давления достигают 70-75% от массы всей турбины. Поэтому оптимизация конструкций ЦНД при сохранении надежности является актуальной задачей создания более унифицированных и менее металлоемких корпусов ЦНД.

В первых исследования динамических характеристик ЦНД элементы системы турбоагрегат – фундамент – основание (ТФО) рассматривались отдельно по частям, но такой подход, основанный на раздельном рассмотрении динамических свойств валопровода, корпусных элементов и фундамента, дает неверные результаты [1,2]. Найденные без учета взаимного влияния собственные частоты отдельных элементов ТФО часто существенно отличаются от реальных значений [3]. Поэтому были предложены и апробированы

модели, учитывающие взаимное влияние отдельных частей системы, т.е. рассматривать связанные колебания валопровода, статора и фундамента, что показало необходимость детального моделирования ЦНД как трехмерного тела [4].

Конструкции ЦНД разных турбоагрегатов однотипны по форме, но отличаются габаритными размерами и внутренними пропорциями в зависимости от мощности. При этом расчетные исследования и экспериментальные исследования показали, что динамические характеристики сильно изменяются в зависимости от конструкций ЦНД [5,6]. Поэтому задача систематизации типового ряда ЦНД и последующей оптимизации конструкции по частотному спектру актуальна.

2 Постановка задачи. Целью работы является систематизирование типового ряда ЦНД и построение параметрической модели для дальнейшей оптимизации их конструкции. Предлагается рассмотреть и классифицировать типичные модели крышек и корпусов ЦНД выпускаемых ОАО «Турбоатом», определить изменяемые и неизменяемые характеристики структурных элементов конструкций ЦНД и на основании этого построить параметрическую модель типового ряда конструкций ЦНД.

3 Анализ конструкции корпусов ЦНД. Основная характерная особенность ЦНД – большие габариты, и хотя перепад давлений на корпус ЦНД невелик, но его большие размеры обуславливают действие на него больших сил от перепада давления. Поэтому корпус должен иметь большое число ребер и подкосов, делающих его достаточно жестким.

Корпус ЦНД выполнен двухстенным. Он состоит из внутренней обоймы, в которой размещается двухпоточная проточная часть и наружного корпуса.

Внутренний корпус ЦНД имеет несколько способов крепления к наружному корпусу. Первый вариант, когда корпус состоит из сварной средней части, обойма и выходные патрубки представляют собой единое целое, поэтому деформация каждой из частей сказывается на деформации остальных. Данный вид корпусов встречается редко, поэтому в данной статье не рассматривается.

Во многих ЦНД используют корпус с внутренней обоймой. Обойма свободно устанавливается во внешнем корпусе, деформации которого практически не передаются на обойму. Обойма устанавливается во внешнем корпусе с помощью фланца нижней части обоймы, который подвешивается во внешнем корпусе на уровне горизонтального разъема с помощью четырех лапок. Таким образом, обойма может учитываться в форме сосредоточенных масс и кинематических ограничений.

Наружный корпус каждого ЦНД имеет горизонтальный разъем (А-А), делящий корпус на разъемные верхнюю и нижнюю части, и вертикальный

(Б-Б) – технологический – разъем, делящий корпус на два выхлопных патрубка – стороны регулятора и стороны генератора, т.е. корпус имеет две плоскости симметрии.

Наружный корпус каждого ЦНД (рис. 1) включает: два выхлопных патрубка, имеющих верхние части 4 и нижние части 15 с вваренными в них картерами подшипников 5 и 9.

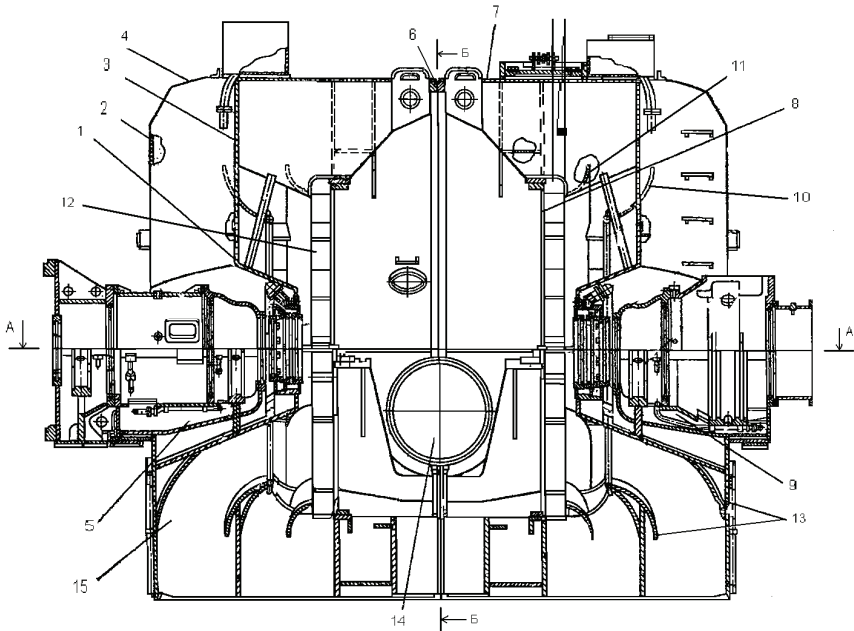


Рисунок 1 – Наружный корпус ЦНД: 1 – конус-обтекатель верхней части ЦНД; 2 – торцевой лист; 3 – лист проема; 4 – верхняя часть ЦНД; 5, 9 – картеры; 6 – вертикальный фланец; 7 – обечайка; 8 – поперечный лист; 10,12,13 – направляющие листы; 11 – козырек; 14 – отверстие-горловина для паровпуска; 15 – нижняя часть ЦНД.

Верхняя часть ЦНД (стороны регулятора или стороны генератора) является частью герметичной пароприемной камеры и представляет собой крупногабаритную сварную конструкцию, в которой наружная оболочка - цилиндрического профиля обечайка 7. С одной стороны обечайка закрыта торцевыми листами 2, листом проема 3, конусом-обтекателем 1 и фланцем для крепления верхней части корпуса уплотнения. С другой, открытой, стороны к обечайке приварен вертикальный фланец — полукольцо 6, при помощи которого эту верхнюю часть соединяют со смежной верхней частью. Фланец 6, кроме того, увеличивает жесткость верхней части патрубка.

В середине верхней части ЦНД в качестве основного несущего элемента, воспринимающего усилие на обечайку от атмосферного давления при ра-

боте турбины, использован поперечный лист 8, отгораживающий секцию размещения обоймы диафрагм от секции проточной части.

Чтобы уменьшить изгибные напряжения и прогибы торцевых листов 2, к их средней по высоте части часто приварены короба из листового проката.

Нижняя часть ЦНД — крупногабаритный сборочный узел турбины - является частью пароприемной камеры отработавшего в ЦНД пара и представляет собой прямоугольную сварную конструкцию с тремя высокими сплошными стенками по периферии и четвертой - меньшей высоты — на вертикальном стыке двух нижних частей патрубков. К торцевой стенке внутрь ЦНД приварен картер 5 или 9 со встроенной опорой подшипника. Снаружи, по периметру, к сплошным стенкам приварен балкон, которым ЦНД опирается на фундамент.

Из-за наличия встроенной опоры подшипника нижняя часть выхлопного патрубка при работе турбины несет не только статическую нагрузку от атмосферного давления, собственного веса, веса ротора и веса обоймы с диафрагмами, но и динамическую. Динамическая нагрузка определяется неуравновешенностью ротора и силами, возникающими при вибрации вала (например, при динамической неустойчивости валопровода, при автоколебаниях вала).

4 Классификация наружных корпусов ЦНД. Как уже было отмечено выше, горизонтальный разъем делит корпус ЦНД на верхнюю и нижнюю части, поэтому можно сделать следующую классификацию внешнего корпуса: 1 - верхняя половина (крышка), 2 - нижняя половина.

4.1 Анализ структуры крышки наружного корпуса ЦНД. Сложной частью корпуса ЦНД является крышка, которая представляет собой оболочечную конструкцию полуцилиндрической формы с боковыми стенками, как показано на рис. 2. Для обеспечения прочности и устойчивости крышка выполняется в виде двухстенной конструкции с продольными и поперечными перегородками и стержнями.

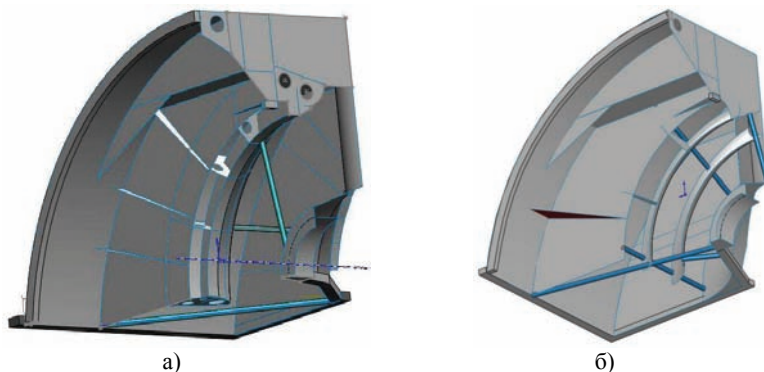


Рисунок 2 – Различные конструкции крышек ЦНД: а) К-310-23,5; б) К-500-65/3000

С целью дальнейшего совершенствования конструкций типовых ЦНД и так как показали результаты исследования [7], двухстенная модель имеет необоснованно большие запасы по прочности и устойчивости, поэтому была разработана конструкция второго типа крышки корпуса, которая при модернизации была существенно «облегчена». Старая двухстенная конструкция обечайки и торцевых стенок заменена на одностенную, что естественно понизило жесткость крышки. Такой переход на одностенную конструкцию с оребрением торцевых стенок и цилиндрической обечайки дает возможность снизить металлоемкость такой конструкции. Двухстенные конструкции верхних половин корпуса ЦНД в настоящее время не используются, поэтому в данной статье не рассматриваются.

4.2 Анализ структуры нижней половины наружного корпуса ЦНД.

Нижняя половина наружного корпуса ЦНД бывает двух типов: «сотовой» и стержневого (рис. 3).

В «сотовой» конструкции прочность стенок нижней половины корпуса обеспечивается силовой системой, представляющей собой набор продольных и поперечных ребер жесткости.

В первой половине 80-х годов ОАО «Турбоатом» приступил к выпуску ряда модификаций ЦНД, в которых с целью улучшения аэродинамического качества выхлопных патрубков вместо системы ребер жесткости в нижних половинах патрубков («сотовая» конструкция) применена система стержней («стержневая» конструкция). Главными преимуществами ЦНД «стержневой» конструкции по сравнению с традиционной «сотовой» конструкцией является наиболее низкий коэффициент потерь и сравнительно низкая удельная металлоемкость.

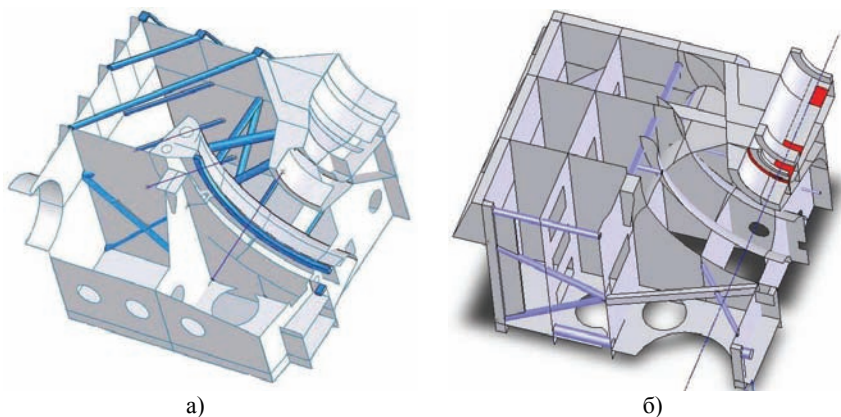


Рисунок 3 – Нижняя половина наружного корпуса ЦНД:
а) «сотовая» конструкция; б) стержневая

5 Разработка структурной модели наружного корпуса ЦНД. Весь модельный ряд выпускаемых турбин ОАО «Турбоатом» можно представить как различные комбинации вариантов конструкции крышек и корпусов, представленных на рис.2 и рис.3 соответственно.

1 вариант. Одними из представителей комбинации двухстенной верхней половины и «сотового» корпуса является турбина К-500-240-2.

2 комбинированный вариант: Конструкция одностенной крышки с оребрением торцевых стенок и «сотовой» нижней половины используется при изготовлении ЦНД турбин К-500-65/3000.

Существующая концепция, принятая при проектировании корпусов ЦНД со встроенными опорами: жесткий низ – податливый верх в принципе верна. Однако, как показали исследования на Кольской АЭС [8], вероятность повышенных вибраций опор подшипника в таком корпусе выше, чем у более жесткого (1 вариант).

3 вариант: Еще одним вариантом является комбинация одностенной крышки и «стержневой» нижней половины. Основными представителями этого типа являются турбины К-320-23,5 и К-310-23,5.

В результате проведенного анализа типового ряда конструкций ЦНД, систематизируя его результаты, предлагается структурная схема семейства конструкций ЦНД (рис. 4.) с целью дальнейшего создания параметрической модели для каждого класса конструкций.

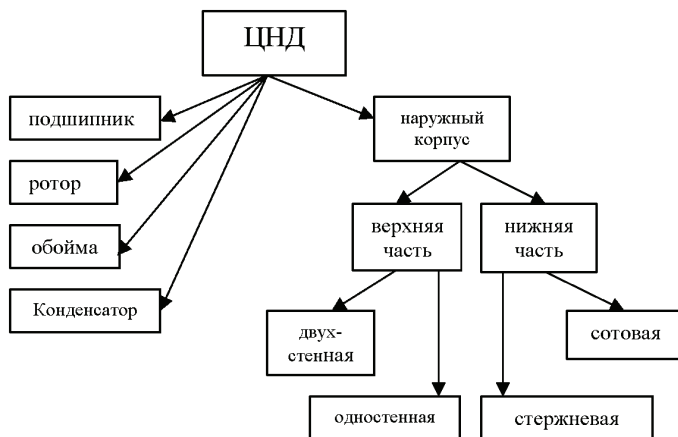


Рисунок 4 – Структурная схема элементов ЦНД

Анализируя динамические свойства структурных элементов приведенных на рис. 4. необходимо отметить, что подшипник, обойма и конденсатор жесткие массивные элементы конструкции и могут быть учтены как система при построении конечно-элементной модели как система сосредоточенных масс и кинематических ограничений. Ротор не имеет прямой кинематической

связи с корпусом, так как опирается на корпус через подшипник скольжения, масляный слой которого обеспечивает упруго-демпферную связь. Поэтому ротор может быть учтен в виде сосредоточенной массы. Данная модель хорошо себя при анализе ряда корпусов ЦНД в системе ТФО [4-6]. Поэтому необходимо параметризовать только конструкцию наружного корпуса, классификация конструкций которого и сделана в данной работе.

Заключение. В работе проведен анализ типового ряда конструкций ЦНД выпускаемых ОАО «Турбоатом» для турбоагрегатов различной мощности и предложена классификация и систематизация конструкций корпусов ЦНД, на основании которой разработана структурная схема элементов ЦНД. Таким образом, в каждом классе конструкций ЦНД выделены общие для всех ЦНД структурные элементы – это является базой для разработки параметрической модели наружного корпуса ЦНД с дальнейшим вычленением изменяемых и неизменяемых характеристик структурных элементов конструкции. Предложена концепция построения конечно-элементных моделей классов ЦНД на основе суперэлементного подхода.

Стабильные, не превышающие нормы, уровни вибраций опор ротора ЦНД во всем диапазоне режимов работы гарантируют долговечность всего турбоагрегата в целом. Успешное решение этой задачи возможно только на основе применения современных методов параметрического моделирования конструкций ЦНД с дальнейшей оптимизацией их статических и динамических характеристик.

Список литературы: 1. *Богомолов С.И. Журавлева А.М.* Колебания сложных механических систем. – Харьков: Вища школа А.М., 1978. – 136 с. 2. *Воробьев Ю.С. Шульженко Н.Г.* Исследования колебаний системы элементов фундамента. – Киев: Наукова думка, 1978. – 135 с. 3. *Амбросимов Н.А., Чихачев И.В.* Исследования динамической податливости системы «турбоагрегат-фундамент-основания» головного блока мощностью 12000МВт до укладки валопровода // Изв. ВНИИГ им. Веденеева 1984 г. – Вып. 173. – С. 12-20. 4. *Степченко А.С.* Численные исследования динамических характеристик системы турбоагрегат-фундамент // Дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Харьков: ХГПУ, 1994 г. – 194 с. 5. *Жовдак В.О., Кабанов О.Ф., Степченко А.С., Красников С.В.* Исследование динамики статорных частей турбин К-300-240 и К-325-23,5 ХГТЗ // Проблемы машиностроения. – Харьков: Контраст, 2001. – Т. 4, № 3-4. – С. 4-12. 6. *Жовдак В.О., Красников С.В., Степченко А.С., Торяник А.В.* Исследование явления расстройки в многокорпусных турбоагрегатах на основе компьютерной модели // Вісник НТУ «ХП». Тематичний випуск «Динаміка і міцність машин». – Харків: НТУ «ХП». – 2008. – № 47. – С. 70-79. 7. *Виноградов Н.Н., Виноградова Л.Д., Герцберг Е.Я., Зидман А.П., Сачков Ю.С., Соколов Э.Н.* Исследование прочности и устойчивости корпусов ЦНД на металлических моделях // Труды ЦКТИ, Л. – Вып. 182. – 1980. 8. *Рабинович Э.М., Виноградов Н.Н.* Исследование деформационного состояния ЦНД К-500-65/3000 в эксплуатации на ЛАЭС и ЦНД К-220-44-3 на Кольской АЭС. (Часть II. Кольской АЭС). Отчет ЦКТИ, Л., 1989 г.

Поступила в редколлегию 6.11.2009