

УДК 620.162.3

**ВОЗНИКНОВЕНИЕ ИЗГИБА В ЭЛЕМЕНТАХ ТУРБИНЫ  
THE OCCURRENCE OF DEFLECTION IN THE ELEMENTS  
OF THE TURBINE**

Д.А. Хлопкова, С.Е. Маркевич, Е.А. Савенко  
Научный руководитель – Н.В. Пантелей, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
panteley@bntu.by  
D. Khlopkova, S. Markevich, E. Savenko  
Supervisor – N. Panteley, Senior Lecturer  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

**Аннотация:** Паровые турбины – эффективные, но сложные машины, поэтому существует ряд возможных причин, по которым они могут выйти из строя. Одна из таких неисправностей известна как изгиб ротора, который возникает при эксплуатации турбоагрегатов. Несмотря на то, что существует ряд решений по его устранению, раннее обнаружение с помощью плановых ремонтов является ключом к поддержанию надлежащей эффективности и предотвращению возможного повреждения.

**Abstract:** Steam turbines are efficient but complex machines, so there are a number of possible ways they may malfunction. One such malfunction is known as bending, which occurs during the operation of turbine units. Although there are a number of solutions to fix it, early detection through routine repairs is key to maintaining proper efficiency and preventing possible damage.

**Ключевые слова:** турбина, изгибающие напряжения, ротор, вибрация, трение, лопатки, цилиндр высокого давления.

**Keywords:** turbine, bending stresses, rotor, vibration, rubbing, blades, high-pressure cylinder.

### **Введение**

Одной из самых серьезных проблем, которые возникают при эксплуатации электростанций является изгиб ротора, приводящий к преждевременному выходу из строя лопаток турбины и других ее элементов. Экстремальный изгиб ротора обычно связан с контактом неподвижных частей турбины и ротором.

### **Основная часть**

*Трение ротора.* Вызванное небольшим зазором, трение диафрагм нарушает уплотнение ротора. Это возникает, когда ротор с большой массой на рабочей скорости входит во взаимодействие с неподвижной поверхностью, как правило, из-за слишком малого зазора между ротором и мембранным сальником. Также может наблюдаться локальное увеличение температуры в точке контакта, вызывающее повышение температуры металла в точке контакта из-за трения.

После останова неравномерное охлаждение ротора приводит к контакту ротора с неподвижными частями. После отключения установки высокотемпературный ротор изгибается из-за массы ротора и расстояния между опорами

подшипников. Это приводит к необратимому изгибу вала. Трение уплотнения, вызванное изгибом ротора и трением лопаток, представлено на рисунке 1.

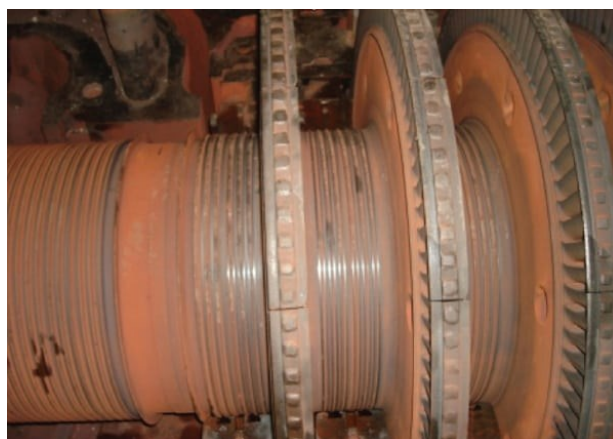


Рисунок 1 – Изгиб ротора

Результат постоянного изгиба вала, обусловленный неравномерным охлаждением, при следующем пуске сразу же проявится в виде сильной вибрации ротора, вызванной недостаточным зазором между вращающимися и неподвижными частями, и валом, расположенным не по центру подшипника. Если изменение зазора мало, то может возникнуть большое трение вдоль ротора, это приведет к его повреждению.

Чтобы избавиться от изгиба ротора во время охлаждения, предоставляются инструкции по допустимой скорости охлаждения. Например, турбина должна оставаться включенной, пока температура цилиндра высокого давления (ЦВД) не опустится ниже 150 °С, а температура масла не опустится ниже 75 °С.

*Перекося ротора и корпуса.* Несоосность муфты между подшипником и валом или между двумя валами может вызвать изгиб системы. Несоосность двух валов ротора вызывает смещение центра масс, что при большой скорости вращения создает центробежную силу в радиальном направлении, что вызывает изгиб ротора.

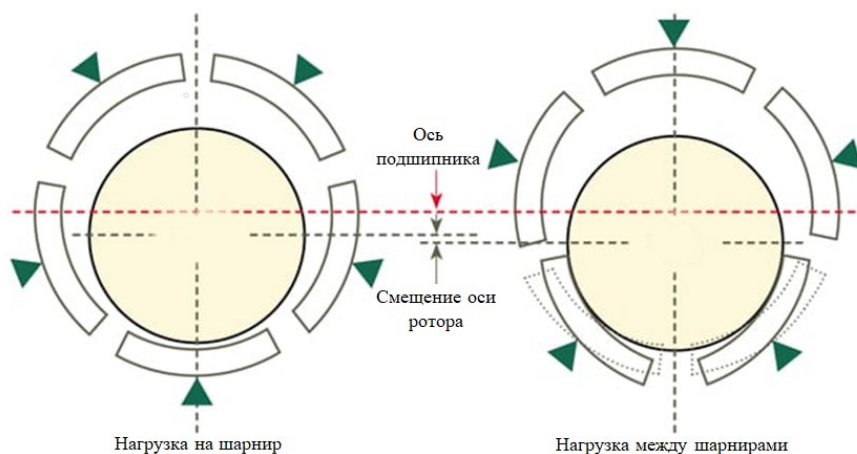


Рисунок 2 – Смещение центра вала

Существует пять основных факторов, вызывающие смещение:

1. Плохое соединение между корпусом турбины и фундаментной рамой. Необходимо обращать внимание на фундаментную раму, включая шпонки, болты и колодки, чтобы было возможно свободное движение опорных поверхностей, особенно при пуске и изменении нагрузки.

2. Сложность сборки переднего подшипника турбины. В цапфовом подшипнике при вращении вала вытесняется масло из нижней части, что вызывает изменение слоя масляной пленки. При этом осевая линия вала смещается в сторону и вверх. Если поверхность контакта большая, трение на поверхности подшипника возрастет, что приводит к усилению трения и коррозии поверхности подшипника, а также к повышению вибрации и смещению ротора. В результате будет утечка масла из подшипников и трение уплотнительных сальников. Если площадь контакта подшипника понижается, то масляная пленка вызывает неравномерное движение ротора внутри подшипника.

3. Несоосность ротора с отверстиями и муфтами. Правильная центровка ротора теряется, если ось одного ротора не непрерывна с ротором следующего корпуса. После капитального ремонта турбины необходимо проверить центровку ротора относительно муфт и другие факторы, вызывающие изменение начального расположения отдельных корпусов, роторов и подшипников.

4. Несоосность отверстия сальника и ротора. Ось отверстия сальника должна совпадать с осью ротора при нормальных температурах, которые возникают при работе турбины. Необходимо быстро идентифицировать любые потери в уплотнительных зазорах в процессе прогрева турбины, так как возможны изменения зазора, которые вызывают изгиб цилиндров из-за отличия температур между нижней и верхней частями цилиндра.

5. Трение лопаток. Контактное трение лопаток о стенки цилиндра на реактивных стадиях вызывает высокую вибрацию изгиба лопаток, обычно у их основания, пример выдавливания цапфы в лопатках ротора показан на рисунке 3.



Рисунок 3 – Ротор турбины

*Дисбаланс ротора.* Кривизна ротора смещает ось вращения вала, смещая центр масс ротора и создавая вибрацию, которая влияет на лопатки тремя способами:

1. Вибрация приводит к структурным проблемам лопаток, так как центробежные силы создают увеличение растягивающих сил в поперечном сечении лопатки. Под действием пара высокого давления, протекающего в осевом направлении через цилиндр турбины, появляются напряжения изгиба в лопатках. Расход пара, перепад температуры на ступени лопаток, их скорости вращения и вес влияют на величину изгибающих напряжений. Температура пара влияет на коррозию лопаток и механические свойства. Коррозия вызывает отказ регулирующей ступени, которая представлена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Регулирующая ступень

2. Внешние причины, такие как неудовлетворительная динамическая балансировка ротора, отклонение шага лопатки, неправильно смонтированный стык между двумя половинными диафрагмами или коррозия кромки вызывают вибрацию лопатки.

3. Размеры поворотных лопаток и способ их установки на роторы могут быть различными. После проведения капитального ремонта важно поддерживать одинаковый вес и материалы лопаток, особенно при их замене. Даже незначительное изменение веса лопаток или их центра тяжести вызывает вибрацию ротора и дисбаланс. Снятие диска привело к появлению глубоких царапин на валу, что представлено на рисунке 5.

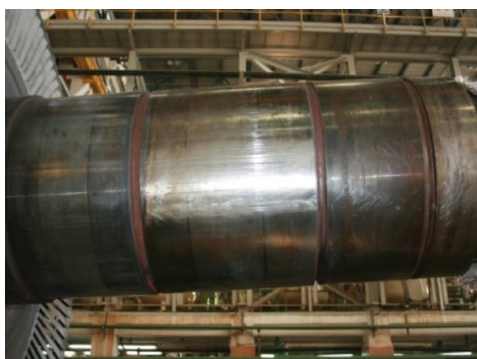


Рисунок 5 – Вал турбины



*Корпус – фактор вибрации ротор.* Колебания температуры корпуса могут вызывать вибрацию турбины различными способами:

1. Цилиндр турбины может иметь температурное расслоение, вызванное недостаточной теплоизоляцией от корпуса или в других областях. Нарушение теплоизоляции вызвано недостаточной изоляцией при соединении стыков и труб с корпусами, обычно в нижней части турбины. Плохая изоляция корпуса в нижней части, например, может вызвать температурный градиент сверху вниз корпуса, что приведет к деформации корпуса и упругому изгибу ротора.

2. Если турбина запускается из горячего состояния до того, как она вернется в пределы кривизны, вращающиеся лопатки и неподвижные диафрагмы могут тереться и повреждать сальников и уплотнений диафрагмы. При повышении веса вала увеличиваются размеры ротора и цилиндра турбины, а также тепловая инерция вала. Между запусками требуется более длительный период времени, поэтому любая кривизна ротора устраняется перед запуском турбины.

3. Разница температур верх-низ приводит к изгибу вала: когда верхняя часть корпуса горячее, чем нижняя, он имеет тенденцию изгибаться вниз. Если температурный градиент не изменяется от верха к низу и по длине, то максимальное изгибающее напряжение возникает в центре корпуса по вертикали и между опорами по горизонтали.

#### **Заключение**

Таким образом, если ротор имеет более высокую кривизну, чем нормальный диапазон, и если регулирование пути потока пара не было выполнено тщательно во время горячего запуска, следует ожидать трения.

Разница температур между верхней и нижней частью цилиндра не должна превышать установленный предел во время запуска турбины.

Чрезмерные нагрузки на соединение труб могут вызвать деформацию корпуса, а изгибающие моменты, приложенные к фланцам корпуса, могут вызвать смещение и перемещение цилиндра внутри корпуса, что может увеличить вибрацию ротора.

Хотя вибрации паровой турбины сами по себе не являются проблемой, они являются признаком, указывающим на недостатки в турбине, которые должны быть устранены быстро, чтобы избежать необратимых повреждений.

#### **Литература**

1. Оценка конструкции паровых турбин [Электронный ресурс]/ оценка конструкции паровых турбин. – Режим доступа: <https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/osenka-konstrukciy-parovyh-turbin/Page-12.html/>. – Дата доступа: 27.03.2021.

2. Анализ повреждаемости роторов паровых турбин [Электронный ресурс]/ анализ повреждаемости роторов паровых турбин. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-povrezhdaemosti-rotorov-parovyh-turbin-obzor/>. – Дата доступа: 27.03.2021.