

УДК 621.165 : 621.438 : 621.65.03

**В.Ф. ШАТОХИН, С.Д. ЦИММЕРМАН**

*ОАО «Калужский турбинный завод», Россия*

## **ПРЕДОПРЕДЕЛЁННОСТЬ РАЗВИТИЯ ЛИКВИДАЦИОННОГО ПРОЦЕССА ТУРБОАГРЕГАТА И ПРИМЕРЫ ЕГО ПОСЛЕДСТВИЙ**

В статье обращается внимание на возможность развития в агрегатах силовых и энергетических установок ликвидационного процесса, конечный результат которого существенно зависит, как от динамических характеристик агрегата, приобретённых и накопленных в процессе эксплуатации повреждений, так и от введения конструктивных мероприятий, предотвращающих развитие процесса ликвидации установки. Приведены примеры разрушений, полученных турбоагрегатами (ТА) и, в частности, повреждений ТА, имевших средства нарушения ликвидационного процесса.

**турбоагрегат (ТА, турбогенератор), валопровод (ротор), обкат ротора по корпусу, контакт ротора со статором, нестационарные колебания, кинематическое воздействие**

Главным требованием заказчика всегда было и остаётся требование надёжности и безотказной работы установки с турбоагрегатом (ТА), позволяющее получать экономическую выгоду (прибыль) как можно дольше. Однако большое внимание надёжной эксплуатации ТА уделяется ещё и в связи с другим немаловажным обстоятельством. Дело в том, что даже незначительный отказ может спровоцировать развитие крупной аварии. Слишком много факторов определяют неустойчивую эксплуатацию установки – от скрытых дефектов до недостаточной продуманности конструкторских решений. Поэтому сложнейшие агрегаты, эксплуатируемые в различных отраслях хозяйства страны, несут в себе значительную неопределённость своего поведения, особенно в аварийных ситуациях. Эксплуатационники абсолютно не застрахованы как от случайностей, так и от эффектов, обусловленных, например, свойствами функционирования системы «рабочее тело – турбоагрегат – линия электропередач высокого напряжения» на электрической станции (ЭС), когда, например, наложение колебательных процессов в элементах не сводится к простой сумме свойств отдельных её частей. Взаимодействие колебательных процессов в отдельных элементах, как правило, придаёт системе совершенно новые свойства, что

проявляется в преобразовании частот и появлении новых качественных эффектов. Примером могут служить возникновение так называемых несинхронных колебаний в электрической сети, вызывающих крутильные колебания валопровода агрегата.

Существует традиционно сложившийся подход к надёжности ТА в установке как к элементу системы, имеющему некоторый процент времени на отказы в работе по различным причинам. По оценкам исследовательского института США EPRI, причиной 73% случаев вынужденных остановов паровых турбин ЭС являлись поломки рабочих лопаток турбин [7]. Вибрационные и другие типы поломок отдельных вращающихся элементов кроме этого несут в себе определённую опасность перехода в более сложную стадию аварийного процесса. Поэтому проблема надёжности агрегатов силовых и энергетических установок делится на две взаимосвязанные фазы:

– обеспечение безотказной работы элементов и узлов установки в процессе её создания и эксплуатации;

– предотвращение перехода возможной аварийной ситуации в процесс ликвидации установки, как целого механизма.

Поэтому оценку надёжности следует произво-

дять показателями, характеризующими не только долговечность, но и безопасность.

Тема работы выбрана не случайно. Обсуждение вопроса надёжности с ведущими специалистами турбостроения (двигателестроения) показывает, что в обеспечении надёжности агрегатов силовых и энергетических установок чаще всего рассматривается одна сторона проблемы. Кроме этого складывается впечатление, что не все возможные страховочные меры принимаются при конструировании агрегатов для снижения опасности развития аварийной ситуации.

Всё внимание при разработке и модернизации конструкций ТА направлено на предупреждение аварий, чему способствуют как новые конструкторские решения, увеличивающие надёжность работы ТА (например, снижение опасности появления низкочастотной вибрации энергетических турбин, вибрационная отстройка лопаточного аппарата, дисков и т. п.), так и плановые, профилактические ремонты с тщательной дефектоскопией ответственных деталей, осмотры и мониторинг вибрационного состояния ТА. И это правильно. Предупреждение - лучший способ исключения возможных последствий. Но всё-таки огромных затрат на предупреждение аварий оказывается недостаточно, так как они продолжают случаться. Опасность возрастания их числа в перспективе определяется выработкой ресурса основным парком энергетических машин страны. В связи с этим многократно увеличивается возможность аварийных ситуаций на ЭС. Атомная и тепловая энергетика традиционно относятся к наиболее ответственным отраслям промышленности, а в сложившихся условиях внимание к увеличению надёжности эксплуатируемого оборудования станций возрастает многократно. Систематический и более жёсткий контроль, соблюдение правил эксплуатации, раннее выявление дефектов (усталостных трещин лопаток, дисков и валов, недопустимых пластических деформаций ползучести теплонапряжённых деталей ТА), способных вызвать впоследствии

крупную аварию продолжают оставаться важной, но далеко не единственной задачей. Наряду с грамотным проектированием и качественным изготовлением агрегата это можно считать первой фазой обеспечения надёжности ТА. Основной характеристикой этой фазы является создание условий, исключающих эксплуатацию агрегата с повышенными рисками, в частности, с недопустимыми амплитудами вибрации при стационарных и нестационарных воздействиях, надёжной эксплуатацией установки в целом.

На вторую (последнюю) и, может быть, основную фазу с точки зрения существования ТА как целого механизма обращают внимания мало. Эту фазу называют ликвидационным процессом – процессом, который может начать развиваться после незначительной, по существу, поломки, могущей стать пусковым механизмом развития более опасного явления, иногда вплоть до полной ликвидации установки в целом. В основе процесса ликвидации агрегата, по нашему мнению, лежит явление асинхронного обката ротора по статору [1, 2].

В России случилось несколько крупных аварий [2, 3], когда аварийная ситуация заканчивалась катастрофическими последствиями. Известные нам катастрофические аварии ТА мощностью 90, 330, 500, 600 МВт с аналогичными конечными результатами произошли за рубежом во второй половине двадцатого века. Ниже, на рис. 1 показан результат ликвидационного процесса, развившегося на ТА Новочеркасской ЭС. Валопровод ТА мощностью 300 МВт длиной 30 м был разрушен на семь частей. Характерные виды разрушений по конечным результатам ликвидационного процесса приведены на рис. 2; 3, а; 3, б для ТА той же мощности Каширской ЭС в 2002 году [3]. Внимание к авариям такого типа ТА уделяется ещё и потому, что в настоящее время идёт интенсивная модернизация ТА этого класса мощностей. Подробный анализ, выполненный в [3], показал, что авария ТА произошла вследствие наложе-

ния нескольких причин, ключевой из которых стало разрушение ротора генератора после образования и развития до критического размера поверхностной усталостной трещины в зоне галтели шейки генератора. Исключение возникновения трещин усталости, также как и исключение возможности появления мгновенной разбалансировки ротора ТА, короткого замыкания в сети и т.п. нестационарных процессов способствовало бы повышению надёжности ТА. Однако достаточно много причин определяют отсутствие полной гарантии появления и даже значительного развития трещин усталости в процессе эксплуатации, а измеряемые вибрационные параметры не меняются даже при значительном развитии трещины вплоть до начала ликвидационного процесса.

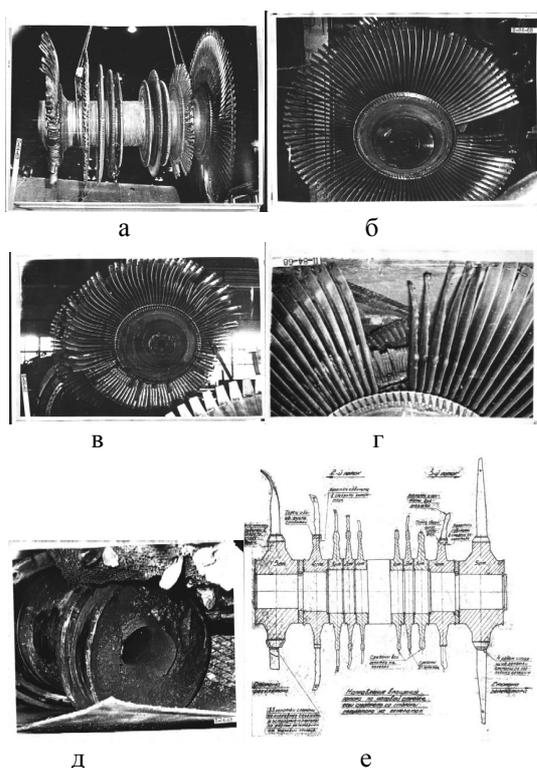


Рис. 1. Разрушения валопровода ТА 300 МВт в районе ротора низкого давления (1968г.): а, в, е – ротор РНД; б, г – места обрыва лопаток

Обнаружить трещину достаточно сложно и в условиях ремонта, так как методы выявления дефектов, способных стать началом развития ликвидационного процесса, не лишены недостатков из-за низкой эффективности самих методов и средств контроля:

- возможность контроля только поверхности из-

делий (оценить состояние глубинных слоёв металла и металла сварных соединений невозможно);

- зоны концентрации напряжений, являющиеся основными источниками развития повреждений, часто затруднены для контроля;

- традиционные методы неразрушающего контроля пока непригодны для контроля дефектов на ранней стадии их развития.

Можно указать ещё ряд причин, затрудняющих выявление дефектов при плановых и профилактических ремонтах, что лишь подтверждает факт неопределённости в послеремонтной эксплуатации агрегата. Как известно, катастрофическая авария на Каширской ЭС произошла через полторы недели после капитального ремонта.



Рис. 2. Общий вид аварии ТА 300 МВт (2002 г.)

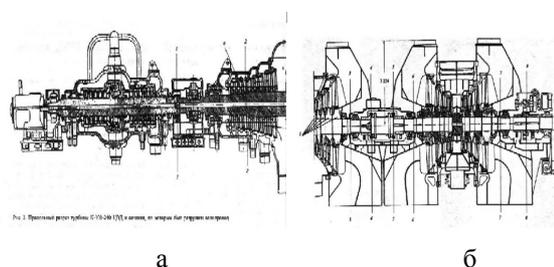


Рис. 3. Продольный разрез турбины и сечения, по которым был разрушен валопровод ТА (2002 г.): а, б – две части турбины (без генератора)

Импульсные кинематические воздействия, в частности, также являются источником возбуждения нестационарных процессов [6, 8]. По отношению к установке ТА они считаются внешними воздействиями, в отличие от разнообразных кинематических воздействий, чаще всего вибрационного характера, со стороны отдельных механизмов при общей монтажной раме установки (например, со стороны винта корабля, генератора ТА). В различных условиях эксплуатации агрегатов к внешним воздействиям

можно отнести: ударные волны от неконтактных взрывов, распространяющиеся по различным средам, колебания земной коры при землетрясениях, ускорения при столкновении транспортных средств, удары о пирс корпуса корабля, ускорения при взламывании льда для ледоколов и т.п. Внимание к подобным типам воздействий небезосновательно, так как в процессе нестационарных колебаний системы ротор-опоры ТА амплитуды перемещений отдельных элементов ТА могут быть значительными, что может привести к соприкосновению вращающегося ротора и статора и развитию явления обката.

В такой ситуации изучение второй фазы развития аварии – ликвидационного процесса становится актуальной задачей. Надо отметить, что большинство специалистов недостаточно уделяет внимания проблеме сглаживания возможного ликвидационно-

го процесса, а точнее сглаживания его последствий, считая, что в этот процесс вмешаться уже нельзя. Наше мнение иное. На карту ставится сохранность не только основного оборудования станции, фундамента установки и целостности самого объекта, но и возможность нарушения экологических условий, если это атомная станция, самолёт, если это агрегат, сконструированный для специальных условий эксплуатации, например, в подводном положении. Решить все проблемы надёжности на этапе проектирования и эксплуатации удаётся не всегда, поэтому некоторые дополнительные страховочные меры на случай аварийной ситуации должны быть предусмотрены.

В табл. 1 показаны основные причины, способствующие развитию режима асинхронного обката, перерастанию аварии в её катастрофическую фазу или нарушающие этот режим.

Таблица 1

Основные причины, способствующие развитию режима асинхронного обката, перерастанию аварии в её катастрофическую фазу или нарушающие этот режим

<b>Развитию режима асинхронного обката ротора по статору (ликвидационному процессу)</b>	
<b>Способствуют</b>	<b>Нарушают режим (или режим не начинается)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• жёсткие конструкции статора в месте контакта, обеспечивающие экономичную и в то же время опасную круговую траекторию обката с радиусом равным зазору <math>\Delta</math> между ротором и статором; потери энергии в ударном процессе в этих условиях незначительны;</li> <li>• большая изгибная жёсткость ротора в месте контакта также увеличивает силу взаимодействия контактирующих поверхностей. Опасными местами контакта можно считать пучности формы колебаний, ближайшей к рабочим оборотам (а точнее места максимальных динамических прогибов), валопровода ТА при вынужденных колебаниях на рабочих (и резонансных для гибких роторов) оборотах;</li> <li>• уменьшенные зазоры между вращающимся ротором и неподвижными частями турбины, увеличивающие опасность контактов и развития асинхронного обката ротора по статору;</li> <li>• большие коэффициенты сухого трения в местах контактирования ротора со статором;</li> <li>• нарушения правил эксплуатации; нестандартные ситуации, связанные с колебаниями в системе «электрическая сеть-ТА», несинхронные включения в сеть и т.п.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• соблюдение для валопровода ТА правил проектирования, обеспечивающих меры по исключению появления усталостных трещин: <ul style="list-style-type: none"> <li>– отстройка валопровода от крутильных и изгибных резонансов с оборотной и двойной оборотной частотой; предпочтение следует отдавать расположению ближайшей к рабочей скорости резонансной зоны выше рабочей скорости вращения. Когда резонансная зона располагается ниже рабочей скорости вращения, отстройка от рабочей скорости вращения должна быть с максимальным запасом;</li> <li>– уменьшение концентраторов напряжений на переходах между относительно жёсткими и податливыми участками валопровода;</li> <li>– снижение до минимума перегрузок, связанных с КЗ, несинхронными включениями в сеть, колебаниями в системах, включающих ТА и линии электропередач высокого напряжения;</li> </ul> </li> <li>• увеличение зазоров между жёсткими элементами статора и ротора;</li> <li>• обеспечение в районе пучностей форм колебаний (максимальных динамических прогибов) ротора снижения коэффициента трения статорных элементов ТА (например, за счёт графитовых вставок, особенно в местах относительно жёстких участков статора);</li> <li>• установка рамы с корпусными конструкциями ТА или его элементов на амортизаторы с ограничителями перемещений, обладающими значительными потерями энергии и обеспечивающими не только ограничение перемещений ТА по трём направлениям, но и увеличенные потери энергии при нестационарных колебаниях.</li> </ul>

Ситуация здесь весьма схожа с ситуацией сохранения жизни биологического (белкового) механизма, созданного природой за миллионы лет развития – человека. Разницы здесь большой нет. Для человека как биологической машины основным структурным материалом изготовления является белковый материал со своими врождёнными, а потом и приобретёнными в процессе жизнедеятельности дефектами. Накопление дефектов также как и в технологической машине в процессе жизнедеятельности приводит со временем к сбоям в работе, а в конце концов и к развитию того же ликвидационного процесса. По исследованиям биологов накопление повреждений «конечно», т.е. оно особенно ускоряется после ~60 делений клетки, а начало этого процесса – после создания потомства, точнее с временного интервала соответствующего созданию потомства. Медицина в процессе своего длительного развития постепенно вырабатывает и совершенствует методы вывода биологической машины из того ещё недавно запрещённого шокового состояния.

Для ТА сам ликвидационный процесс представляет собой нестационарный процесс и может рассматриваться как специфический процесс самовозбуждающихся колебаний [2], совершающийся в короткий промежуток времени. В основе его лежит асинхронный обкат, сопровождающийся значительными ускорениями участков валопровода в местах контакта со статором. Энергия вращающегося вала практически мгновенно переходит в энергию разрушения [2]. Нужен лишь пусковой механизм. А им может стать любой дефект в непредсказуемой, часто, цепочке развития аварийной ситуации. В огромной степени последствия аварийной ситуации будут зависеть от динамических характеристик ТА [2, 6, 9], определяемых его конструктивным исполнением, а также от приобретаемых в процессе эксплуатации дефектов. Динамические характеристики с увеличением срока эксплуатации не становятся лучше и, в конце концов, стремятся только к ухудшению. Осо-

бенно опасным считается близость резонанса по соответствующей форме колебаний валопровода к числу оборотов, на которых произошло воздействие, например, связанное с мгновенной разбалансировкой. Переход через резонанс также способствует развитию ликвидационного процесса и усугубляет его последствия. Наиболее благоприятным был бы выход из ликвидационного процесса с наименьшими повреждениями. Если для биологического механизма в такой ситуации необходимо дублирование деятельности отдельных органов с целью поддержания деятельности мозга, как основной интеллектуальной идентификации человека, то для технологического механизма, при современном его конструктивном исполнении, достаточно сгладить ликвидационный процесс и остановить агрегат с минимально возможными повреждениями. В последующем, при необходимости, выполняется ремонт или замена блоков установки.

Наши рекомендации по сглаживанию последствий начавшегося ликвидационного процесса основаны на определённых предположениях о сути составляющих ликвидационного процесса, опыте расчётов, экспериментальных наблюдениях и опыте эксплуатации, в частности амортизированных систем механизмов. Предложения по предупреждению аварий и ограничению последствий ликвидационного процесса представлены для наглядности в виде элементов системы предотвращения катастроф агрегатов (СПКА) (рис. 4).

Естественно, без теоретического анализа нестационарных процессов при различных воздействиях на ротор (мгновенной разбалансировке, импульсном кинематическом воздействии, КЗ, несинхронных включениях в сеть и т. п.) невозможно более основательно разобраться с грозным явлением асинхронного обката ротора по статору и выработать дополнительные рекомендации по прекращению развития или сглаживанию последствий ликвидационного процесса. Внимание следует обратить на то,

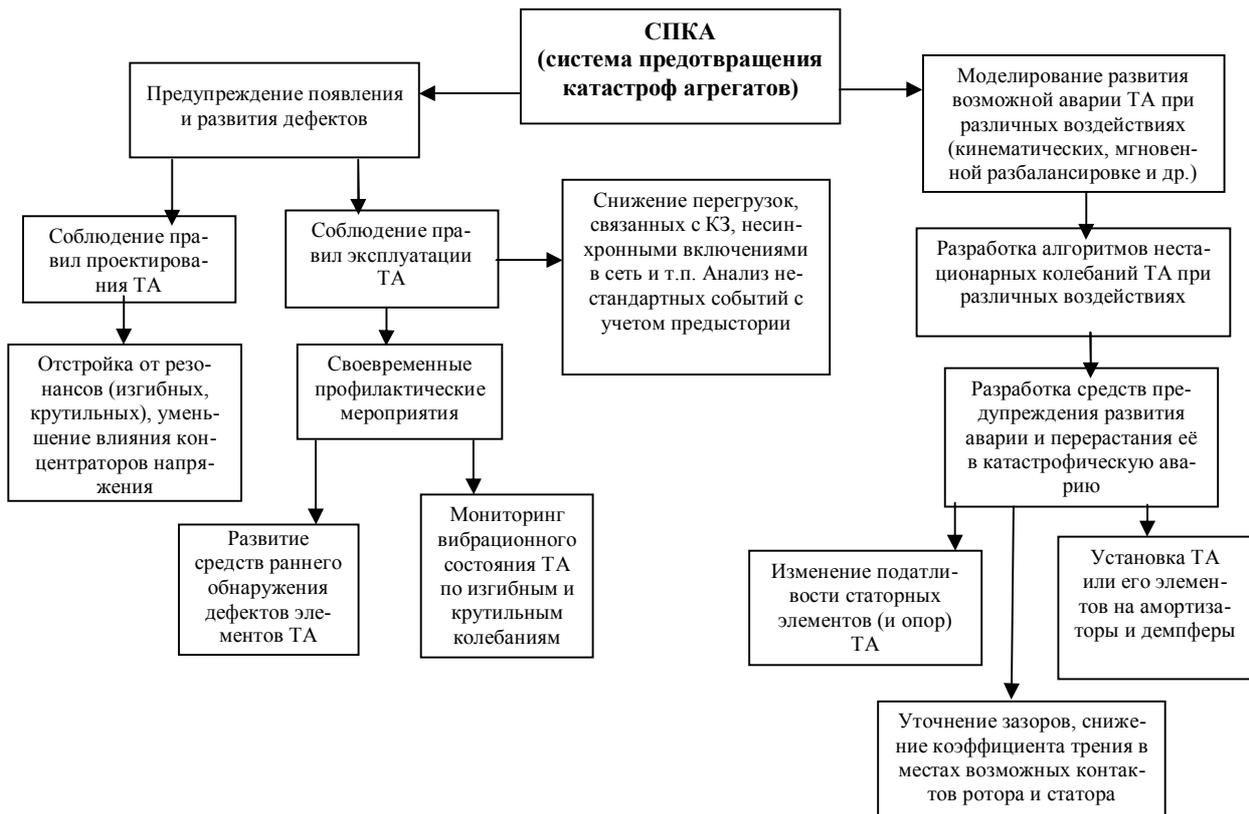


Рис. 4. Элементы системы предотвращения катастроф агрегатов (СПКА)

что проектируемые ТА, как и действующие, не имеют средств предотвращения опасного развития аварии и перерастания её в катастрофическую фазу, средств прерывания ликвидационного процесса, сглаживания ударных нагрузок. Поэтому не исключено, что любая следующая авария вполне может перерасти в свою опасную фазу. При проектировании и модернизации ТА численное моделирование нестационарных процессов необходимо выполнять на некоторые обобщённые зависимости «ускорение-время», характерные для условий эксплуатации установки.

Кардинальным решением проблемы предопределённости развития ликвидационного процесса ТА в соответствии с рекомендациями СПКА, наряду с обеспечением нормативных зазоров между вращающимися и неподвижными частями агрегата, была бы установка ТА на амортизаторы с демпферными устройствами, обладающими значительными потерями энергии при нестационарных колебаниях, как это делается для противоударной защиты ТА

специального назначения. В этом случае дополнительно следует ожидать выигрыш в заметном улучшении акустических характеристик установки.

Для примера на рис. 5 показаны повреждения ротора и подшипников ТА производства Калужского турбинного завода, установленного на раме с амортизирующими устройствами и демпферными элементами.

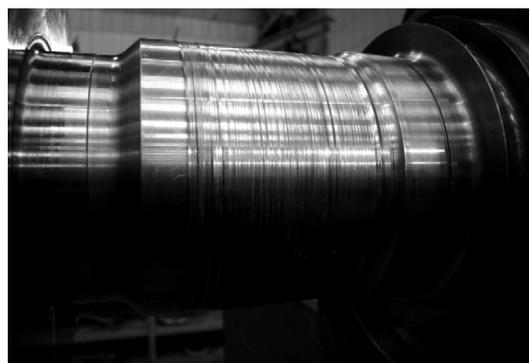
На роторе (рис. 5, а) имеются явные признаки синхронного обката [2] в виде полного срабатывания уплотнений, значительных натиров бандажей лопаток и самого тела ротора с одной стороны на дуге менее  $150^\circ$  (характерный признак начала процесса обката с проскальзыванием). Баббитовый слой переднего сегментного подшипника выработан полностью с явными нарушениями стальной поверхности колодок (рис.5, в). Трубопровод подвода пара по фланцу соединения с турбиной раскрыт на 20 мм, что подтверждает появление значительных сил, возбуждавших колебания установки на амортизаторах. Ротор получил прогиб 2.5 мм из-за отсутствия нормального выбега и

заклинивания (провернуть ротор было невозможно); значительные нарушения имеет поверхность передней по ходу пара опорной шейки (рис. 5, б). Повреждения переднего подшипника и характерные натирывания на заднем подшипнике (рис. 5, г) с обрывом двух призонных болтов крепления верхней и нижней крышек показывают, что ротор при обкате двигался по конической траектории с вершиной конуса в центре заднего под-

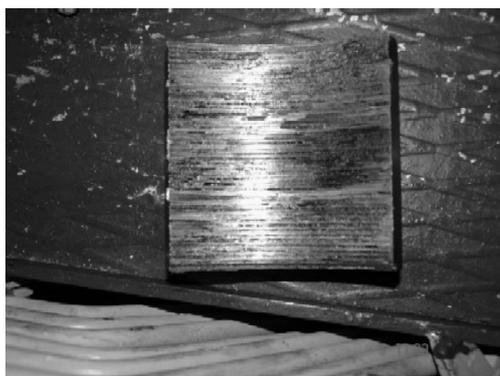
шипника. Причина аварии – неправильная сборка переднего сегментного подшипника, вызвавшая заклинивание колодок, срабатывание фрикционного слоя, а затем стальных буртов корпуса подшипника, установленных с зазором 0.7 мм, полное выплавление баббитового слоя 1.5 мм с развитием в последующем обката и значительных амплитуд колебаний всей амортизированной установки.



а



б



в



г

Рис. 5. Повреждения ротора и подшипников ТА (2006 г.), имевшего средства нарушения ликвидационного процесса:  
 а – натирывания бандажей рабочих лопаток по дуге <math>< 150^\circ</math>;  
 б – повреждения поверхности передней шейки ротора турбины;  
 в – повреждения поверхности колодок переднего сегментного подшипника;  
 г – натирывания на баббитовом слое заднего подшипника

Следует иметь в виду, что эксплуатация установки длительное время осуществлялась с явным нарушением ограничений, как по вибрации, так и контролируемым параметрам подшипников и только при угрожающем развитии явления обката установка была отключена.

Авария показательна по своему развитию, особенно переходом к значительным возбуждающим

колебаниями силам, что является характерным признаком начала ликвидационного процесса. Наличие амортизирующих устройств не позволило аварии перерасти в её катастрофическую фазу, что подтверждает безопасность конкретного типа ТА в условиях возможного развития ликвидационного процесса.

Аналогичное нарушение ликвидационного процесса наблюдалось ещё на одной установке этого

типа, где причиной развития обката стало не соблюдение технологии останова ТА и приобретение значительной неуравновешенности ротора. Пуск установки с неуравновешенным ротором привел к вынужденным колебаниям ротора с задеваниями о статор и развитию ликвидационного процесса с амплитудами вибрации, исчисляемыми в мм. Аварийная остановка ТА по высокому уровню вибрации привела к незначительным повреждениям и позволила восстановить ротор, получивший прогиб 0,24 мм.

Существует и другая альтернатива обеспечения надёжности ТА с некоторой долей его величества случая:

– грамотно конструировать (но не всегда это возможно, если есть ещё скрытые физические явления с возможностью проявления не до конца изученных системных эффектов, определяемых нелинейностями и параметрическими зависимостями на различных режимах эксплуатации, а тем более с появлением и развитием аварийной ситуации);

– эксплуатировать без поломок деталей и без нестационарных воздействий (здесь вопросов ещё больше, начиная с соблюдения требований руководства по эксплуатации);

– ограничить продление ресурса эксплуатации ответственных узлов установки.

В этом альтернативном, «казалось бы продуманном», подходе, что-то, как показывает опыт, всё равно придётся отдать на волю случая. Это явно недопустимо при конструировании ответственных агрегатов. Тем более что обеспечение промышленной безопасности для тепловых электростанций утверждается как одно из основных положений Концепции технической политики ОАО РАО «ЕЭС России» [10].

### Литература

1. Позняк Э.Л. Крутильный удар в валопроводе при внезапной и сильной разбалансировке // *Машиноведение*. – 1987. – № 5. – С. 66-74.

2. Шатохин В.Ф. Циммерман С.Д. Разработка системы предотвращения катастроф агрегатов. Ч. 1.

Анализ катастрофических аварий и постановка задачи // *Авиационно-космическая техника и технологии*. – 2005. – № 10(26). – С. 19-31.

3. Разрушение турбоагрегата 300 МВт Каширской ГРЭС: причины, последствия и выводы / И.Ш. Загретдинов, А.Г. Костюк, А.Д. Трухний, П.Р. Должанский // *Теплоэнергетика*. – 2004. – № 5. – С. 5-15.

4. Шатохин В.Ф. Некоторые предложения по предотвращению катастроф, связанных с разрушением турбоагрегатов // *Вестник машиностроения*. – 2007. – № (в печати).

5. Шатохин В.Ф. Расчётное определение динамических характеристик многоопорных валопроводов мощных турбоагрегатов на фундаменте: Дис. ... канд. техн. наук. – М.: МЭИ, 1972. – 167 с.

6. Шатохин В.Ф. Влияние типа связи на динамические характеристики амортизированного оборудования при нестационарном кинематическом воздействии // *Вестник машиностроения*. – 2005. – № 2. – С. 26-30.

7. Вирченко М.А., Левченко Е.Б., Аркадьев Б.А. Коррозионная усталость рабочих лопаток // *Энергетика*. – 1997. – № 6. – С. 32-36.

8. Шатохин В.Ф. Циммерман С.Д. Колебания ротора турбоагрегата при нестационарном кинематическом воздействии. Метод расчёта // *Авиационно-космическая техника и технологии*. – 2006. – № 8(34). – С. 57-68.

9. Шульженко Н.Г., Воробьёв Ю.С. Численный анализ колебаний системы турбоагрегат – фундамент. – К.: Наук. думка, 1991. – 230 с.

10. Концепция технической политики ОАО РАО «ЕЭС России» // *Электрические станции*. – 2005. – № 10. – С. 2-19.

*Поступила в редакцию 23. 04.2007*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Ю.Л. Лукашенко, Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Калуга.