

В. Н. Тарасов

*Московский энергетический институт (НИУ «МЭИ»),
Москва, ул. Красноказарменная, д. 17, e-mail: DPM@mpei.ru*

Физические механизмы кавитационной эрозии

Получена 21.12.2014, опубликована 17.03.2015

В работе анализируются физические механизмы кавитационной эрозии. Обсуждаются результаты комплексных испытаний гидроагрегата Саяно-Шушенской ГЭС. При испытаниях получены результаты, ставящие под сомнение существующие взгляды на физическую природу кавитации. Анализ существующих публикаций и результатов испытаний даёт основание полагать, что реальную воду при течении в гидротурбине нельзя считать ньютоновской жидкостью. Она обладает упруго-вязкими свойствами и способна отрывать микрообъёмы твёрдого вещества. Поэтому вероятной причиной кавитационной эрозии являются не столько гидроудары, вызванные схлопыванием каверн, сколько «гидроразрывы», действующие на отрыв фрагментов поверхности.

Ключевые слова: кавитация, кавитационная эрозия, автоколебания, Саяно-Шушенская ГЭС.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема кавитации с момента её открытия привлекает серьёзное внимание исследователей. Во многом это связано с тем, что её следствие — кавитационная эрозия — причиняет огромный ущерб экономике и во многих случаях становится препятствием в создании высокоэффективных машин и агрегатов. Первые же исследования кавитации показали, что это очень сложный процесс, трудно поддающийся аналитическому изучению, а механизм кавитационной эрозии не находит должного объяснения до сих пор.

При натурных испытаниях гидроагрегата Саяно-Шушенской ГЭС в 2013 г. были получены результаты, ставящие под сомнение существующие взгляды на физическую природу кавитации. Эти результаты позволяют с новых позиций взглянуть на механизм эрозии, что возможно поможет в борьбе с этим вредным и опасным явлением.

1. ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ КАВИТАЦИИ

Классическая гидродинамика рассматривает жидкость как сплошную среду с плавно и непрерывно меняющимися параметрами. При кавитации эти условия нарушаются, однофазная среда превращается в неравновесную многофазную. Тем не менее, теоретический анализ кавитационных процессов в основном базируется на гидродинамических подходах. Согласно этим представлениям, поток жидкости не

выдерживает отрицательных давлений. При этом целостность потока нарушается, и образуются парогазовые полости (кавитационные пузырьки или каверны). Это происходит в результате местного понижения давления в жидкости, которое может происходить либо при увеличении её скорости (гидродинамическая кавитация), либо при прохождении акустической волны большой интенсивности во время полупериода разрежения (акустическая кавитация). Перемещаясь с потоком в область с более высоким давлением или во время полупериода сжатия, кавитационный пузырёк конденсируется с гидроударом, излучая при этом ударную волну [1-3]. Схлопывание каверн сопровождается кумулятивным эффектом, повышающим концентрацию энергии, поэтому в ударной волне создаются весьма значительные давления, высокие температуры, электрические разряды, возникает свечение и активизируются химические реакции.

До сих пор эффект кавитационной эрозии не находит должного объяснения. Интенсивность эрозии такова, что за время порядка минут кавитирующий поток способен заметно повредить поверхность достаточно прочного материала. Традиционные критерии прочности здесь не применимы. Например, нержавеющие стали, имеющие твёрдость и предел прочности ниже углеродистых, значительно превосходят их по кавитационной стойкости. Наоборот, некоторые весьма непрочные материалы, например, полиэтилен за время испытаний не повреждается вовсе. За это же время на эталонном образце из стали 1X18H10T разрушения достигают глубины 4 мм [2].

Наличие гидромеханических сил при захлопывании каверны ни у кого не вызывает сомнения. Но величина ударного давления, вычисленная согласно уравнениям гидродинамики, оказывается значительно меньше предела прочности материала. Предположение о ведущей роли электрохимических процессов при эрозии тоже не находит экспериментального подтверждения, поскольку химически инертные материалы (золото, стекло, агат) разрушаются так же, как и химически активные материалы. Непонятным, с точки зрения здравого смысла, является и то, что в результате гидроударных нагрузок, направленных внутрь поверхности металла, происходит не упрочнение, а отрыв фрагментов поверхности.

Существует гипотеза, что причиной кавитационных разрушений могут быть процессы импульсного отрыва микрообъема поверхности [4]. Такой подход позволяет объяснить многие закономерности гидроэрозии, но, к сожалению, он не получил дальнейшего развития. Объёмная прочность жидкости, определённая экспериментально, оказывается значительно меньше предела прочности металлов. Поэтому, считается, что разрыв жидкости происходит значительно раньше отрыва микрообъема металла. Однако кавитационные разрушения происходят на микроскопическом уровне при импульсных нагрузках. Поэтому макроскопические критерии прочности здесь не применимы. Подобные процессы необходимо рассматривать с молекулярно-кинетической точки зрения.

2. МОЛЕКУЛЯРНЫЙ МЕХАНИЗМ КАВИТАЦИОННОЙ ЭРОЗИИ

Согласно кинетической теории жидкости Я. И. Френкеля различие между веществом в жидком состоянии и твёрдым (не только аморфным, но и кристаллическим) является не качественным, а количественным, поскольку положение равновесия атомов в веществе не неизменно, а имеет временной характер [5]. Только поколебавшись около положения равновесия некоторое время τ , атом может перейти в другое положение равновесия. Если время воздействия внешних сил T значительно превосходит это время релаксации τ , любое вещество течёт. Если же $T < \tau$, то даже жидкости испытывают только упругую деформацию и ведут себя подобно твёрдым телам. Поэтому модели ньютоновской жидкости и упругого тела, принятые в механике сплошных сред, весьма условны. Для корректного описания макроскопического поведения любого реального вещества, необходимо учитывать его реологические свойства.

Вода — самая распространённая и самая изучаемая жидкость на планете, тем не менее многие загадки её поведения пока не находят объяснения. Она имеет чрезвычайно высокое внутреннее давление, обусловленное силами межмолекулярного притяжения. Поэтому вода обладает аномально большой теплотой парообразования и коэффициентом поверхностного натяжения [7]. Теоретическая молекулярная прочность воды примерно равна её внутреннему давлению и превосходит предел прочности стали ($\sigma_b \approx \frac{2\delta_n}{R} \approx 1-2$ ГПа, где δ_n — коэффициент поверхностного натяжения, R — характерный межмолекулярный размер). Реальная объёмная прочность чистой воды, наблюдаемая в экспериментах при статических нагрузках, значительно меньше из-за парогазовых включений и прочих дефектов её структуры. Считается, что при приложении к воде растягивающих напряжений, она разрывается вдоль уже существующих в ней микротрещин примерно со скоростью звука.

Согласно экспериментальным наблюдениям, струя воды при быстрых ударах по ней «раскалывается», то есть ведёт себя как твёрдое, хрупкое тело [3]. Следует ожидать, что она принципиально не отличается от многих других реальных жидкостей и обладает не только вязкостью, но и упругостью формы. Поэтому при воздействии импульсной нагрузки вода некоторое время будет упруго деформироваться и только потом начнёт растекаться и разрываться. При этом её «мгновенная» прочность, обусловленная силами межмолекулярного притяжения, будет примерно равна её внутреннему давлению, что превосходит прочность большинства твёрдых материалов.

Современные исследования показывают, что кавитационная прочность воды при воздействии микросекундных импульсов значительно превышает статическую объёмную прочность. Разрыв возникает только в том случае, если отрицательное давление выдерживается определённое время. Это время зависит от величины импульса и составляет десятки микросекунд [8]. Поскольку это время сравнимо с характерным временем кавитационных процессов, поведение воды в этих процессах невозможно объяснить, считая её ньютоновской жидкостью. Рассмотрим взаимодействие воды с твёрдым телом, считая её упруго-вязким материалом.

Одним из самых распространённых методик исследования кавитационной прочности материалов является испытание на ударно-эрозионном стенде. При этом образец материала, закреплённый на вращающемся диске, периодически пересекает струю воды, вытекающую из бака (рис. 1). Скорость движения образца составляет обычно несколько десятков метров в секунду, скорость струи существенно меньше. Сечение струи — от треугольного до круглого (при круглой струе разрушения минимальны), диаметр струи обычно 5-10 мм. Рассмотрим процесс взаимодействия образца и струи. Упругостью образца в момент удара пренебрежём.

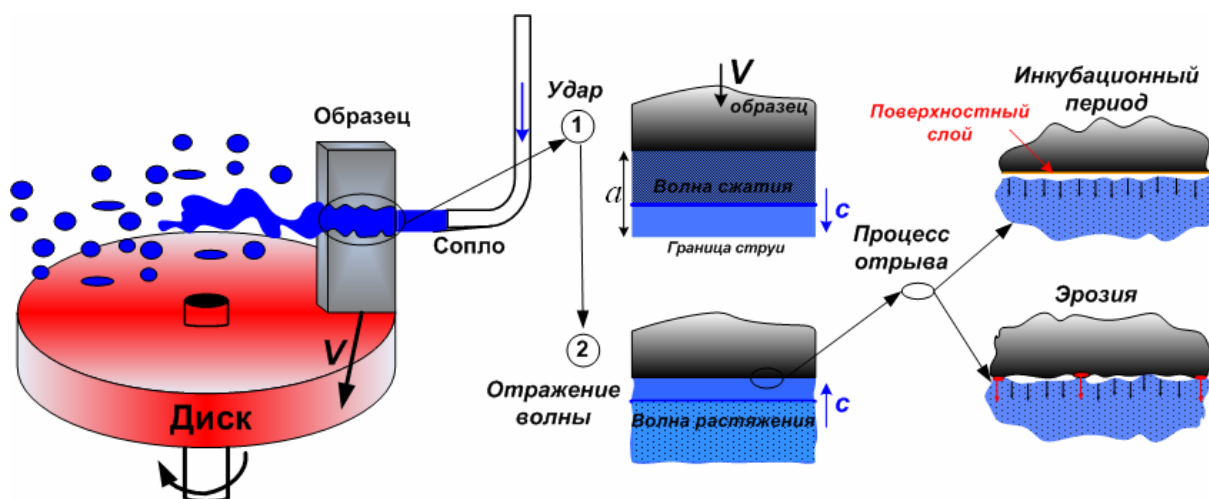


Рис. 1. Процесс испытаний на ударно-эрозионном стенде

В момент касания образца поперёк струи воды начинает распространяться волна сжатия (рис. 1). При поперечном размере струи $a=10$ мм время удара составляет примерно $T \approx \frac{2a}{c_0} \approx 15$ мкс, где $c_0 = \sqrt{E/\rho} = 1425$ м/с — скорость звука в воде (струю будем считать плоской). Поскольку время удара (а тем более длительность фронта) сравнимо со временем релаксации воды, во время взаимодействия воду будем считать упругим телом, способным выдерживать растягивающие напряжения. При скорости образца $V=50$ м/с ударное давление в волне составляет $P_0 \approx E \frac{V}{c_0} = \rho V c_0 \approx 70$ МПа, что значительно меньше внутреннего (молекулярного) давления воды и предела прочности стали. Отразившись от свободной границы, волна сжатия возвращается в виде волны разряжения и воздействует на образец с отрывающим усилием.

Если бы между молекулами воды и образца не было сил сцепления, не было бы и отрывов микрообъемов металла, а образец не разрушался бы никогда. Но такого не происходит. Вода — прекрасный растворитель для многих веществ. Но изначально, на поверхности образца всегда присутствует поверхностная плёнка посторонних молекул, ухудшающая его адгезию с водой. Пока сцепление образца с водой незначительно, струя воды отскакивает от образца подобно мячу от стенки. Но при этом постепенно

происходит очистка поверхности и «заселение» её продуктами химического взаимодействия воды и образца. Эту фазу эрозии называют инкубационным периодом. На поверхности образца образуются вмятины, но уноса материала не происходит [2, 3].

По мере улучшения адгезии вода начинает отрывать фрагменты поверхности. Отрицательные давления, превышающие предел прочности образца, могут возникать по следующим причинам.

✓ Во-первых за счёт концентрации напряжений на участках отрываемых фрагментов, поскольку удары могут восприниматься почти всей площадью образца, а отрывы только малыми участками с хорошей адгезией.

✓ Во-вторых за счёт возбуждения в системе вода-образец акустических волн, которые, отражаясь от границ и интерферируя случайным образом, могут многократно усиливаться. Возбуждение таких волн может вызывать как удар по струе, так и процессы межмолекулярных разрывов.

Процессы межмолекулярного разрыва системы вода-образец носят случайный характер, поскольку импульсная прочность, как образца, так и воды обусловлена внутренними микротрещинами (динамическими поверхностями минимальной прочности). При многократных знакопеременных нагрузках межмолекулярные связи твёрдого вещества постепенно нарушаются, вблизи поверхности возникают микротрещины, по которым и происходит отрыв. В отличие от молекул твёрдого образца, разорванные молекулы жидкости способны слипаться без нарушения межмолекулярных связей. Поэтому обычная вода при многократных ударных воздействиях оказывается прочнее стали и, при наличии хорошей адгезии, способна разрушать самые твёрдые и прочные материалы.

После очистки поверхности скорость эрозии стабилизируется. Следует ожидать, что потеря массы образца при случайном характере межмолекулярных разрывов будет пропорциональна среднему значению ударного импульса и числу ударов. Величина ударного импульса на единицу площади образца P_0T примерно равна $P_0T \approx 2\rho Va$, а число ударов пропорционально скорости V . Поэтому унос массы должен быть пропорционален диаметру струи и квадрату скорости образца $dM \approx \text{Const} \cdot \rho V^2 a$, что обычно и наблюдается на практике. На рис. 2б изображена зависимость длительности инкубационного периода и потери массы образца из стали 25Л от скорости его движения на ударно-эрозионном стенде за 10 часов испытаний [3].

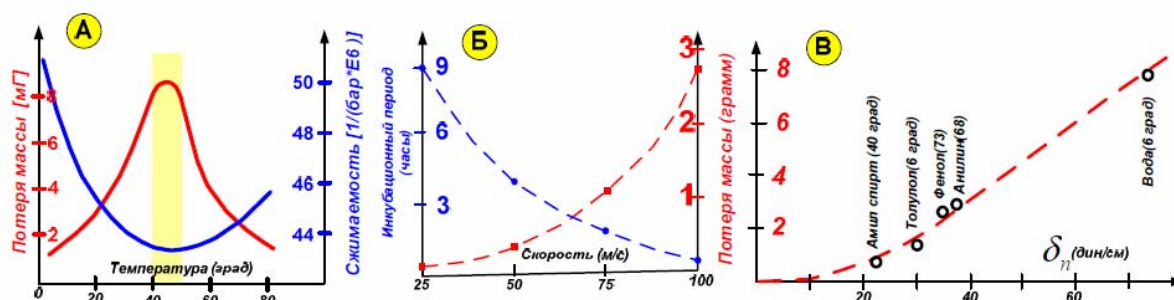


Рис. 2. Результаты кавитационных испытаний

Очевидно, что на скорость кавитационной эрозии влияют не только величина ударной нагрузки, но и импульсная прочность жидкости и образца, а также силы адгезии между жидкостью и образцом. Известно, что сжимаемость воды заметно зависит от температуры, имея минимум примерно при 45 градусах, следовательно, силы межмолекулярного взаимодействия и импульсная прочность воды при этой температуре максимальны. Этот факт хорошо объясняет наличие максимума на температурной зависимости скорости ультразвуковой эрозии в воде рис. 2а [6]. Эти исследования проводились также в водных растворах поваренной соли, перекиси водорода и едкого калия. Скорости эрозии в этих растворах существенно не отличались от скорости эрозии в дистиллированной воде.

Неоднозначную зависимость скорости эрозии от твёрдости и прочности материала можно объяснить соотношением сил адгезии и когезии. Например, нержавеющие стали, имеющие меньшую прочность и твёрдость чем углеродистые, имеют и существенно меньшую адгезию с водой. Поэтому и превосходят их по кавитационной стойкости. Становится понятным также корреляция между скоростью эрозии в различных жидкостях и их коэффициентами поверхностного натяжения рис. 2в [6].

Отдельным вопросом является причина появления парогазовых каверн при кавитации и их влияние на эрозию. Экспериментальные наблюдения на гидродинамических установках показывают [2, 3], что кавитационная эрозия происходит в том случае, если в потоке возникают каверны. Но, процесс схлопывания каверн и эрозия находятся в весьма слабой связи друг с другом. Кавитационные повреждения поверхности часто происходят не в районах схлопывания каверн, а в местах их возникновения.

Очевидно, что при механическом разрыве жидкости должны образовываться парогазовые пузырьки, поэтому появление каверн вблизи поверхности может служить признаком существования отрицательных давлений. При этом появление пузырьков на самой поверхности усиливает эрозию, поскольку полость в сплошной среде является концентратором напряжений. Если при кратковременных нагрузках рассматривать систему молекул жидкость-твёрдое тело как упругое тело, концентрация напряжения на границе раздела каверна-жидкость-твёрдое тело зависит от геометрии каверны и может быть значительной (рис. 3а). Как при пульсациях, так и при движении каверны по поверхности на границе раздела возникают большие динамические деформации, разрушающие поверхностный слой (рис. 3б).

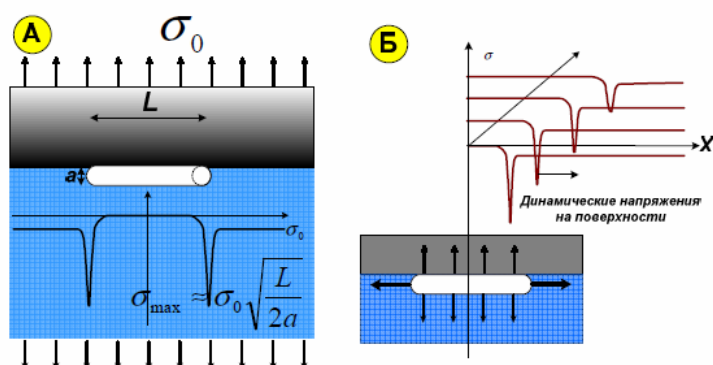


Рис. 3.

Концентрация напряжений в каверне

Эрозия поверхности аналогичная кавитационной происходит и в тех случаях, где обычной кавитации (то есть образования *cavita* — пустот в жидкости) не может быть в принципе. Например, элементы последних ступеней паровых турбин, работающих в условиях влажного пара и подвергающиеся непрерывному воздействию капель жидкости, тоже интенсивно разрушаются. Процесс этот называется капельной эрозией и происходит даже при скорости капель 10-20 м/с, поэтому вообще не находит гидродинамического объяснения. Можно полагать, что многие физические процессы разрушения твёрдых материалов жидкими, называемые гидроэрозией, имеют общий механизм. Главной причиной разрушений является не схлопывание каверн, образованных вследствие вскипания жидкости при низких давлениях, а аномальные механические напряжения в потоке, возникающие при высоких скоростях деформации. В этих условиях реальные жидкости перестают быть «жидкими» и начинают проявлять свойства твёрдых тел.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИИ В НАТУРНОМ ГИДРОАГРЕГАТЕ..

Основной целью испытаний гидроагрегата №3 Саяно-Шушенской ГЭС было исследование пульсаций в проточной части и определение физических причин разрушения крепёжных шпилек, приведших к аварии 17 августа (см. отчёт «Исследование гидромеханических процессов в гидротурбинных установках СШГЭС», договор №СШ-312-2013/95) - М. 20139).

При испытаниях регистрировались (рис. 4):

- Пульсации электрической мощности гидрогенератора.
- Пульсации давления и расхода потока на входе в гидротурбину.
- Пульсации давления под крышкой турбины в районе лопаток направляющего аппарата.
- Динамические нагрузки, действующие на крышку турбины.
- Угловые колебания лопаток направляющего аппарата.

При испытаниях были обнаружены кавитационные процессы, происходящие непосредственно под крышкой гидротурбины. Давление потока в этой зоне составляло примерно 10-15 бар, поэтому гидродинамической кавитации здесь быть не могло.

Регистрация пульсаций давления под крышкой турбины осуществлялась 4-мя датчиками давления с открытой мембраной, которые устанавливались в крышку турбины заподлицо с её нижней поверхностью. Датчики позволяли проводить динамические измерения, с постоянной времени менее миллисекунды. Диапазон измерений датчиков составлял 60 бар с пятикратным запасом по прочности.

При работе агрегата эти датчики постоянно регистрировали чрезвычайно короткие импульсы. Их длительность оказалось существенно меньше постоянной времени датчиков, поэтому величина пиковых значений импульсов, показанных на рис. 5, занижена. Поскольку на нижней поверхности крышки турбины были обнаружены кавитационные разрушения, можно заключить, что максимальная величина ударных нагрузок превышала предел прочности стали.

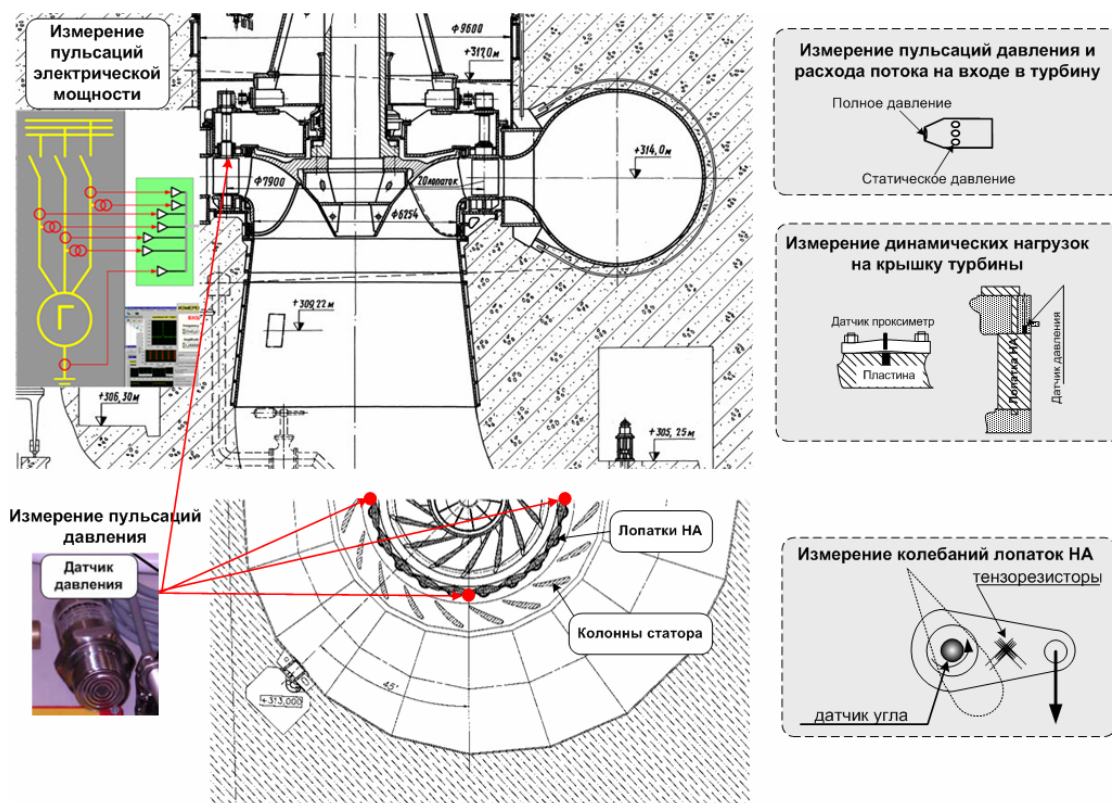


Рис. 4. Схема измерений

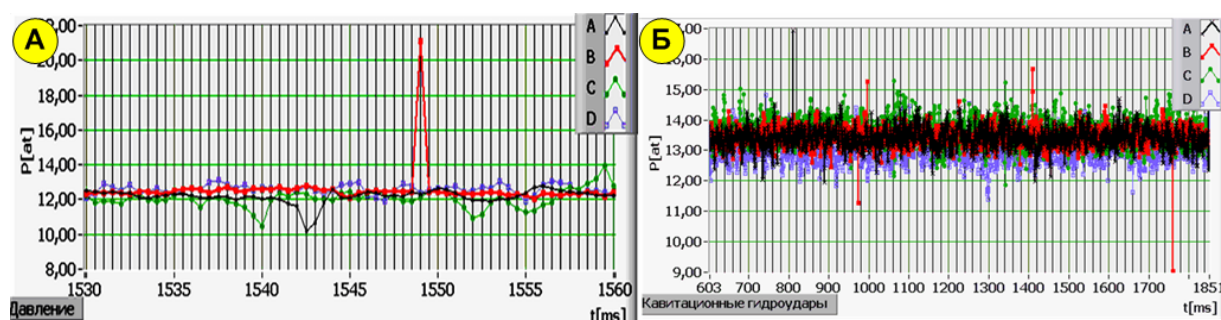


Рис. 5. Кавитационные гидроудары

Весьма интересно, что наблюдались, как положительные импульсы (гидроудары), так и отрицательные (гидроразрывы). К концу испытаний у всех 4-х датчиков оказались оторваны разделительные мембраны, что могло произойти только в результате воздействия больших ударных отрицательных давлений.

Кавитационные повреждения были обнаружены также на внутренней поверхности лопаток направляющего аппарата. Причём, расположенные рядом колонны статора, которые по форме являются такими же гидродинамическими профилями, оказались совершенно не повреждёнными. На поверхности лопаток, сделанных из нержавеющей кавитационностойкой стали присутствовали многочисленные раковины глубиной 5-10 м, а на поверхности колонн статора сохранилась заводская краска (рис. 6).

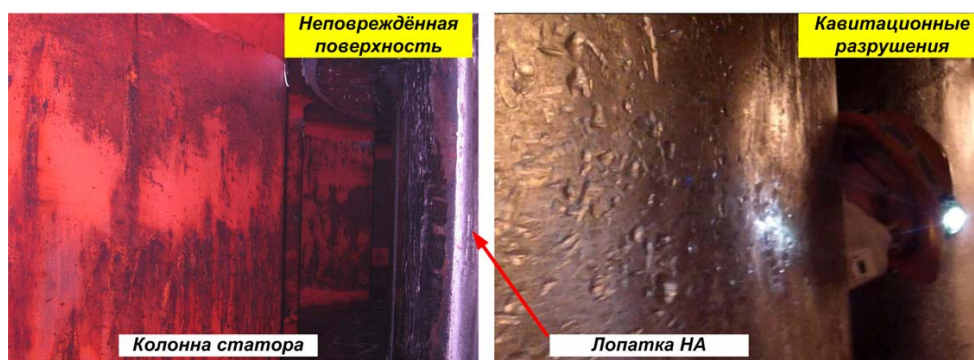


Рис. 6. Кавитационные повреждения

В гидродинамическом смысле принципиальных отличий между этими профилями нет. Давление и скорость потока тоже отличались несущественно. Но лопатки при испытаниях колебались. Максимальный размах их угловых колебаний был порядка градуса, что соответствовало размаху колебаний края лопатки около сантиметра. Колонны статора были достаточно жёсткие и практически не вибрировали.

Зарегистрированные ультракороткие импульсы давления под крышкой турбины не могли быть вызваны гидродинамическими механизмами. Давление в месте установки датчиков при испытаниях составляло 10-13 бар, а скорость потока не превышала 30 м/с. Подобные импульсы могли быть порождены процессами разрыва воды в гидротурбине. При больших скоростях деформации она не успевала изменить свою форму и «растрескивалась» подобно стеклообразному веществу. Поскольку разрыв фрагментов воды происходил очень быстро, на границы разрывов воздействовали ударные нагрузки порядка сил межмолекулярного притяжения. Это приводило к возникновению в потоке импульсного акустического поля большой интенсивности.

Очевидно, что ударные волны в потоке порождают и ударные волны в конструкциях гидроагрегата. Поскольку длительность импульсов мала, обычными средствами контроля они не регистрируются. Но при высокой интенсивности пульсаций, эти волны способны существенно влиять на характер течения и вызывать разрушения элементов агрегата, как в потоке, так и за его пределами. Именно поэтому и происходит усталостное разрушение крепёжных элементов гидротурбин. Прогнозировать эти процессы очень тяжело, поскольку распространение ударных волн в потоке и конструкции агрегата носит случайный характер. Из практики известно, что даже номинально одинаковые лопасти одного РК разрушаются весьма неравномерно. Повреждения крепёжных шпилек также происходит случайно, по мере накопления разрушающих импульсов.

При определении нагрузок, действующих на крепёжные элементы, предполагается, что они механические. А они вызваны кавитацией. Поэтому ударные нагрузки, разрушающие шпильки, слишком короткие, чтобы их заметить, а возникают они не в электромеханической конструкции агрегата, а в потоке. Именно этим и объясняется тот парадокс, что шпильки высоконапорных гидроагрегатов разрушаются, а расчёты и эксперименты показывают, что динамические нагрузки, действующие на них, намного меньше предела усталостной прочности материала.

В настоящее время для предотвращения образования каверн, гидротурбины заглубляют, что увеличивает затраты на строительство ГЭС. Тем не менее, повышение гидростатического давления далеко не всегда помогает в борьбе с кавитационной эрозией [2]. Для уменьшения эрозии нужно не просто повышать давление в проточной части, а уменьшать пульсации и неравномерность потока так, чтобы минимизировать скорость деформации жидкости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При натурных испытаниях гидроагрегата Саяно-Шушенской ГЭС было обнаружено, что поток воды в гидротурбине способен кратковременно выдерживать значительные отрицательные давления. Во время испытаний при давлении в потоке 10-15 бар регистрировались субмиллисекундные положительные и отрицательные импульсы давления большой амплитуды. В этой же области были обнаружены, существенные кавитационные повреждения.

Анализ существующих публикаций и результатов испытаний даёт основание полагать, что реальная вода обладает упруго-вязкими свойствами и способна отрывать микрообъёмы твёрдого вещества. Поэтому причиной кавитационной эрозии являются не столько гидроудары, вызванные схлопыванием каверн, сколько «гидроразрывы», действующие на отрыв фрагментов поверхности. Следовательно, кавитационно-стойкие материалы должны иметь не только высокую твёрдость и вязкость, но и обладать антиадгезионными свойствами.

Кавитационные разрушения могут проходить без вскипания жидкости и образования каверн. В областях с большими скоростями деформации реальные жидкости перестают быть «жидкими» и проявляют свойства твёрдого тела. Это приводит к появлению в потоке аномально высоких механических напряжений. Следовательно, для уменьшения эрозии нужно не повышать давление, а уменьшать пульсации потока.

Воду нельзя считать ньютоновской жидкостью даже при анализе течения в гидротурбине, что требует корректировки некоторых гидродинамических методик расчёта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рождественский В. В. Кавитация - Л., Судостроение, 1977.
2. Пылаев Н. И, Эдель Ю. У. Кавитация в гидротурбинах - Л., Машиностроение, 1974.
3. Фомин В. В. Гидроэрозия металлов - М., Машиностроение, 1977.
4. Тимербулатов М. Г. Механизм кавитационной эрозии и влияние на нее коррозионной стойкости металлов . Физико-химическая механика материалов. - 1969. № 1.
5. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей - Л. Наука 1975.
6. Меттер И. Физическая природа кавитации. – В сб.: Успехи физических наук, Т. XXXV, №1, изд. АН СССР, 1948.
7. Зацепина Г. Л. Свойства и структура воды - М., Изд. МГУ, 1974.
8. Груздков А. А., Петров Ю. В. Кавитационное разрушение жидкостей с большой и малой вязкостью. ЖТФ 2008, том 78, вып. 3.