

КАВИТАЦИЯ КАК ПРИЧИНА РАЗРУШЕНИЯ БЕТОННЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Безруков Егор Александрович

студент, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), РФ, г. Новосибирск.

Cavitation as a Cause of Destruction of Concrete Hydraulic Engineering Structures

Bezrukov Egor Alexandrovich

student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), RF, Novosibirsk.

Аннотация. Условия возникновения кавитационной эрозии на бетонных гидротехнических сооружениях. Выявление последствий кавитации и меры борьбы с ней.

Abstract. Conditions for the occurrence of cavitation erosion on concrete hydrotechnical structures. Identification of the consequences of cavitation and measures to combat it.

Ключевые слова: кавитация, кавитационная эрозия, критическое число кавитации, бетонные сооружения.

Key words: cavitation, cavitation erosion, critical number of cavitation, concrete structures.

Представление о кавитации

Если давление в потоке воды понижается до давления насыщенных водяных паров, то в жидкости образуются пульсирующие полости, заполненные паром или газами, выделяющимися из жидкости – кавитационные пузырьки или каверны. При этом сплошность потока нарушается. Пузырьки снесенные потоком в область, где давление выше давления насыщенных водяных паров, захлопываются, растворяются.

Процесс образования, перемещения и разрушения полостей в жидкости называется кавитацией. При заполнении пузырьков паром кавитация называется паровой, при заполнении газом – газовой кавитацией. Кавитация изменяет характер движения жидкости, вызывает дополнительные потери энергии, шум и эрозию материала твердых границ.

Твердые границы испытывают удары как при захлопывании пузырьков непосредственно у границы, так и на некотором удалении. В первом случае материал испытывает воздействие ударов более интенсивное, чем во втором, когда ударные волны достигают твердых границ, рассеивая часть энергии.

Ударные волны вызывают местную деформацию материала, бесчисленное число ударов приводит к усталости материала и его разрушению. Затем происходит вынос частиц разрушенного материала и образование в материале каверн. В бетоне вступает в силу динамическое воздействие потока на бетон, приводящее к выламыванию отдельностей бетона и подстилающей его скалы.

Критическое давление и критический вакуум

Для того чтобы ответить на вопрос будет ли иметь место в рассматриваемой области кавитация, требуется сравнить абсолютное давление в данной точке или вакуум с критическим давлением или критическим вакуумом либо сравнить число кавитации с критическим числом кавитации. Отсутствие кавитации выражается неравенствами:

$$p_{\text{абс}} > p_{\text{кр}}; \quad (1.1)$$

$$h_{\text{вак}} < h_{\text{вак.кр}}; \quad (1.2)$$

$$K > K_{\text{кр}}, \quad (1.3)$$

где $p_{\text{абс}}$ и $h_{\text{вак}}$ – абсолютное давление и вакуум в данной точке;

$p_{\text{кр}}$; и $h_{\text{вак.кр}}$ – критические давление и вакуум;

K и $K_{\text{кр}}$ – число кавитации и критическое число кавитации.

Критическое давление – давление насыщенных водяных паров, отвечающих данной температуре, при которой начинается холодное кипение воды. Но так как формирование кавитационных пузырьков способствуют ядра кавитации – мельчайшие пузырьки, которые могут быть в жидкости, кавитация может возникнуть при давлении, превышающем давление насыщенных паров. Принимается $p_{\text{кр}} = p_{\text{нас}}$.

Таблица 1.1 – Давление насыщенных водяных паров, представленных в метрах водяного столба

t, °C	0	10	20	40	60	80	100
$h_{\text{нас}}=p_{\text{нас}} / \rho g$	0,06	0,12	0,24	0,75	2,03	4,83	10,33

Критический вакуум – вакуум, отвечающий критическому давлению:

$$h_{\text{вак.кр}} = \frac{(p_{\text{ат}})_{\text{мин}}}{\rho g} - \frac{p_{\text{нас}}}{\rho g}, \quad (1.4)$$

где $\rho g = \gamma$ – удельный вес жидкости;

$p_{\text{ат}}$ – атмосферное давление.

Минимальное атмосферное давление, представленное в метрах водяного столба:

$$\frac{p_{\text{ат}}}{\rho g} = 10,33 - \frac{\nabla z}{900} - 0,39 = 9,94 - \frac{\nabla z}{900}, \quad (1.5)$$

где 10,33 м. вод. ст. отвечает нормальному атмосферному давлению (на уровне моря при температуре воздуха 15°C);

$\frac{\nabla z}{900}$ – поправка на превышение данной точки над уровнем моря;

∇z – абсолютная отметка, м;

0,39 – максимальное понижение давления за счет метеорологических факторов.

Формула критического вакуума, выраженного в метрах водяного столба:

$$h_{\text{вак.кр}} = 9,94 - \frac{\nabla z}{900} - \frac{p_{\text{нас}}}{\rho g}. \quad (1.6)$$

Дальнейшее понижение давления (увеличение вакуума) невозможно, поскольку в области, заполненной водой, оно не может быть меньше давления насыщенных водяных паров.

Локальное понижение давления наблюдается за различного вида неровностями на твердых границах и за выступами равномерно – зернистой шероховатости .

В неподвижной жидкости давление может достигнуть критического значения на поверхности вибрирующей конструкции.

Коэффициент понижения давления за неровностями. Критическое число кавитации, число кавитации

Типичные виды неровностей в водопропускных сооружениях, вызывающие в определенных условиях кавитацию, показаны на рис. 3.4 [1]: это уступ (выступ) против потока или по потоку, резкий изгиб в сторону направления течения, излом, впадина (желоб, шов, трещина), шероховатая поверхность. На бетонных поверхностях неровности образуют выступающие из бетона заполнители, следы опалубки, на металлических поверхностях – незачищенные швы сварки, уступы при стыковке элементов облицовки. Может иметь место также волнистая неровность.

Для того чтобы дать ответ на вопрос, будет ли за неровностью кавитация, необходимо знать $p_{\text{хар}}$ и давление p , которое установится в рассматриваемой точке с учетом влияния неровности:

$$p = p_{\text{хар}} - C_p \cdot \rho \cdot \frac{u_{\text{хар}}^2}{2}, \quad (1.7)$$

где $u_{\text{хар}}$ – характерная скорость, за которую принимают скорость набегающего потока на неровность;

$p_{\text{хар}}$ – характерное давление в точке на твердой границе при отсутствии неровности;

ρ – плотность воды;

C_p – коэффициент понижения давления, учитывающий падение давления под влиянием неровности, которая вызывает появление центробежных сил при искривлении линий токов и образование вихрей при отрыве транзитного потока от твердых границ.

Коэффициент C_p определяется экспериментальным путем и является для каждой формы неровности или тела постоянной величиной.

Критическое число кавитации:

$$K_{\text{кр}} = \frac{p_{\text{хар}} - p_{\text{нас}}}{\rho \cdot \frac{u_{\text{хар}}^2}{2}}, \quad (1.8)$$

Определяется в момент начала кавитации отношением разности характерного давления и давления насыщенных водяных паров к давлению, создаваемому скоростным напором. Критическое число кавитации есть постоянная величина для большинства видов неровностей.

Для произвольного момента набегающего потока на неровность это отношение называется числом кавитации, которое может иметь любые значения:

$$K = \frac{p_{\text{хар}} - p_{\text{нас}}}{\rho \cdot \frac{u_{\text{хар}}^2}{2}}. \quad (1.9)$$

По формуле (1.8) отыскивается для данных условий по известным из эксперимента $p_{\text{хар}}$ и $u_{\text{хар}}$ критический параметр кавитации. По формуле (1.9) вычисляется по известным из расчета $p_{\text{хар}}$ и $u_{\text{хар}}$ переменное по значению число кавитации, сопоставлением которого с $K_{\text{кр}}$ можно определить, будет ли иметь место в данном рассчитываемом случае кавитация. При числах кавитации, больших, чем $K_{\text{кр}}$, кавитация отсутствует, при числах кавитации, равных или меньших $K_{\text{кр}}$,

имеет место кавитации.

Определение $K_{кр}$ для неровностей, шероховатостей и для элементов прочных трактов сооружения (пазы, гасители, оголовки и пр.) производится лабораторным путем на кавитационном стенде.

Кавитационная эрозия

Последствием интенсивной кавитации является кавитационная эрозия. При уменьшении K за счет увеличения скорости интенсивность кавитации и кавитационной эрозии выше, чем при уменьшении давления. Интенсивность кавитационной эрозии оценивается скоростью роста объема эрозионных каверн и зависит от стадии развития кавитации, которая определяется отношением числа кавитации к его критическому значению.

Начальной стадии кавитации отвечает коэффициент перемежаемости γ , несколько больший нуля, при суперкавитации $\gamma = 1$.

Длина кавитационного факела с увеличением интенсивности кавитации увеличивается. При суперкавитации пузырьки, наполненные паром, сливаются, образуя полость, которая может замыкаться внутри жидкости.

Поскольку кавитационная эрозия появляется при $K < K_{кр}$, о возможности кавитационной эрозии можно судить по коэффициенту кавитационной эрозии:

$$K_{эр} < K_{кр}, \quad (1.11)$$

определяющему начало кавитационной эрозии. Таким образом, условие отсутствия кавитационной эрозии выражается неравенством:

$$K_{эр} < K < K_{кр}. \quad (1.12)$$

Коэффициент $K_{эр}$ и его относительное значение $K_{эр}/K_{кр}$ неодинаковы для различных элементов сооружения и различных материалов.

Воздействие кавитации на материал сказывается появлением эрозии материала спустя некоторое время после начала кавитации. Так называемый инкубационный период, в течение которого накапливается усталость материала без внешнего появления разрушений, длится в лабораторных условиях при отсут-

ствии в воде воздуха для бетона марки 500 примерно 8 ч.

Меры борьбы с кавитационной эрозией

Кавитационная эрозия допустима в тех случаях, когда режимы, обуславливающие ее, непродолжительны или когда ее интенсивность невелика. В этих случаях кавитация не может привести сооружение к аварийному состоянию, а эксплуатационные затраты на восстановление повреждений невелики, что оправдывает уменьшение капиталовложения в сооружения в связи с отказом от мер, полностью исключаящих кавитационную эрозию. Однако, учитывая, что прогноз кавитационной эрозии пока возможен лишь приближенно, допускать кавитацию, даже на ее начальной стадии, следует с осторожностью.

Меры, снижающие или исключаящие кавитационную эрозию:

- задание таких форм, размеров элементов, гидравлических режимов, при которых исключается появление кавитации;

- придание элементам сооружения очертаний, которые позволяют использовать особенности суперкавитации: следует обеспечить срыв кавитационного факела с поверхности конструкции без замыкания его на расположенных ниже по течению твердых границах;

- выравнивание поверхностей водопропускных трактов;

- применение бетонов с повышенной кавитационной стойкостью или специальных кавитационных покрытий – облицовок;

- подвод воздуха или вожы в область вакуума;

- отрыв потока от твердых границ.

Говоря о кавитационной стойкости бетона и покрытий, следует иметь в виду, что даже при развитой стадии кавитации, но малых скоростях кавитационная эрозия отсутствует. Каждый материал при скорости, меньшей некоторой предельной, так называемой пороговой скорости, сопротивляется воздействию кавитации очень долго. Разрушительное действие кавитации становится существенным при:

$$v > v_{\text{пор}} \quad (1.13)$$

Скорости $v_{\text{пор}}$ для бетонов различных марок при различном содержании воздуха в потоке, полученные интенсивности кавитации $\frac{K}{K_{\text{кр}}} = 0,35$, приведены в табл. 3.5 [1].

Данные табл. 3.5 [1] позволяют назначать ориентировочно марку бетона в зависимости от скорости потока, содержания в потоке воздуха.

Оценка интенсивности кавитационной эрозии может производиться сопоставлением полученных на кавитационном стенде скоростей нарастания J глубин каверн некоторого эталонного и рассматриваемого материалов. За эталонный материал принимается бетон марки 300 (на грани крупностью 40 мм), для которого при скорости течения 30 м/с $J_0 = 13$ мм/ч.

Судить о кавитационной стойкости материала можно по относительной стойкости N материала путем сопоставления скоростей нарастания глубин каверн эталонного J_0 и рассматриваемого материала J :

$$N = \frac{J_0}{J}. \quad (1.14)$$

Повышение кавитационной стойкости бетона достигается применением бетона повышенной марки, уменьшением крупности заполнителя, использованием в качестве заполнителя щебня, низким водоцементным отношением, выполнение бетонных поверхностей по возможности без значительных неровностей.

Подвод воздуха в область вакуума и аэрация потока у твердых границ являются наиболее эффективными способами борьбы с кавитационной эрозией. Примесь свободного воздуха изменяет физические характеристики воды, которая, становясь упругой средой, амортизирует удары при захлопывании пузырьков.

Выравнивание поверхностей после затвердевания бетона применяется в связи с тем, что по производственным условиям не удастся выполнить поверхности требуемой гладкости. При выравнивании поверхностей впадины заделываются материалом повышенной кавитационной стойкости, выступы сглаживаются.

Выбор способа защиты проточной части сооружения от кавитационной эрозии – технико-экономическая задача, при решении ее следует учитывать, что в определенных условиях возможно также разрушение бетона в результате абразивного воздействия наносов.

Выводы: Кавитация является одной из важных причин разрушения бетона на гидротехнических сооружениях. Данный процесс может вывести сооружение из эксплуатации. Данным явлением при проектировании нельзя пренебрегать.

Список литературы

1. Слисский С.М. Гидравлические расчеты высоконапорных гидротехнических сооружений. Учебное пособие. Москва, 1986, 304 с.
2. Проворова Т.П., Жаров Н.И. Критические параметры кавитации для водобойных стенок различных форм. – Известия ВНИИГ, 1977, 115 с.
3. Рекомендации по учету кавитации при проектировании водосбросных гидротехнических сооружений. П 38 – 75/ВНИИГ. Л.: Энергия, 1976.