

---

**ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НАСЫЩЕННЫХ ПАРОВ НА ПОРОГОВОЕ ЗНАЧЕНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭФФЕКТА КАВИТАЦИИ**

**Анастасия НОЧУЙКИНА**

Московский Политехнический Университет, Рязанский Институт (филиал)  
Федерального Государственного Автономного Образовательного Учреждения Высшего  
Образования,  
Рязань, Россия

Corresponding author: Ночуйкина Анастасия, [nochuikina@yandex.ru](mailto:nochuikina@yandex.ru)

**EFFECT OF SATURATED VAPOR PRESSURE ON THE THRESHOLD VALUE OF THE CAVITATION EFFECT**

**Abstract:** *the article is devoted to the study of how the saturated vapor pressure affects the threshold value of the occurrence of the cavitation effect*

**Keywords:** *cavitation, saturated vapor pressure, cavitation number*

**Аннотация:** *статья посвящена исследованию того, как давление насыщенных паров влияет на пороговое значение возникновения эффекта кавитации.*

**Ключевые слова:** *кавитация, давление насыщенного пара, число кавитации.*

С проблемами кавитации сталкиваются при рассмотрении широкого круга вопросов, связанных с нарушением сплошности движущихся жидкостей, – от исследования тока крови в сосудах до проектирования турбин и корабельных винтов.

Изучение процесса кавитации началось давно. Леонард Эйлер был первым, кто в своих трудах 1754 года о теории гидравлических машин объяснил возможность существования данного явления. В 1897 году английский механик, физик и инженер Осборн Рейнольдс выполнил первые фундаментальные исследования процесса кавитации, наблюдая ее в трубчатых сужениях. В судостроении с кавитацией столкнулись в 1894 году во время испытаний английского миноносца "Дэринг". Скорость корабля существенно снижалась в тот момент, когда на режимах полного хода гребной винт резко изменял свои характеристики. Подход к проблеме кавитации и прикладные исследования английского инженера Чарлза Парсонса в 1897 году заложили основу для методов, используемых в современных исследованиях. Он спроектировал первое в мире судно Турбиния с паротурбинной установкой (турбиной Парсонса). Первые испытания были неудачными, поэтому в дальнейшем Парсонс исследовал эту проблему в водном туннеле с помощью специального стробоскопа (и туннель, и стробоскоп являлись его изобретениями).

Актуальность данной работы заключается в том, что на современном этапе исследований важным механизмом образования кавитации является механизм влияния давления насыщенных паров (по-другому парообразования) на пороговое значение возникновения эффекта кавитации.

Все капельные жидкости способны испаряться. Испаряемость жидкости меньше в том случае, когда выше температура ее кипения. Достаточно точной характеристикой испаряемости жидкости является зависимость давления насыщенных паров данной жидкости от температуры. Эта зависимость является вполне определенной для простых жидкостей. Для многокомпонентных смесей, к которым относятся большинство промышленных жидкостей (например, бензин), давление насыщенных паров может зависеть от того, в каком соотношении объемов находятся паровая и газовая фазы.

В гидравлических системах может происходить интенсивное испарение и кипение рабочих жидкостей в замкнутых объемах при различных значениях давлений и температур.

Нарушение сплошности движущейся капельной жидкости, ее разрыв под действием растягивающих напряжений, возникающих при разрежении в рассматриваемой точке жидкости, называется кавитацией [1].

При разрыве капельной жидкости образуются небольшие полости, которые называются кавитационными пузырьками или кавернами. Они заполнены паром, газом или их смесью. Кавитационные пузырьки образуются в тех местах, где давление в жидкости становится ниже некоторого критического. Критическое давление, при котором происходит разрыв жидкости, зависит от многих факторов: чистоты жидкости, содержания газа, состояния поверхности, на которой возникает кавитация. На рисунке 1 представлена схема образования кавитации.

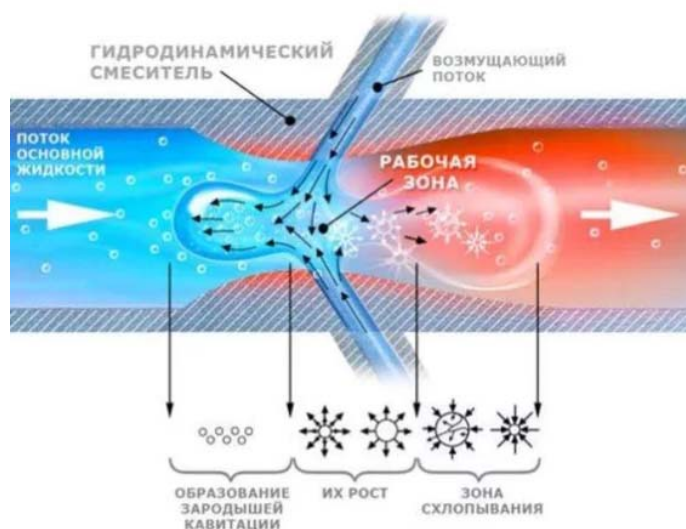


Рисунок 1 – Образование кавитации

Если давление в жидкости понижается в результате возрастания местных скоростей потока капельной жидкости, то кавитация называется гидродинамической; если снижение

давления обусловлено прохождением акустических волн, то кавитация называется акустической.

Вскипание свободной от каких-либо примесей жидкости происходит при давлении, равном давлению насыщенных паров этой жидкости [2]. Данное явление называется паровой кавитацией. Образовавшиеся в этом случае пузырьки пара переносятся потоком в область повышенного давления, пар конденсируется, и пузырьки схлопываются. Однако в потоке жидкости может содержаться определенное количество газа, мельчайшие пузырьки которого имеют радиус порядка  $10^{-9}$  м, поэтому они невидимы невооруженным глазом. Эти пузырьки воздуха называются нуклеонами (или зародышами), они переносятся потоком жидкости и, попадая в область низкого давления, начинают расти. Газ способен диффундировать через поверхность пузырька: внутрь или из него (в зависимости от концентрации газа в пузырьке и рода окружающей его жидкости). Это явление называется газовой кавитацией. Можно сказать, что в большинстве случаев наблюдается парогазовая кавитация. По отдельности паровая и газовая кавитация практически не встречаются.

Если кавитационный пузырек попадает в область повышенного давления, то он уменьшается в размерах и может схлопнуться. Схлопывание сопровождается звуковыми импульсами и гидравлическими ударами, которые способны разрушить поверхность обтекаемого тела (так называемая кавитационная эрозия). Как раз такое действие кавитации на поверхностях гидравлических машин и устройств является нежелательным.

Как говорилось ранее, возникновению кавитации, т.е. наступлению момента разрыва сплошности жидкой среды, должно предшествовать понижение давления по крайней мере до значения давления насыщенных паров.

Существует две основные гипотезы происхождения кавитации. Согласно одной из них в воде содержатся газовые пузырьки малых размеров. При давлении, меньшем, чем давление насыщенного пара  $P_v$ , внутри пузырьков возникает интенсивное выделение газа, пузырек начинает расти и затем наступает пузырьковая кавитация. Начало роста пузырька зависит от значения соотношения его критического размера и давления внутри пузырьков. Однако при всей своей наглядности эта гипотеза вызывает ряд вопросов, на которые трудно ответить. Во-первых, какой состав пузырька? Если это пар, то почему он не конденсируется при давлении  $P > P_v$ , а если это воздух, то почему он не растворяется? Причину существования стабилизированных газообразных ядер видят в существовании поверхностного натяжения. Но и в этом случае остается еще не ясным, почему пузырьки не всплывают.

В связи с этим очень популярной является другая гипотеза, которая предполагает существование газовых включений в мельчайших трещинах на твердых частицах, взвешенных в жидкости, или на поверхности обтекаемых тел. До некоторого критического давления эти газовые полости удерживаются под действием перепада давлений и сил поверхностного натяжения. При данных условиях давление газа ниже, чем давление окружающей водной среды, и растворения газа не должно происходить. По мере снижения давления газ расширяется, газовая полость заполняет трещину, а затем и вовсе покидает ее.

Судьба кавитационного пузырька зависит от характера течения. Пока существуют условия испарения, размеры пузырька увеличиваются, но как только кавитационный пузырек попадает в область повышенного давления, он начинает деформироваться и разрушаться.

Переход от пузырьковой кавитации к развитой нельзя рассматривать как непрерывный плавный процесс постепенного накопления парогазовых включений в области пониженного давления. Наблюдения показывают, что это переход происходит скачкообразно. Признаком наступления развитой кавитации служит появление на теле устойчивой границы каверны. При последующем развитии кавитационного пузыря линия передней границы каверны не претерпевает существенных изменений [3].

В условиях, когда в набегающем потоке содержится небольшое число кавитационных ядер, развитая кавитация может наступить сразу, минуя пузырьковую стадию. Это тем более возможно, если в донную область течения за плохообтекаемыми телами (такими как диск или конус) производить хотя бы незначительный поддув газа.

Порог кавитации характеризуют безразмерным параметром, который называется числом кавитации [4]:

$$\chi = \frac{2(P-P_s)}{\rho v^2}, \quad (1)$$

где  $P$  – гидростатическое давление набегающего потока, Па;

$P_s$  – давление насыщенных паров жидкости при определенной температуре окружающей среды, Па;

$\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;

$v$  – скорость потока на входе в систему, м/с.

Кавитация возникает при достижении потоком жидкости граничной скорости  $v = v_c$ , когда давление в потоке становится равным давлению парообразования (насыщенных паров). Этой скорости соответствует граничное значение критерия кавитации  $\chi$ . В зависимости от этой величины можно различать четыре вида потоков:

- докавитационный – сплошной (однофазный) поток при  $\chi > 1$ ;
- кавитационный – (двухфазный) поток при  $\chi \approx 1$ ;
- пленочный – с устойчивым отделением кавитационной полости от остального сплошного потока (пленочная кавитация) при  $\chi < 1$ ;
- суперкавитационный – при  $\chi \ll 1$ .

В течениях с естественной (паровой) кавитацией обычно известно давление в невозмущенном потоке  $P_\infty$  и давление насыщенного пара в каверне  $P_v$ . Это даёт основание принять в качестве масштаба давления разность давлений  $P_\infty - P_v$ . Тогда можно ввести в рассмотрение модифицированное число Эйлера, которое обычно называют числом естественной (паровой) кавитации:

$$\sigma = \frac{P_\infty - P_v}{\rho v^2 / 2}, \quad (2)$$

В течениях с искусственной кавитацией вместо давления  $P_v$  нужно применять давление в каверне  $P_k$ , тогда равенство будет выглядеть следующим образом:

$$\sigma = \frac{P_\infty - P_k}{\rho v^2 / 2}, \quad (3)$$

Для анализа распределения давления удобно пользоваться безразмерным коэффициентом давления:

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\rho v^2 / 2}, \quad (4)$$

где  $P$  – давление в данной точке жидкости.

Равновесное давление пара является признаком скорости испарения жидкости. Это относится к способности частиц переходить из жидкого состояния в пар. Вещества с высоким давлением пара при нормальной температуре часто называют фитонцидами. При увеличении температуры жидкости кинетическая энергия ее молекул возрастает. Следовательно, число молекул, переходящих в пар, также увеличивается, тем самым, увеличивая давление пара. Нормальная точка кипения – это температура, при которой давление паров равно атмосферному давлению. С любого приращения в этой температуре давление пара становится достаточным для преодоления атмосферного давления и подъема жидкости в виде пузырьков пара внутри вещества. Образование пузырьков в глубине жидкости требует более высокого давления, и, следовательно, более высокой температуры, поскольку давление жидкости увеличивается по мере увеличения глубины погружения. Поверхностное натяжение стенки пузырька приводит к избыточному давлению внутри него, и пузырек схлопывается.

Если давление одного компонента в смеси способствует общему давлению в системе, то такое давление называется парциальным. Например, в воздухе на уровне моря насыщенный водяной пар при температуре 20°C имеет парциальное давление воды около 2,3 кПа, азота 78 кПа, кислорода 21 кПа, аргона 0,9 кПа, на общую сумму 102,2 кПа, создавая основу для нормального атмосферного давления.

Таким образом, в качестве вывода стоит еще раз отметить, что пороговое значение возникновения эффекта кавитации зависит от давления насыщенных паров. Кавитация возникает, когда гидростатическое давление в набегающем потоке становится меньше или равным давлению насыщенных паров (давлению парообразования), и сопровождается нарушением сплошности потока с образованием полостей, насыщенных паром и растворенными в жидкости газами.

Несмотря на видимые отрицательные воздействия кавитации (как говорилось ранее, это эрозия металлов или нежелательное повышение температуры и давления), люди все-таки нашли применение данному эффекту и в настоящее время активно используют кавитацию во многих сферах жизнедеятельности, таких как: медицина, военная промышленность (создание сверхкавитационных торпед) или бытовые ситуации (гидродинамическая очистка поверхностей).

### **Литература:**

1. Пирсол И. Кавитация / Пер. с англ. Ю. Ф. Журавлёва; под ред., с предисл. и доп. Л. А. Эпштейна. – М.: Мир, 1975. – 96 с. – (В мире науки и техники). (обл.)
2. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. – М.: Мир, 1974. – 668 с.
3. Шейпак, А. А. Гидравлика и гидропневмопривод. Основы механики жидкости и газа: учебник / А.А. Шейпак. — 6-е изд., испр. и доп. — Москва: ИНФРА-М, 2021. – 234 с.
4. Иванов А.Н. Гидродинамика развитых кавитационных течений. Л., 1980. – 21 с.