ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В УСЛОВИЯХ КАВИТАЦИИ ПОТОКОВ

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н.

В двигателях и других аппаратах иногда возникает феномен под названием кавитация. Это такая особенность, присущая текущим средам, которая предполагает локальный фазовый переход от жидкого состояния к газообразному (пару). В насосной, турбинной и лопастной технике, где жидкость разгоняется с помощью механических устройств до очень высоких угловых и абсолютных скоростей, таких как центробежные насосы в ракетной технике или гребные винты в кораблестроении, проблема кавитации стоит очень остро. В большинстве случаев кавитирующие жидкости приводят к эрозии и разрушению конструкции. С научной точки зрения проблема кавитации на сегодняшний день далека от завершения.

Основные трудности решения проблем кавитации заключаются в том, что экспериментальные исследования локальных зон кавитирующих жидкостей весьма затруднительны в силу мелкомасштабности и быстротекучести процессов. Визуально картина кавитирующего течения представляется как некоторый каскад пузырьков, либо, так называемых каверн, напоминающих размытые облака пены. Причем внутри и пузырьков и каверн тоже происходит течение, но уже пара или парожидкости. В силу ограниченности экспериментального инструментария локальных особенностей в этой области зафиксировать не удается.

Утверждается [1], что образование кавитационных течений связано с разрывом сплошности жидкой среды под действием уменьшающегося давления. Это происходит из-за того, что скорость жидкости увеличивается. В специальных гидравлических системах в энергетике, химической промышленности, авиационной и ракетной технике используется и перекачивается с большой скоростью широкий ассортимент жидкостей в разнообразных температурных условиях - от расплавленных металлов до криогенных жидкостей. Падение давления в этих условиях из-за увеличения скорости может привести к достижению предела существования жидкой фазы. Давление достигнет уровня давления насыщенных паров и жидкость превратится в пар. Часто в практическом общении инженеры называют этот факт холодным кипением жидкости. Другими словами происходит разрыв жидкости при холодном кипении (кавитации), то есть разделение ее на отдельные слои или области паровыми "подушками" (пузырьками, кавернами и т.д.). Это значит, что процесс кавитации отделяет турбулентное течение жидкости от течения пара внутри пузыря или каверны. Следует отметить, что в самом начале, непосредственно у границы кавитационной области (в зоне кавитации - аналог зоны горения продуктов сгорания ЖРД) течение пара ламинарное и определяется только градиентом давления. Далее за счет изменения параметров паровой среды, формы канала и собственно формы каверны, течение может стать турбулентным. Очевидно, что при повышении давления в канале, то есть при большом положительном градиенте давления может также произойти отрыв потока пара от стенок канала. Более того в практике исследований кавитационных течений констатируется, что при определенных условиях ($dp/dx > 0$) пузырь или каверна могут схлопываться. При этом паровая полость пропадает.

Понятие кавитации можно охарактеризовать следующим образом. Кавитация - это процесс фазового перехода текущей с большой скоростью жидкой субстанции в паровую за счет снижения статического давления до уровня давления насыщенных паров. Кавитационная зона - это граница, либо размытая область, между течениями жидкой и паровой средами. Другими словами возникающий кавитационный процесс разделяет течения (турбулентные или ламинарные) жидкой и паровой фазы.

Для того, чтобы оценить границу раздела между фазами часто используют уравнение Бернулли. При этом правая часть этого уравнения записывается для граничных условий до момента начала кавитации:

$$P_ж + \frac{\rho_ж V_ж^2}{2} = P_{нп} + \frac{\rho_{нп} V_{нп}^2}{2},$$

где индексы "ж" и "нп" принадлежат членам, описывающим жидкую фазу и фазу в области насыщенных паров. На основании этого Тома и Прандтлем было введено число кавитации σ [2]:

$$\sigma = P_ж + \frac{2(P_ж - P_{нп})}{\rho_ж V_ж^2}.$$

Отдавая должное классикам следует также отметить, что термин "кавитация" был впервые введен в гидродинамику Фрудом [3]. Анализ формулы показывает, что наступление кавитации зависит прежде всего от свойств жидкости и пара. При этом существуют нюансы при использовании криогенных жидкостей - водорода, гелия, неона, азота, кислорода и т.д. [4]. На рис. 1 показано кавитационное течение в шнековом насосе.

Даниил Бернулли. Основополагающее уравнение газодинамики

Даниил Бернулли выдающийся физик и математик, в истории науки известен многими результатами первостепенной значимости. Он существенно повлиял на облик физики восемнадцатого века. Бернулли, как выдающийся естествоиспытатель, занимался очень многими разделами точного естествознания. Он занимался механикой, теорией интегрирования дифференциальных уравнений, гидродинамикой, теорией упругости, теорией вероятностей, кинетической теорией газов, электростатикой. В кругу его творческих интересов оказывались и физиология, и анатомия, и ботаника. В 1738 г. появился его основной труд "Гидродинамика", в котором было сформулировано основополагающее уравнение гидродинамики - уравнение Бернулли $P_0 = P + (V^2/2)$, которое доказывало постоянство полного давления P_0 в гидродинамическом тракте и представлялось в виде суммы статического и динамического давлений. С этого уравнения начинается изложение основ гидро- и газодинамики практически во всех монографиях.

Свои классические исследования в области гидродинамики Даниил Бернулли начал в те годы, когда жил в России и работал в Петербургской Академии Наук. Он был одним из представителей многочисленной династии выдающихся ученых-естествоиспытателей. На протяжении ста лет члены этой фамилии заведовали кафедрой математики в Базельском университете, около двух веков состояли

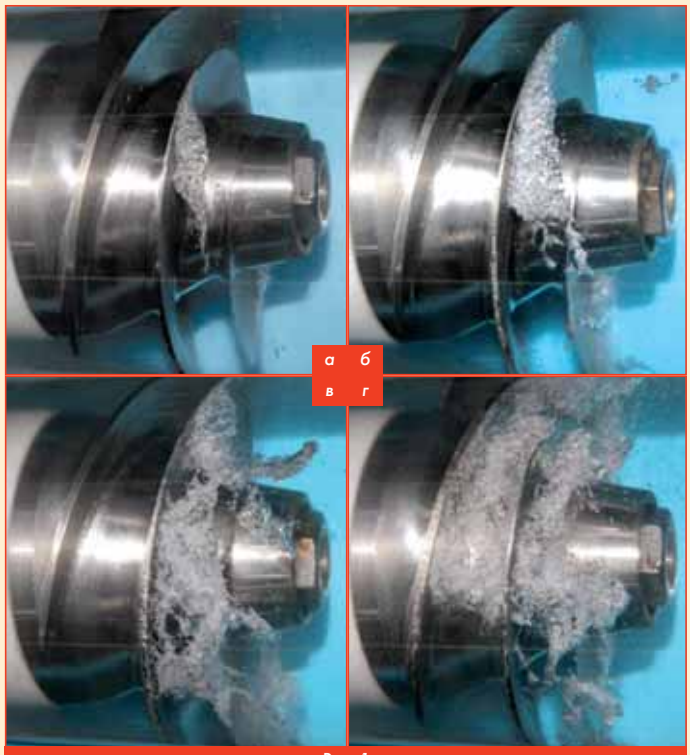

Рис. 1

профессорами этой кафедры, внесли неоценимый вклад в развитие точного естествознания восемнадцатого и девятнадцатого веков.

Зарождение и схлопывание кавитационных пузырьков

Зарождение и схлопывание кавитационных пузырьков в настоящее время является вопросом практически открытым. Однозначного мнения в литературе нет. Например, причиной возникновения кавитационных пузырьков отдельные авторы, например [3], считают достижение потоком критического давления и локальное испарение с образованием пузырьков малого объема (зародышей). Другие считают [4], что зародыши могут образоваться из-за гетерогенных флуктуаций в жидкости, из-за квантовых гетерофазных флуктуаций и даже из-за влияния бозе-конденсации (применительно к криогенному водороду), при которой происходит переход классической жидкости в квантовую. Кроме того, известно, что в потоке жидкости, как правило, содержится некоторое количество воздуха, мельчайшие пузырьки которого имеют радиус ~10^{-9} м и невидимы для невооруженного глаза. Эти пузырьки являются зародышами. Они переносятся потоком жидкости и, попадая в область низкого давления, начинают расти. Через поверхность пузырька происходит диффузия газа (воздуха): внутрь пузырька или из него в зависимости от концентрации газа в пузырьке и окружающей его жидкости. Возникает так называемая паро-газовая кавитация.

Самым очевидным местом, где может задержаться газ являются также микроскопические трещины на поверхности каналов и лопастей. Кроме того, газ может также непосредственно абсорбироваться стенками.

Вопрос зародышеобразования весьма важен для начала стабильного процесса кипения жидкости. В литературе он никогда не обходится вниманием и по возможности исследователи пытаются объяснить причины данного процесса. С этим связано наличие в научных работах многообразия различных мнений и моделей.

Процесс зародышеобразования можно характеризовать как пусковой механизм процесса парообразования.

Было также экспериментально установлено, что начало парообразования может стимулироваться при акустическом воздействии на жидкость. При этом периодические изменения давления в зоне предполагаемой кавитации на жидкость могут переводить ее как в пузырьково-жидкостную фазу, так и в парообразную.

Зародившись, пузырьки в кавитирующей зоне могут взаимодействовать друг с другом, образуя каверны или даже довольно продолжительные паровые следы. Если условия для существования паровых образований приемлемы, то процесс кавитации будет устойчив. Если нет, например пузырь (каверна) развивается в направлении положительного градиента давления, то он может схлопнуться. Известные из литературы механизмы схлопывания имеют так же неоднозначную интерпретацию. Этот процесс объясняют либо прямым воздействием внешнего (со стороны жидкости) давления, и тогда пузырек сжимается и вновь конденсируется, либо потерей устойчивости из-за недостатка сил поверхностного натяжения. Во всех случаях этот процесс происходит скачкообразно и носит волновой и даже ударный характер. В силу многочисленности зон возникновения и схлопывания мелких пузырьков и их случайный характер появления, процесс их образования имеет пульсирующий вид. Локальный прирост давления от каждого схлопывающегося пузырька может быть описан как функция пространства и времени, а вид функции может быть представлен как сумма давления в жидкости и пульсационное давление:

$$P(x, \tau) = P_{ж}(x, \tau) + \tilde{P}(x, \tau).$$

В отдельных работах (например, [4]) авторы осмеливаются записать пульсационный член как сумму гармоник, объясняя при этом возможность появления при ударах шумов и даже звуков.

Воздействие кавитационных процессов на стенки каналов и лопастей

Возникшая в процессе работы технических устройств (шнеко-центробежного насоса, гребного корабельного винта, каналов переменного сечения и пр.) кавитация может приводить к эрозии и даже разрушению их стенок и лопастей. Виды эрозии зависят от условий кавитации. Если кавитация неустойчива, что наблюдается, в основном, при наличии пузырьковой структуры (структура в виде большой каверны практически всегда устойчива), то начинается процесс эрозии поверхности. В силу стохастического характера схлопывания пузырьков, сопровождающегося многочисленными гидроударами жидкости о стенку, процесс ее разрушения носит характер язвовидного изнашивания (рис. 2). Попадая на стенку нависающая над

Рис.2

пузырьком жидкость воздействует на нее с большой кинетической энергией. В стенке возникают локальные углубления с появлением микротрещин по периметру, которые являются концентраторами напряжений и в дальнейшем разрушений. При последующих многочисленных ударах материал поверхности начинает уноситься. Можно считать, что удары носят циклический характер и вид разрушения при этом похож на разрушения при усталостном воздействии.

Кавитация может вызывать износ любых твердых тел [1]. Так, все металлы, твердые и мягкие, хрупкие и вязкие, химически активные и инертные, а также резина, пластмасса, стекло, кварц, бетон и другие неметаллические материалы могут быть подвержены износу под действием кавитации.

Литература

1. Р. Кнепп, Дж. Дейли и Ф. Жэммит. Кавитация. М. Мир, 1974.
2. Б.И. Боровский, Н.С. Ершов, Б.В. Овсянников и др. Высокооборотные лопаточные насосы. М. Машиностроение, 1975.
3. В.В. Рождественский. Кавитация. Ленинград, "Судостроение", 1977.
4. В.А. Акуличев. Кавитация в криогенных и кипящих жидкостях. М. Наука, 1978.