

УДК 532.528

ПРОБЛЕМА НАУЧНОГО ОПИСАНИЯ КАВИТАЦИОННОГО ПРОЦЕССА В СУДОВЫХ УСТРОЙСТВАХ

Власов Дмитрий Владимирович¹, студент

e-mail: dy_vlasov@vk.com

Власов Александр Владимирович¹, курсант

e-mail: tixon.vlasov@gmail.com

Власов Владимир Николаевич¹, старший преподаватель

e-mail: vn_vlasov@mail.ru

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Статья описывает причины и последствия возникновения кавитации в судовых устройствах. Определена проблематика ее математического описания. Выполнена оценка геометрических параметров трубопроводов судовых систем для исключения опасности их кавитационного разрушения.

Ключевые слова: кавитация, гребной винт, кавитационная каверна, судовые системы, эрозийное разрушение, кавитационный факел, число кавитации.

THE PROBLEM OF SCIENTIFIC DESCRIPTION OF THE CAVITATION PROCESS IN MARINE DEVICES

Vlasov Dmitry Vladimirovich¹, Student

e-mail: dy_vlasov@vk.com

Vlasov Alexander Vladimirovich¹, Cadet

e-mail: tixon.vlasov@gmail.com

Vlasov Vladimir Nikolaevich¹, Senior Lecturer

e-mail: vn_vlasov@mail.ru

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article describes the causes and consequences of cavitation in marine devices. The problems of its mathematical description are determined. The geometric parameters of pipelines of ship systems have been evaluated to eliminate the danger of their cavitation destruction.

Keywords: cavitation, propeller, cavitation cavity, ship systems, erosion destruction, cavitation plume, cavitation number.

В настоящее время одной из проблем, возникающих при эксплуатации судовых систем, машин и механизмов, является повышенный износ, обусловленный кавитационными процессами возникающих в них. Изменения геометрии поверхностей машинных

механизмов, вследствие износов, обусловленных процессами кавитации, в свою очередь приводят к изменению режимов их работы.

В общем случае, под кавитацией в жидкости понимают образование заполненных паром и газом полостей, иначе каверн, или пузырьков при локальном понижении давления в жидкости до давления насыщенных паров. Соотношение содержания газа и пара в полости может быть различным (теоретически от нуля до единицы). В момент схлопывания, давление и температура газа достигают значительных величин (по некоторым данным до 100 МПа и 10000°C). После схлопывания полости в окружающей жидкости распространяется сферическая ударная волна, быстро затухающая в пространстве [1]. Эти гидравлические удары в момент замыкания сплошности вызывают эрозионное разрушение материала гребных винтов (рисунок 1), роторов насосов и т.п., а также специфическую коррозию металлов, из которых сделаны эти детали, из-за того, что пассивирующая оксидная плёнка непрерывно удаляется [2].

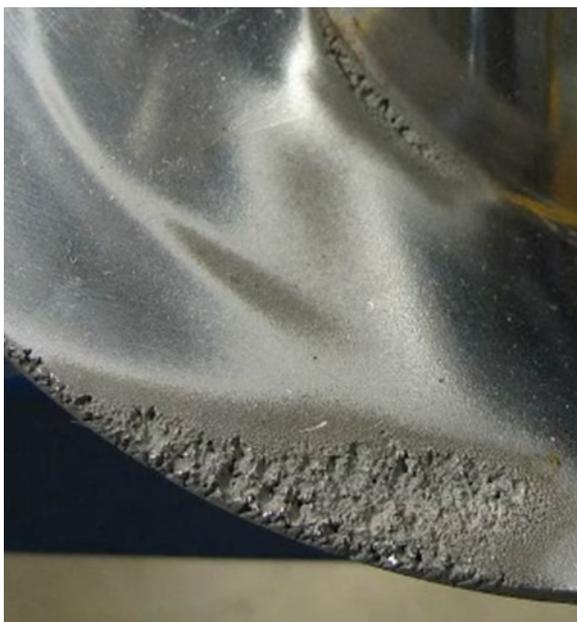


Рисунок 1 – Эрозионное разрушение поверхности гребного винта

В гребных винтах процесс кавитации происходит следующим образом. При вращении гребного винта на нагнетающей стороне винта создается повышенное давление, а на засасывающей – пониженное. С увеличением скорости вращения винта все больше понижается давление жидкости в области засасывающей стороны.

Понижение давления сказывается на температуре кипения этой жидкости, она начинает понижаться (следствие из уравнения Клапейрона-Клаузиуса). Жидкость начинает вскипать при температуре ниже температуры кипения при нормальных условиях, т.е. возникает эффект «холодного кипения». В жидкости начинается процесс высвобождения растворенного воздуха. Тем самым, в жидкости образуются полости, так называемые кавитационные пузырьки или воздушные каверны. Они начинают увеличиваться в размерах, и достигая другой стороны лопасти винта, то есть области, где давление жидкости выше, они схлопываются (коллапсируют), создавая шум и гидравлические удары, повреждающие рабочую поверхность винта, откалывающие от него мелкие кусочки металла [2 – 4].

В крыльчатках насосов происходящие процессы похожи на рассмотренные выше, но при этом имеет особенности, связанные с ограничением объёма и наличием эффекта отражения детонационного эффекта от стенок реакционной камеры (Рисунок 2).



Рисунок 2 – Кавитационное разрушение крыльчатки насоса

В трубопроводах эффект кавитации возникает в случае турбулентного режима работы, обусловленного особенностями эксплуатации либо кратковременного периода переходных режимов работы гидравлических систем (Рисунок 3).



Рисунок 3 – Кавитационное разрушение трубопровода

В частности, кавитационное разрушение трубопровода происходит на его резком изгибе после источника кавитации и для снижения отрицательного воздействия кавитации необходимо, чтобы длина рабочего участка трубопровода ($L_{\text{рп}}$) после источника кавитации превышала критическую ($L_{\text{кр}}$) и, по возможности, превосходила длину образуемого источником кавитационного факела ($L_{\text{ф}}$) (Рисунок 4).

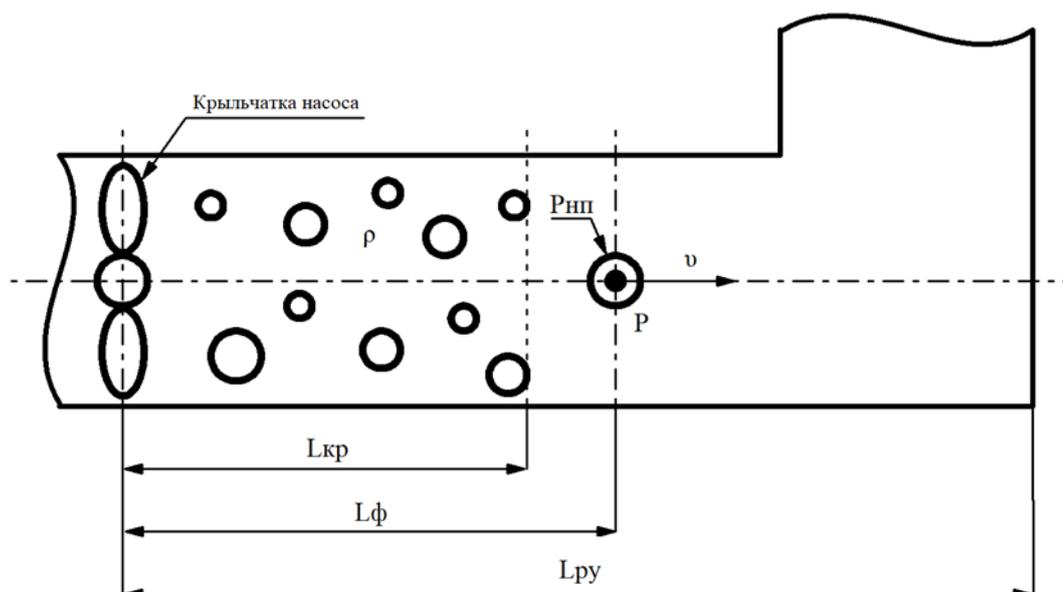


Рисунок 4 – Возникновение кавитации на участке трубопровода

$$L_{кр} \leq L_{пу} \geq L_{ф} \quad (1)$$

Если данное условие выполняется, то это позволяет значительно снизить вероятность кавитационного разрушения на данном участке трубопровода. В свою очередь, критическая длина ($L_{кр}$) будет определяться стойкостью материала трубопровода к кавитационной эрозии (2), а длина кавитационного факела ($L_{ф}$) будет являться функцией от числа кавитации (3, 4) [2]:

$$L_{кр} = f(\sigma, HB, KCV), \quad (2)$$

где σ – число кавитации источника на рассматриваемом участке трубопровода;

HB – твердость по Бринеллю материала трубопровода;

KCV – ударная вязкость материала трубопровода, кДж/м².

$$L_{ф} = f(\sigma); \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{P - P_{нп}}{\frac{1}{2} \rho v^2}, \quad (4)$$

где P – давление в рассматриваемой точке потока жидкости (в сечении рассматриваемого участка трубопровода), Па;

$P_{нп}$ – давление насыщенных паров жидкости, Па;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

v – скорость жидкости в рассматриваемой точке потока (в сечении рассматриваемого участка трубопровода), м/с;

Во всех выше рассмотренных случаях кавитации процессы её протекания происходят по-разному, математическое описание которых будет различным и требует установления точных характеристик в каждом конкретном случаи её описания.

Так в работе [5] было получена аналитическая формула (5) для вычисления давления рабочей среды перед струйным аппаратом (гидродинамическим кавитатором):

$$p_p = 10^{-3} \cdot \frac{\left(1,09 \sqrt{\frac{\sigma^3}{p_n R^3 \sqrt{2} - 1 + 2\sigma}} + p_n \right) \left(1,39 - \left(\frac{Q_z}{Q_{жс}} + 1 \right)^{-2} \right) - 39,4}{1 - \left(\frac{Q_z}{Q_{жс}} + 1 \right)^{-2}}, \quad (5)$$

где p_p – давление рабочей среды перед эжектором, Па;
 σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м.
 R – мгновенный радиус захлопывающейся сферы, м.
 p_n – начальное давление, Па;
 Q_z – объемная скорость (расход) эжектируемой среды (жидкости или газа), м³/с;
 $Q_{жс}$ – объемная скорость (расход) рабочей среды (воды), м³/с.

И несмотря на то, что, данная формула может быть применена для расчета различных систем она не учитывает ее геометрические параметры.

Таким образом, настоящее время нет чёткого описания процесса кавитации, где учитываются условия её возникновения. Параметры образования каверн оценивается бессистемно, то есть без учёта исследования не только самого процесса, но и на первый взгляд второстепенных факторов, которые при более глубоком исследовании могут быть определяющими.

Для чего проводимые исследования процессов кавитации в различных сферах её возникновения должны быть проанализированы не только при обычном, тривиальном подходе, который учитывает такие параметры жидкости как давление и объемную скорость. Но и формы и материалы конструкций, не участвующих непосредственно в процессе кавитации, но оказывающих влияние на протекание процессов.

Список литературы:

1. Наприенко, А.А. Кавитация // Молодежь и наука: сборник материалов IX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 385-летию со дня основания г. Красноярска. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2013. – 4 с.
2. Пирсол И. Кавитация. Пер. с англ. Ю. Ф. Журавлева. Ред., предисл. и дополн. Л.А. Эпштейна. М., «Мир», 1975. – 95 с.
3. Рождественский В.В. Кавитация: учеб. пособие для вузов. – Ленинград: Судостроение, 1977. – 247 с.
4. Кнэпп Р. Кавитация / Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит ; Перевод с англ. д-ра техн. наук Э.А. Ашратова [и др.] ; Под ред. [и с предисл.] д-ра физ.-мат. наук В.И. Полежаева. – Москва : Мир, 1974. – 687 с.
5. Mizgirev D., Vlasov D., Vlasov V. Mathematical description of the cavitation process in the jet apparatus // Journal of Physics: Conference Series 2131 (2021) 052054, DOI:10.1088/1742-6596/2131/5/052054

