

расчётная и реализуемая холодопроизводительности сравниваются только при подаче приточного воздуха, равного $6100 \text{ м}^3/\text{ч}$, из которых объём наружного воздуха составит $1830 \text{ м}^3/\text{ч}$, а эта холодопроизводительность составит 33 кВт. То есть её перерасход – 9,3 кВт, или 39 %.

Теперь посмотрим, что будет, если пойти другим путём – соблюдём требование по температуре приточного воздуха, но сделаем долю рециркуляции больше 70 %.

В таком случае расчётная и реализуемая холодопроизводительности сравниваются только при подаче приточного воздуха, равного $5650 \text{ м}^3/\text{ч}$, из которых объём наружного воздуха составит $840 \text{ м}^3/\text{ч}$ за счёт того, что количество наружного воздуха останется неизменным, перерасхода холодопроизводительности не произойдёт, но доля рециркуляции при этом составит 85 %.

Если же пойти по пути снижения температуры приточного воздуха, оставив долю рециркуляции 70 %, а объём подаваемого наружного воздуха $840 \text{ м}^3/\text{ч}$ при общем расходе приточного воздуха $2800 \text{ м}^3/\text{ч}$, то, чтобы реализовать 23,7 кВт, будет необходимо снизить температуру приточного воздуха до $11,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Перерасхода холодопроизводительности опять же не произойдёт.

Разумным бы было компромиссное решение изменения нормативных требований в виде увеличения доли рециркуляции до 80 % со снижением температуры приточного воздуха до $14 \text{ }^\circ\text{C}$, в таком случае при сохранении объёма подачи наружного воздуха на уровне $840 \text{ м}^3/\text{ч}$ и общем объёме приточного воздуха $4200 \text{ м}^3/\text{ч}$ можно было бы реализовать даже чуть больше холодопроизводительности, чем нужно – 24,7 кВт.

Из всего вышесказанного очевидно, что для повышения энергоэффективности, снижения нагрузки на оборудование, а соответственно и повышения его надёжности, в режиме охлаждения необходим пересмотр норм в части доли рециркуляции и минимальной температуры приточного воздуха, подаваемого в вагон.

Оценка возможного негативного влияния на здоровье пассажира при изменении вышеназванных норм выходит за рамки данного анализа, однако стоит отметить, что согласно тем же нормативным документам в системе рециркуляции пассажирских вагонов должен использоваться обеззараживатель воздуха, а подача охлаждённого воздуха непосредственно на пассажира запрещена.

УДК 532.5.01+532.528

КРИТЕРИИ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ СУДОВЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

Д. С. МИЗГИРЕВ, В. Н. ВЛАСОВ, Д. В. ВЛАСОВ

*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород,
Российская Федерация*

Под судовыми трубопроводными системами понимают совокупность специализированных трубопроводов с механизмами, аппаратами, приборами и устройствами, предназначенных для перемещения жидкостей, воздуха или газов в целях обеспечения нормальной эксплуатации судна.

Работа судовых систем обеспечивает живучесть судна, то есть безопасность его плавания, необходимые условия обитаемости, сохранность груза, а также выполнение специальных функций, связанных с назначением судна. Вследствие этого к конструкции и работе судовых систем предъявляют определенные критерии. К общим критериям относятся высокая надежность; живучесть, то есть способность системы выполнять свои функции при частичном повреждении или выходе из строя отдельных участков; коррозионная стойкость, компактность и минимальная масса; хорошая защищенность от механических повреждений во время эксплуатации, доступность для осмотра, окраски и ремонта; хороший внешний вид, отвечающий архитектуре помещений, в которых смонтированы системы; высокая степень автоматизации и механизации; экономичность постройки и эксплуатации; обеспечение требований техники безопасности [1].

Перечисленные критерии не учитывают возможного износа, обусловленного процессами кавитации, который приводит к изменению геометрии поверхностей и, как следствие, изменению режимов работы элементов системы.

В общем случае под кавитацией в жидкости понимают образование заполненных паром и газом полостей (каверн или пузырьков), возникающих при локальном понижении давления в жидкости до давления насыщенных паров.

В момент схлопывания каверны давление и температура в точке достигают значительных величин (по некоторым данным до 100 МПа и до 10 000 °С). После закрытия полости в окружающей ее жидкости распространяется сферическая ударная волна, быстро затухающая в пространстве.

Следствием ее прохождения являются гомогенизация фазовых составляющих жидкостей и сопутствующие физико-химические процессы, происходящие в них.

В то же время гидравлические удары в моменты восстановления сплошности жидкости вызывают интенсивное эрозионное разрушение материала роторов насосов, элементов трубопроводов и трубопроводной арматуры. Кроме того, одновременно с непрерывным ударным воздействием, протекает специфическая коррозия металлов, из которых сделаны детали вследствие того, что пассивирующая оксидная пленка непрерывно удаляется.

Процесс образования гидродинамической кавитации на примере крыльчатки насоса происходит следующим образом: при вращении крыльчатки на нагнетающей стороне создается повышенное давление, а на засасывающей – пониженное. С увеличением скорости движения лопастей все больше понижается давление жидкости в области засасывающей стороны.

Понижение давления сказывается на температуре кипения жидкости – она начинает понижаться (следствие из уравнения Клаузиса – Клапейрона). Жидкость начинает вскипать при температуре ниже температуры кипения при нормальных условиях, т. е. возникает эффект так называемого «холодного кипения». Одновременно вследствие снижения растворимости газов из жидкости начинается процесс высвобождения растворенного воздуха. Тем самым в потоке образуются кавитационные полости, заполненные паром или воздухом. При движении в направлении к крыльчатке они увеличиваются в размерах и, достигая другой стороны лопасти, т. е. области, где давление жидкости выше, схлопываются, создавая шум и гидравлические удары. Это повреждает рабочую поверхность крыльчатки, откалывая от нее мелкие кусочки металла (рисунок 1, а). Также, в случае крыльчатки, процесс разрушения усиливается за счет отражения детонационного эффекта от стенок корпуса насоса (реакционной камеры) [2–6].

В трубопроводах эффект кавитации возникает в случае турбулентного режима работы, обусловленного режимом эксплуатации, либо кратковременного периода переходных режимов работы гидравлических систем. Таким образом, все судовые трубопроводные системы, вследствие особенностей их работы, также подвержены активному кавитационному износу (рисунок 1, б).

а)



б)



Рисунок 1 – Кавитационная эрозия:
а – крыльчатки насоса; б – трубопровода

Следовательно, безопасность и работоспособность системы «насос – трубопровод» может оказаться не обеспеченной. В связи с этим необходима разработка критерия, учитывающего негативное влияние описанных процессов.

Вследствие этого при проектировании вновь создаваемых судовых систем и входящих в них элементов для снижения отрицательного воздействия кавитации необходимо, чтобы длина рабочего участка трубопровода L_{py} после источника кавитации превышала критическую $L_{кр}$ и, по возможности, превосходила длину образуемого источником кавитационного факела $L_{ф}$ (рисунок 2):

$$L_{кр} \leq L_{py} \leq L_{ф}. \quad (1)$$

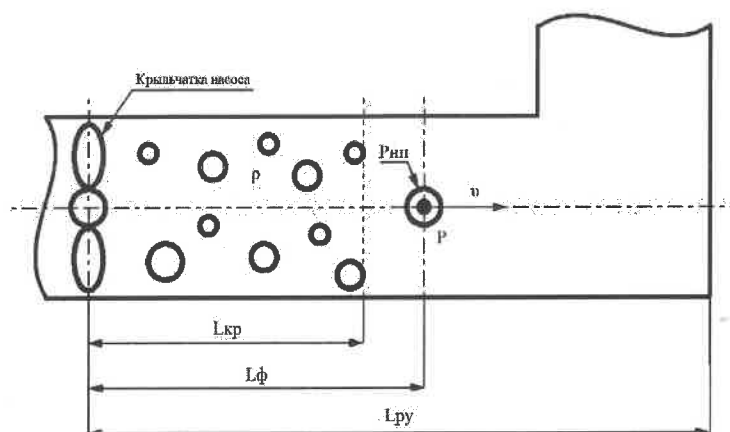


Рисунок 2 – Схема кавитационного воздействия на участке трубопровода

Выполнение данного условия позволяет полностью исключить опасность кавитационного разрушения. В свою очередь, критическая длина $L_{кр}$ будет определяться стойкостью материала детали к кавитационной эрозии (2), а длина кавитационного факела $L_{ф}$ будет являться функцией от числа кавитации (3, 4):

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

где σ – число кавитации источника на рассматриваемом участке трубопровода; HB – твердость материала трубопровода по Бринеллю; KCV – ударная вязкость материала трубопровода, кДж/м²;

$$L_{ф} = f(\sigma); \quad (3)$$

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

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.

В случае невозможности выполнения условия (1), например, при ремонтах или модернизации существующих систем, целесообразно применение кавитационностойких материалов, либо необходимо предусматривать использование сменных элементов в местах, наиболее подверженных кавитационному изнашиванию [2].

Таким образом, при соблюдении необходимых требований и расчетных показателей безопасность трубопроводов по предлагаемому критерию будет обеспечена.

Список литературы

- 1 Судовые устройства : справ. ; под ред. М. Н. Александрова. – Л. : Судостроение, 1987. – 656 с.
- 2 Мизгирев, Д. С. Кавитационные процессы в судовых системах / Д. С. Мизгирев, В. Н. Власов, Д. В. Власов // Развитие энергетики водного транспорта, информационных и энергосберегающих технологий : сб. материалов I Всероссийской конф., Астрахань, 12–13 декабря 2023 года. – Астрахань : Волжский государственный университет водного транспорта, 2023. – С. 19–22. – EDN GMMAUJ.
- 3 Пирсол, И. Кавитация / И. Пирсол ; пер. с англ. Ю. Ф. Журавлева; ред., предисл. и дополн. Л. А. Эпштейна. – М. : Мир, 1975. – 95 с.
- 4 Рождественский, В. В. Кавитация : учеб. пособие для вузов / В. В. Рождественский. – Ленинград : Судостроение, 1977. – 247 с.
- 5 Кнэпп, Р. Кавитация / Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит ; пер. с англ. д-ра техн. наук Э. А. Ашратова [и др.] ; под ред. [и с предисл.] д-ра физ.-мат. наук В. И. Полежаева. – М. : Мир, 1974. – 687 с.
- 6 Mizgirev D. Mathematical description of the cavitation process in the jet apparatus / D. Mizgirev, D. Vlasov, V. Vlasov // Journal of Physics: Conference Series 2131 (2021) 052054. – DOI :10.1088/1742-6596/2131/5/052054.