

БОГАТЫРЬ Д.О. студ., НЕМЦЕВ Э.Н. ст.преп. (КИИ ДонНТУ)
**ДОПУСТИМАЯ ВЫСОТА ВСАСЫВАНИЯ НАСОСА,
 КАВИТАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ**

Розглянуто питання визначення допустимої висоти всмоктування насоса та вплив кавітаційних явищ на роботу відцентрового насоса. Визначено причини виникнення кавітації в насосах та способи її усунення.

Около 2500 лет назад, древнегреческий философ Аристотель сформулировал принцип – "природа боится пустоты". На основании этого принципа высота всасывания насосов должна быть бесконечно большой, так как образование пустоты во всасывающем трубопроводе (в водяном столбе) перед насосом природой запрещено. Однако конструктивные поиски, выполненные еще во времена Галилея, с поршневыми насосами показали, что во многих случаях насосы, установленные на поверхности земли не могут поднять воду из колодца.

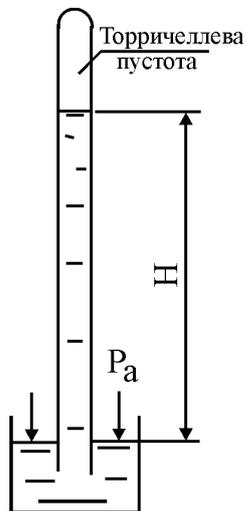


Рис. 1 – Опыт Торичелли

Откуда

Галилей поручил своему ученику Торричелли разобраться, почему наблюдаются такие явления? Почему один и тот же насос с одного колодца может качать воду, а с другого нет? В результате выполненных исследований, Торричелли пришел к выводу, что вода во всасывающем трубопроводе насоса поднимается вверх по действием атмосферного давления. Для измерения величины этого давления, он использовал запаянную с одного конца стеклянную трубку и ртуть (рис. 1).

В результате многократных опытов Торричелли установил, что высота ртути в запаянной трубке зависит от величины атмосферного давления. За нормальное атмосферное было принято давление, когда столб ртути поднимался на 760 мм над уровнем воды море (уровень воды моря и уровень ртути в чашке совпадают).

Пересчитаем, на какую высоту поднимется столб воды, чтобы уравновесить атмосферное давление:

$$P_a = \rho \cdot g \cdot H, \quad (1)$$

$$\rho_{рт} \cdot g \cdot H_{рт} = \rho_{воды} \cdot g \cdot H_{воды}, \quad (2)$$

$$H_{воды} = H_{рт} \frac{\rho_{рт}}{\rho_{воды}} = 0,76 \cdot \frac{13600}{1000} = 10,33 \text{ м вод. ст.} \quad (3)$$

Из расчетов следует, что атмосферное давление уравновешивает столб воды высотой 10,33 м. Отсюда следует, что во всасывающем трубопроводе любого насоса вода поднимется на высоту не более 10,33 м.

Однако надо учесть, что в Торричеллиевой пустоте имеется давление равное давлению упругости паров жидкости. В частности, для воды это давление можно определить по приближенной формуле, P_v :

$$P_v = 5,3 \cdot t^2, \quad (4)$$

Известно, что температура кипения воды зависит от давления. Чем ниже давление, тем при меньшей температуре закипает вода. В частности, температура кипения воды на вершине горы Эльбрус составляет около 70°C. В таких условиях невозможно даже сварить яйцо, для которого нужна температура не менее 74°C.

Насосы вспомогательного водоотлива шахты, как правило, имеют положительную геометрическую высоту всасывания, которая определяется как разность отметок между уровнем воды в водосборнике и осью насоса.

Значение допустимой вакуумметрической высоты всасывания (величина вакуума, которую покажет вакуумметр, установленный на входе в насос) ограничивается несколькими величинами и может быть определено по уравнению:

$$H_{\text{вак}}^{\text{доп}} = \frac{P'_a - P_t}{\rho g} - h_{\text{ном}} - \frac{v^2}{2g} - \kappa \cdot h_{\text{к.зан}}, \quad (5)$$

где P'_a – величина атмосферного давления, действующего на поверхность воды в водосборнике. При известной величине атмосферного давления над уровнем моря (P_a), глубине шахты ($H_{\text{ш}}$) и депрессии ($P_{\text{дипр}}$), создаваемой вентилятором главного проветривания шахты, величина атмосферного давления, действующего на поверхность воды в водосборнике применительно к условиям шахты «Красноармейская-Западная №1» определится по зависимости и составит величину:

$$P'_a = P_a \left(1 + \frac{0,01 \cdot H_{\text{ш}}}{T_a} \right)^{3,4} - P_{\text{дипр}} = 1 \cdot 10^5 \left(1 + \frac{0,01 \cdot 708}{300} \right)^{3,4} - 0,25 \cdot 10^4 = 1,06 \cdot 10^5 \text{ Па}, \quad (6)$$

$P_{\text{н.н}}$ – давление насыщенных паров воды при рассматриваемой температуре, значение которых определим по зависимости:

$$P_{\text{н.н}} = 5,3 \cdot t^2 = 5,3 \cdot 18^2 = 1717 \text{ Па},$$

где ρ – плотность воды, кг/м³,

g – ускорение свободного падения тел, м/с²,

$h_{\text{ном}}$ – потери на трение во всасывающем трубопроводе, величину которых определим по формуле:

$$h_{\text{ном}} = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \xi_{\text{ес}} \right) \frac{8Q_p^2}{g \cdot \pi^2 \cdot d^4 \cdot 3600^2}, \quad (6)$$

λ – коэффициент Дарси или коэффициент гидравлического трения, значение которого для шахтных стальных трубопроводов принято определять по формуле Ф.А. Шевелева:

$$\lambda = \frac{0,021}{d^{0,3}}, \quad (7)$$

v – средняя скорость воды во всасывающем трубопроводе, значение которой определится по выражению:

$h_{\text{к.зан}}$ – кавитационный запас напора, зависящий от конструкции колеса насоса.

В физическом понимании это допустимые потери напора во входной части рабочего колеса насоса. Значение кавитационного запаса напора принято определять по формуле С.С. Руднева, м:

$$h_{к.зан} = 10 \cdot \left(\frac{n \sqrt{Q_p}}{C} \right)^{4/3} \text{ м,}$$

где C – критерий кавитационного подобия насосов, значение которого для шахтных насосов принято принимать $C = 800 \text{ мин}^{-1}$.

k – коэффициент запаса, значение которого по ГОСТ 6134-71 принимается, равным $k = 1,2 \dots 1,3$.

С физической точки зрения кавитация это явление вскипания жидкости при нормальной температуре в области пониженных давлений с последующей конденсацией холодных паров в области положительных давлений. Конденсация пузырьков холодного пара происходит почти мгновенно. В образовавшиеся пустоты с большой скоростью устремляется окружающая жидкость. Мгновенное торможение жидкости в центрах пузырьков или полостей приводит к возникновению локальных гидравлических ударов, величина давления в которых может достигать сотен МПа.

Примеры последовательности физических процессов, происходящих при наступлении кавитации в радиальном рабочем колесе насоса и внешнем цилиндрическом насадке, приведены на рис. 2 и рис. 3. В зонах холодного кипения жидкости (высокого вакуума) образуется пароводяная смесь. При взаимодействии смеси с лопатками колеса давление повышается, что приводит к конденсации пузырьков пара и образованию локальных гидравлических ударов. Под действием гидравлических ударов разрушаются лопатки и диски рабочего колеса.

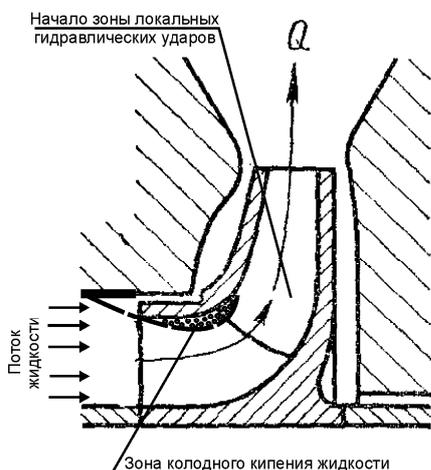


Рис. 2 – Схема физических процессов в рабочем колесе насоса при кавитационных явлениях

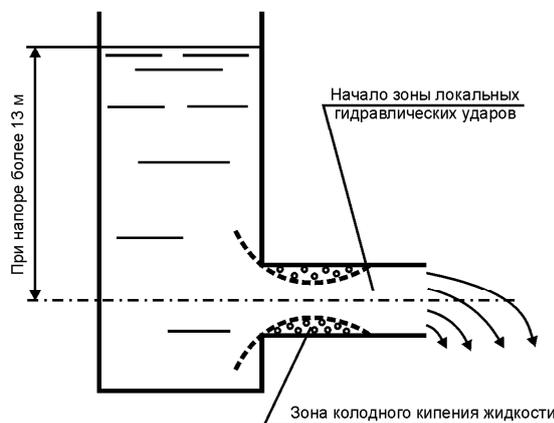


Рис. 3 – Схема физических процессов во внешнем цилиндрическом насадке при кавитационных явлениях

За счет инерции жидкости, на расстоянии около 0,5 диаметра от входа в цилиндрическую насадку, образуется зона пониженного давления. При напоре более 13 м в этой зоне вакуум становится настолько высоким, что вода при 10 °С начинает кипеть.

В зоне, где жидкость заполняет все сечение насадки, давление становится

положительным. С этого расстояния начинается зона локальных гидравлических ударов, под действием которых разрушается насадка. В насадке появляются сквозные отверстия.

Если схлопывание пузырьков пара будет происходить на поверхности проточной части насоса, то за счет высокой частоты повторяющихся гидравлических ударов возникают усталостные разрушения.

Стойкость для наиболее распространенных материалов от двухчасового воздействия кавитацией на образцы с одинаковой площадью поверхности, выражается в мг следующими цифрами:

Литая сталь	105,0
Алюминий	124,0
Латунь	156,0
Чугун	224,0
Литая нержавеющая сталь (Сг 18%, Ni 8%)	13,0
Литая марганцовая бронза	80,0
Литая алюминиевая бронза (Си 83,1%, Al 10,3%, Fe 4,1%).....	5,8
Горячекатаная нержавеющая сталь (Сг 28%, Ni 13%)	8,0

Кавитационному разрушению в насосостроении подвержены все материалы, но быстрее всего разрушается чугун, так как в его структуре присутствуют мягкие графитовые включения, которые разрушаются в первую очередь.

Стойкость материалов к кавитации зависит от их твердости и вязкости, этим и объясняется надежность работы деталей, изготовленных из нержавеющей сталей и алюминиевой бронзы.

Кавитационные качества насосов зависят от параметров конструкции их первого рабочего колеса. Основное направление в повышении всасывающей способности – это принять первое рабочее колесо более широким (рис. 4г) с меньшим значением критического кавитационного запаса или создавать конструкции, которые закручивают основной поток непосредственно перед входом в лопаточный канал рабочего колеса (рис. 4а – 4в).

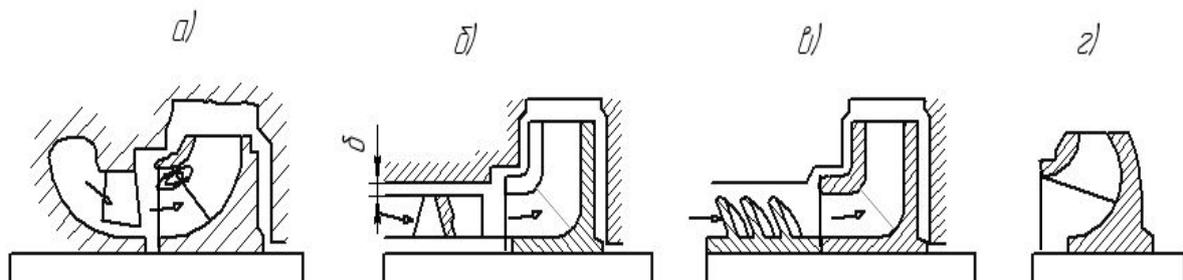


Рис. 4 – Способы борьбы с кавитацией путём применения различных конструкций

Кавитационные явления наблюдаются не только в центробежных насосах. Достаточно часто возникают они и в местных сопротивлениях, например, в поворотах, при истечениях жидкости, в плохо закрытой запорной арматуре, гребных винтах и даже в водосбросах плотин.

Кавитационный износ легко отличить от абразивного износа. Поверхность кавитационного износа покрыта оспинками и бугорками, может иметь форму червоточин. Поверхность абразивного износа как бы шлифована и на «свежей» детали блестит.

Кавитационному износу присущ лавинообразный характер. Чугунные колеса и корпусные детали секционных насосов серии ЦНС 60 могут быть полностью изношены

в течение нескольких дней или десятков часов. Особенно подвержено кавитационному износу всасывающее (1-е) колесо насоса. После разрушения 1-го колеса начинает разрушаться 2-е колесо и так далее.

Кавитационные явления могут возникать даже в правильно подобранных насосах. Причиной этому может служить засорение сетки приемного устройства, закупорка негабаритными кусками первого рабочего колеса, запуск насоса на пустой трубопровод и еще ряд других факторов.

Основным недостатком являются частные кавитационные режимы, что снижает производительность насосов на 15 - 20 % и КПД на 5 – 10 %. Кроме того, работа насосов в кавитационных режимах приводит к разрушению деталей насоса вследствие кавитационной эрозии.

Определение причин появления кавитации имеет очень важное значение для правильной эксплуатации насосных агрегатов. Для обеспечения бескавитационной работы насосов на заводах-изготовителях проводятся испытания для каждой серии. Испытания проводятся при разных подачах в рабочей области насоса. В результате строится кривая допускаемой вакуумметрической высоты всасывания. Затем, при конкретном проектировании водоотлива, проверяют каждую насосную установку на отсутствие кавитации. Основным критерием отсутствия кавитационных явлений в насосах является – стабильность показаний манометров, установленных в линии нагнетания. Во многих случаях, чтобы уйти от кавитационных явлений, достаточно увеличить сопротивление нагнетательного трубопровода (прикрыть задвижку, а лучше установить дросселирующую шайбу). В таких случаях подача насоса уменьшается, а всасывающая способность насоса увеличивается. Он входит в нормальный режим работы (в рабочую зону).

Литература

1. Геер В.Г., Тимошенко Г.М. Шахтные вентиляторные и водоотливные установки. М., Недра 1987. – 270с.
2. Попов В.М. Водоотливные установки: Справочное пособие. М., "Недра", 1990. – 254 с.
3. Хаджиков Р.Н., Бутаков С.А. Горная механика: Учебник для техникумов. М., "Недра", 1982. – 407 с.