

УДК 629.7.064:532

Исследование условий возникновения кавитации в зазорах элементов конструкций аксиально-поршневых гидромашин

А.М. Матвеевко, В.Я. Чаплыгин.

Аннотация

Проведены исследования влияния ускорения элементов конструкций и вязкости жидкости на процесс возникновения и развития кавитации в зазорах, теоретическим путем получены формулы для трех кавитационных критериев, два из которых (по ускорению и по вязкости) ранее неизвестны.

Получены формулы, выражающие кавитационные критерии через критические значения основных гидродинамических критериев.

Дана математическая формулировка условий возникновения кавитации в зазорах элементов конструкций с учетом вязкости жидкости и ускорения элементов конструкций.

Ключевые слова

кавитационные критерии; зазоры; вязкость жидкости; ускорение элементов конструкций.

1. Состояние вопроса

Высокая степень вибрации элементов конструкций аксиально-поршневых гидромашин, а также пульсаций давления рабочей жидкости создают условия для возникновения кавитации. Динамика сферической кавитационной каверны в предположении, что жидкость несжимаема, внешнее давление постоянно, газ внутри каверны отсутствует, а пар способен к мгновенной конденсации, описывается уравнением [1]:

$$\eta\ddot{\eta} + \frac{3}{2}\dot{\eta}^2 + \frac{C}{\eta}\dot{\eta} + \frac{2D}{\eta} + 1 = 0, \quad (1)$$

где η — безразмерный радиус каверны.

Как видно, даже при приведенных допущениях движение стенок каверны достаточно сложно. Если же учесть, что в кавитационной области существует множество каверн, различных по своим размерам, стадиям развития и взаимно влияющих друг на друга, то практически описать процессы, происходящие в кавитационной области, не представляется возможным. По этой причине исследования условий возникновения и развития кавитации носят в основном экспериментальный характер. Так, например, в работе [2] для определения размеров кавитационных пузырьков производилась обработка кинограмм, полученных высокоскоростной кинокамерой.

Из всего вышеизложенного можно сделать вывод: процессы, происходящие в кавитационной области, невозможно практически описать по поведению отдельных пузырьков или даже их групп, определяющие параметры которых лежат в определенных пределах. С другой стороны, в той или иной конкретной ситуации описать некоторые из процессов, используя теорию размерностей и такие общие параметры, как геометрия, внешнее давление, температура, давление насыщенных паров при данной температуре, свойства рабочей жидкости (вязкость, плотность, сжимаемость) и т.п., представляется возможным.

Возникновение кавитации в зазорах элементов конструкций аксиально-поршневых гидромашин приводит к эрозии поверхностей деталей, что в свою очередь влечет увеличение утечек (например, в зазоре между блоком цилиндров и торцевым распределителем), уменьшает коэффициент полезного действия, приводит к увеличению износа и, в конечном итоге, к уменьшению срока службы агрегата.

Для определения условий наступления кавитации повсеместно в теоретических и экспериментальных исследованиях [3] используется безразмерный параметр

$$\kappa = \frac{2(p_{сст} - p_d)}{\rho v_{\infty}^2} \text{ — число кавитации,} \quad (2)$$

который применим для исследования лишь установившегося движения идеальной жидкости.

В настоящее время не существует критериев, отображающих влияние сил вязкости и ускорения элементов конструкций гидромашин на процесс возникновения и развития кавитации. В связи с этим возникает необходимость новых теоретических изысканий.

2. Вывод уравнений для кавитационных чисел по ускорению, вязкости и скорости

В блоках питания гидросистем современных летательных аппаратов имеется множество цилиндров плоских капиллярных зазоров, например, между блоком и распределительным золотником, между башмаком плунжера и наклонной шайбой, в подшипнике скольжения опорной пяты и т. д.

В настоящей работе рассматриваются условия возникновения кавитации в плоском капиллярном зазоре с круглыми границами, схема которого показана на рис. 1.

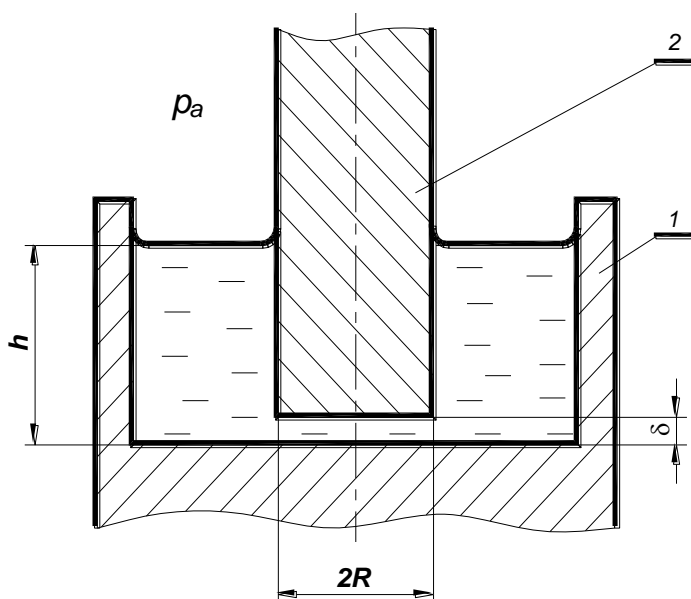


Рис.1. Плоский капиллярный зазор с круглыми границами.

Ультразвуковая ванна 1 закреплена на магнитоstrictionном преобразователе, который сообщает ей колебания в вертикальном направлении с ультразвуковой частотой. Неподвижно в пространстве закреплен стержень 2, образуя с ультразвуковой ванной 1 зазор δ . Радиус стержня R . Это является моделью вышеперечисленных конструктивных пар. В ультразвуковую ванну заливается рабочая жидкость на высоту h .

Факт наличия или отсутствия кавитации определяют следующие параметры:

δ – толщина капиллярного зазора;

R – радиус капиллярного зазора;

h – толщина слоя рабочей жидкости;

T – температура рабочей жидкости, которая определяет следующие параметры:

ρ – плотность жидкости;

μ – динамическую вязкость;

p_n – давление насыщающих паров;

p_0 – атмосферное давление;

A – амплитуда колебаний дна ультразвуковой ванны;

ω – циклическая частота колебаний.

Процессы, происходящие в капиллярном зазоре, рассматриваются ниже при следующих ограничениях:

- 1) температура постоянна $T = const$;
- 2) $Re < Re_{кр}$, т.е. движение в капиллярном зазоре ламинарное;
- 3) эпицентр кавитационной области находится в центре капиллярного зазора;
- 4) момент зарождения кавитационных пузырьков наступает тогда, когда давление в вышеуказанной области становится равным давлению насыщающих паров при данной температуре.

Из первых двух условий следует, что до момента начала кавитации

$$\begin{aligned} \rho &= const; \\ \mu &= const; \\ p_n &= const. \end{aligned} \tag{3}$$

Причины возникновения кавитации в зазоре:

- 1) рабочая жидкость из-за своей инертности не успевает двигаться с ускорением, определяемым движением стенок, образующих капиллярный зазор;
- 2) недостаточно внешнего давления для преодоления сил вязкости;
- 3) недостаточно внешнего давления для создания необходимого скоростного напора.

Рассмотрим каждую из причин в отдельности. Колебания дна ультразвуковой ванны происходят по гармоническому закону:

$$x = \delta + A \sin(\omega t + \varphi), \tag{4}$$

где A – амплитуда колебаний;

ω – циклическая частота;

t – время;

φ – начальная фаза.

Скорость движения дна ультразвуковой ванны

$$V = \frac{dx}{dt} = \frac{d[\delta + A\sin(\omega t + \varphi)]}{dt} = \omega A \cos(\omega t + \varphi). \quad (5)$$

Ускорение дна ультразвуковой ванны

$$a = \frac{dV}{dt} = \frac{d[\omega A \cos(\omega t + \varphi)]}{dt} = -\omega^2 A \sin(\omega t + \varphi), \quad (6)$$

откуда непосредственно следует, что модуль максимального ускорения дна ультразвуковой ванны

$$a_1 = \omega^2 A. \quad (7)$$

Максимальное ускорение a_2 , с которым может двигаться рабочая жидкость извне в капиллярный зазор, является функцией ρ , Δp и R :

$$a_2 = f(\rho, \Delta p, R), \quad (8)$$

где $\Delta p = p_0 + \rho gh - p_n$.

Предполагая, что функция (8) имеет степенной вид и, используя теорию размерностей, получим

$$a_2 = \frac{1}{C_a} \frac{\Delta p}{\rho R}, \quad (9)$$

где C_a – безразмерный коэффициент пропорциональности, определяемый опытным путем.

Кавитация в капиллярном зазоре наступает, очевидно, в том случае, когда

$$a_1 \pi R^2 > a_2 2\pi R \delta \quad (10)$$

или, учитывая (7) и (9),

$$\omega^2 A \pi R^2 > \frac{1}{C_a} \frac{\Delta p}{\rho R} 2\pi R \delta, \quad (11)$$

где πR^2 – площадь стенок капиллярного зазора, расстояние между которыми изменяется по закону (4);

$2\pi R\delta$ – площадь окна, через которое рабочая жидкость устремляется извне в капиллярный зазор.

Введя обозначение

$$C_{ka} = \frac{C_a \omega^2 AR^2 \rho}{2\Delta p \delta}, \quad (12)$$

условие (11) можно переписать следующим образом

$$C_{ka} > 1 \text{ – кавитация наступает} \quad (13)$$

$$C_{ka} \leq 1 \text{ – кавитация отсутствует,} \quad (14)$$

где C_{ka} – число кавитации по ускорению.

Рассмотрим, далее, вклад сил вязкости в процесс развития кавитации. Дно ультразвуковой ванны движется со скоростью, изменяющейся во времени по закону (5):

$$V = \omega A \cos(\omega t + \varphi), \quad (15)$$

откуда непосредственно следует, что максимальная скорость дна ультразвуковой ванны

$$V_1 = \omega A. \quad (16)$$

Максимальная скорость V_2 , с которой может поступать жидкость извне в капиллярный зазор, является, очевидно, функцией Δp , μ , δ и R :

$$V_2 = f(\Delta p, \mu, \delta, R). \quad (17)$$

Предполагая, что функция (17) имеет степенной вид и используя теорию размерностей, получим

$$V_2 = \frac{1}{C_\mu} \frac{\Delta p \delta^2}{\mu R}, \quad (18)$$

где C_μ – безразмерный коэффициент пропорциональности, определяемый опытным путем.

Максимальный расход жидкости, необходимый для заполнения капиллярного зазора,

$$Q_1 = V_1 \pi R^2. \quad (19)$$

Располагаемый расход жидкости

$$Q_2 = V_2 2\pi R \delta. \quad (20)$$

Кавитация в капиллярном зазоре наступает в случае, когда необходимый расход Q_1 превышает располагаемый расход жидкости Q_2 , т.е.

$$V_1 \pi R^2 > V_2 2\pi R \delta \quad (21)$$

или, учитывая (16) и (18),

$$\omega A \pi R^2 > \frac{1}{C_\mu} \frac{\Delta p \delta^2}{\mu R} 2\pi R \delta, \quad (22)$$

где πR^2 – площадь стенок капиллярного зазора, расстояние между которыми изменяется по закону (4);

$2\pi R \delta$ – площадь окна, через которое жидкость поступает извне в капиллярный зазор.

Введя обозначение

$$C_{k\mu} = \frac{C_\mu \omega A R^2 \mu}{2\delta^3 \Delta p}, \quad (23)$$

условие (22) можно переписать следующим образом

$$C_{k\mu} > 1 \text{ – кавитация наступает,} \quad (24)$$

$$C_{k\mu} \leq 1 \text{ – кавитация отсутствует,} \quad (25)$$

где $C_{k\mu}$ – число кавитации по вязкости.

Рассмотрим роль внешнего давления в создании скоростного напора рабочей жидкости при ее поступлении извне в капиллярный зазор. Как уже было сказано выше, максимальная относительная скорость движения стенок капиллярного зазора

$$V_1 = \omega A. \quad (26)$$

Максимальная скорость, с которой жидкость может поступать в капиллярный зазор извне, в этом случае является функцией ρ и Δp :

$$V_2 = f(\rho, \Delta p). \quad (27)$$

Предполагая, что функция (27) имеет степенной вид и, используя теорию размерностей, получим

$$V_2 = \frac{1}{C_v} \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}, \quad (28)$$

где C_v – безразмерный коэффициент, определяемый опытным путем.

Максимальный расход жидкости, необходимый для заполнения капиллярного зазора

$$Q_1 = V_1 \pi R^2. \quad (29)$$

Располагаемый расход жидкости

$$Q_2 = V_2 2\pi R \delta. \quad (30)$$

Кавитация в капиллярном зазоре наступает в случае, когда необходимый расход Q_1 превышает располагаемый расход Q_2 , т.е.

$$V_1 \pi R^2 > V_2 2\pi R \delta \quad (31)$$

или, учитывая (26) и (28)

$$\omega A \pi R^2 > \frac{1}{C_v} \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} 2\pi R \delta, \quad (32)$$

где πR^2 – площадь стенок капиллярного зазора, расстояние между которыми изменяется по закону (4);

$2\pi R \delta$ – площадь окна, через которое рабочая жидкость поступает извне в капиллярный зазор.

Введя обозначение

$$C_{kv} = \frac{C_v \omega A R}{2\delta} \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}}, \quad (33)$$

условия (32) можно переписать следующим образом

$$C_{kv} > 1 \text{ – кавитация наступает,} \quad (34)$$

$$C_{kv} \leq 1 \text{ – кавитация отсутствует,} \quad (35)$$

где C_{kv} – число кавитации по скорости.

Таким образом, с использованием теории размерностей получены формулы для трех чисел кавитации:

$$\text{по ускорению} \quad C_{ka} = \frac{C_a \omega^2 A R^2 \rho}{2\Delta p \delta}, \quad (36)$$

$$\text{по вязкости} \quad C_{k\mu} = \frac{C_{\mu}\omega AR^2\mu}{2\Delta p\delta^3}, \quad (37)$$

$$\text{по скорости} \quad C_{kv} = \frac{C_v\omega AR}{2\delta} \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}}. \quad (38)$$

Факторы, оказывающие влияние на появление и развитие кавитации, действуют одновременно, однако вклад каждого из них зависит от характера протекания процесса.

3. Выражение чисел кавитации через основные гидродинамические критерии

Капиллярный зазор расположен горизонтально и невелик по своей толщине, поэтому массовыми силами F можно пренебречь. Примем, что центр симметрии движения жидкости находится в геометрическом центре капиллярного зазора. Следовательно, в уравнениях Навье – Стокса, записанных в цилиндрических координатах, движения по координатам z и φ отсутствуют, а уравнение движения по координате r для несжимаемой жидкости запишется следующим образом [4]:

$$\frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} - \frac{V_r}{r^2} \right). \quad (39)$$

Запишем уравнение (39) в безразмерном виде. Для этого в качестве масштаба длины по координате r выберем радиус поверхности R , образующей капиллярный зазор, по координате z – толщину капиллярного зазора δ , масштаба скорости по координате r $\omega AR/2\delta$ (максимальную скорость по координате r), масштаба времени $T_p = 1/\omega = T/2\pi$ (T – период колебаний). Тогда получим следующие уравнения

$$z = \delta \bar{z}; \quad r = R \bar{r}; \quad V_r = \frac{\omega AR}{2\delta} \bar{V}_r; \quad t = \frac{1}{\omega} \bar{t} = \frac{T}{2\pi} \bar{t}; \quad p = \Delta p \bar{p}, \quad (40)$$

где безразмерные величины обозначены теми же буквами, что и размерные, но с чертой.

Подставив выражения (40) в уравнение (39) и умножив последнее на $(2\delta/\omega AR)^2 R$, получим

$$\frac{R\omega}{\omega AR} \frac{\partial \bar{V}_r}{\partial \bar{t}} + \bar{V}_r \frac{\partial \bar{V}_r}{\partial \bar{r}} = - \frac{\Delta p}{\rho \left(\frac{\omega AR}{2\delta}\right)^2} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{r}} + \frac{\nu}{\frac{\omega AR}{2\delta} \delta} \left[\frac{\delta}{R} \left(\frac{\partial^2 \bar{V}_r}{\partial \bar{r}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial \bar{V}_r}{\partial \bar{r}} - \frac{\bar{V}_r}{\bar{r}^2} \right) + \frac{R}{\delta} \frac{\partial^2 \bar{V}_r}{\partial \bar{z}^2} \right]. \quad (41)$$

Заметим, что

$$\begin{aligned} \frac{R\omega}{\omega AR} \frac{\partial \bar{V}_r}{\partial \bar{t}} + \bar{V}_r \frac{\partial \bar{V}_r}{\partial \bar{r}} &= Sh \text{ — число Струхалия} \\ \frac{\Delta p}{\rho \left(\frac{\omega AR}{2\delta}\right)^2} &= Eu \text{ — число Эйлера} \\ \left(\frac{\nu}{\frac{\omega AR}{2\delta} \delta} \right)^{-1} &= Re \text{ — число Рейнольдса.} \end{aligned}$$

Разделим уравнение (41) на число Эйлера Eu и перепишем в следующем виде

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{r}} = - \frac{Sh}{Eu} \frac{\partial \bar{V}_r}{\partial \bar{t}} - \frac{\bar{V}_r}{Eu} \frac{\partial \bar{V}_r}{\partial \bar{r}} + \frac{1}{Re \cdot Eu} \left[\frac{\delta}{R} \left(\frac{\partial^2 \bar{V}_r}{\partial \bar{r}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial \bar{V}_r}{\partial \bar{r}} - \frac{\bar{V}_r}{\bar{r}^2} \right) + \frac{R}{\delta} \frac{\partial^2 \bar{V}_r}{\partial \bar{z}^2} \right]. \quad (42)$$

Сравним коэффициенты при частных производных в уравнении (42) с соответствующими числами кавитации (36), (37) и (38):

$$C_{ka} = C_a \frac{Sh}{Eu}; \quad (43)$$

$$C_{k\mu} = C_\mu \frac{R}{\delta} \frac{1}{Re \cdot Eu}; \quad (44)$$

$$C_{kv} = \frac{C_v}{\sqrt{Eu}}. \quad (45)$$

Подставляя (43), (44) и (45) в (42), получим

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{r}} = - \frac{C_{ka}}{C_a} \frac{\partial \bar{V}_r}{\partial \bar{t}} - \frac{C_{kv}^2}{C_v^2} \bar{V}_r \frac{\partial \bar{V}_r}{\partial \bar{r}} + \frac{C_{k\mu}}{C_\mu} \left(\frac{\partial^2 \bar{V}_r}{\partial \bar{r}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial \bar{V}_r}{\partial \bar{r}} - \frac{\bar{V}_r}{\bar{r}^2} + \frac{R^2}{\delta^2} \frac{\partial^2 \bar{V}_r}{\partial \bar{z}^2} \right). \quad (46)$$

Таким образом, полученные ранее числа кавитации (36), (37) и (38) являются в соответствующих степенях коэффициентами уравнения движения (42).

4. Выражение постоянных коэффициентов через критические

значения основных гидродинамических критериев

При гармоническом законе изменения зазора (рис.1) расстояние между элементами, образующими зазор, их относительная скорость и ускорение определяются, как было показано выше, следующим образом:

$$x(t) = \delta + A \sin(\omega t + \varphi), \quad (47)$$

$$V(t) = \omega A \cos(\omega t + \varphi), \quad (48)$$

$$a(t) = -\omega^2 A \sin(\omega t + \varphi). \quad (49)$$

В моменты времени, определяемые условием

$$\omega t + \varphi = 3\pi/2 + 2\pi n, \quad (50)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$,

относительная скорость элементов, образующих зазор, равна нулю, а ускорение дна ультразвуковой ванны (рис.1) направлено вниз, поэтому факт появления кавитации определяется числом C_{ka} , критическое значение которого

$$C_{ka} = 1. \quad (51)$$

Выражение (43) при этом приобретает вид:

$$1 = C_a \left(\frac{Sh}{Eu} \right)_{кр}, \quad (52)$$

откуда

$$C_a = \left(\frac{Eu}{Sh} \right)_{кр}. \quad (53)$$

Таким образом,

$$C_{ka} = \frac{Sh}{Eu} \left(\frac{Eu}{Sh} \right)_{кр} \quad (54)$$

В моменты времени, определяемые условием

$$\omega t + \varphi = 2\pi n, \quad (55)$$

где $n=1, 2, 3, \dots$,

относительное ускорение элементов, образующих зазор, равно нулю, а скорость дна ультразвуковой ванны направлена вниз (рис.1), поэтому факт появления кавитации определяется числами C_{kv} и $C_{k\mu}$, критические значения которых

$$C_{k\mu} = 1 \quad (56)$$

и

$$C_{kv} = 1. \quad (57)$$

При этом, отличительными определяющими факторами для числа $C_{k\mu}$ является вязкость жидкости μ , а для числа C_{kv} – плотность жидкости ρ , и выражения (44) и (45) приобретают вид

$$1 = C_{\mu} \frac{R}{\delta} \left(\frac{1}{ReEu} \right)_{кр} \quad (58)$$

и

$$1 = C_v \left(\frac{1}{\sqrt{Eu}} \right)_{кр}, \quad (59)$$

откуда

$$C_{\mu} = \frac{\delta}{R} (ReEu)_{кр} \quad (60)$$

и

$$C_v = \sqrt{Eu}_{кр}. \quad (61)$$

Подставляя (60) и (61) в (44) и (45), получим с учетом (54) выражения чисел кавитации через критические значения основных гидродинамических критериев

$$C_{ka} = \frac{Sh}{Eu} \left(\frac{Eu}{Sh} \right)_{кр}, \quad (62)$$

$$C_{k\mu} = \frac{(ReEu)_{кр}}{ReEu}, \quad (63)$$

$$C_{kv} = \frac{\sqrt{Eu}_{кр}}{\sqrt{Eu}}. \quad (64)$$

5. Математическая формулировка условий возникновения кавитации в зазоре

При проектировании аксиально-поршневых гидромашин следует учитывать влияние всех трех чисел кавитации C_{ka} , $C_{k\mu}$ и C_{kv} на сам факт возникновения кавитации в зазоре, образованном контактирующими поверхностями деталей.

Из выражений (36), (37) и (38) для чисел кавитации следует, что перепады давлений, необходимые для преодоления сил инерции, сил вязкости и для создания

достаточного скоростного напора равны соответственно

$$\Delta p_a = C_{ka} \Delta p, \quad (65)$$

$$\Delta p_\mu = C_{k\mu} \Delta p, \quad (66)$$

$$\Delta p_v = C_{kv}^2 \Delta p. \quad (67)$$

Величины перепадов давлений, необходимые для преодоления сил инерции, сил вязкости и для создания достаточного скоростного напора изменяются со временем по гармоническому закону, причем величина $\Delta p_a(t)$ сдвинута по фазе на $\pi/2$ относительно величин $\Delta p_\mu(t)$ и $\Delta p_v(t)$ и

$$\Delta p_a(t) = -\Delta p_a \sin(\omega t + \varphi) \quad (68)$$

$$\Delta p_\mu(t) = \Delta p_\mu \cos(\omega t + \varphi), \quad (69)$$

$$\Delta p_v(t) = \pm \Delta p_v \cos^2(\omega t + \varphi). \quad (70)$$

Подставив выражения для перепадов давлений Δp_a , Δp_μ и Δp_v из (65), (66) и (67) в формулы (68), (69) и (70), получим:

$$\Delta p_a(t) = -C_{ka} \Delta p \sin(\omega t + \varphi), \quad (71)$$

$$\Delta p_\mu(t) = C_{k\mu} \Delta p \cos(\omega t + \varphi), \quad (72)$$

$$\Delta p_v(t) = \pm C_{kv}^2 \Delta p \cos^2(\omega t + \varphi). \quad (73)$$

Разделив обе части уравнений (71), (72) и (73) на величину Δp , получим изменяющиеся по времени относительные перепады давлений:

$$\Delta \bar{p}_a(t) = -C_{ka} \sin(\omega t + \varphi), \quad (74)$$

$$\Delta \bar{p}_\mu(t) = C_{k\mu} \cos(\omega t + \varphi), \quad (75)$$

$$\Delta \bar{p}_v(t) = \pm C_{kv}^2 \cos^2(\omega t + \varphi). \quad (76)$$

Для того чтобы однозначно учесть направление скорости, уравнение (76) перепишем в виде

$$\Delta \bar{p}_v(t) = C_{kv}^2 \cos(\omega t + \varphi) |\cos(\omega t + \varphi)| \quad (77)$$

Суммарный изменяющийся по времени перепад давлений, необходимый для одновременного преодоления сил инерции, сил вязкости и создания достаточного скоростного напора равен

$$\Delta \bar{p}_0(t) = \Delta \bar{p}_a(t) + \Delta \bar{p}_\mu(t) + \Delta \bar{p}_v(t). \quad (78)$$

Подставляя в (78) полученные значения для $\Delta\bar{p}_a(t)$, $\Delta\bar{p}_\mu(t)$ и $\Delta\bar{p}_v(t)$ из (74), (75) и (77), получим

$$\Delta\bar{p}_0(t) = -C_{ka} \sin(\omega t + \varphi) + C_{k\mu} \cos(\omega t + \varphi) + C_{kv}^2 \cos(\omega t + \varphi) |\cos(\omega t + \varphi)|. \quad (79)$$

Кавитация в зазоре возникает в те промежутки времени, когда

$$\Delta\bar{p}_0(t) > 1. \quad (80)$$

В результате проведенных исследований дана математическая формулировка условий возникновения кавитации в зазорах элементов конструкций аксиально-поршневых гидромашин с учетом вязкости жидкости и ускорения элементов конструкций.

Учет трех причин возникновения кавитации позволяет определить предельные частоты и амплитуды вибраций элементов конструкций, образующих зазор, и произвести необходимые расчеты на стадии проектирования гидромашин.

«Библиографический список»

1. Левковский Ю.Л. Динамика сферической кавитационной каверны. – Труды акустического института АН СССР, вып. VI, – М., 1969.
2. Кортнев А.А., Макаров В.К., Кортнев А.В. О распределении пузырьков при ультразвуковой кавитации. – Труды акустического института АН СССР, вып. VI. – М., 1969.
3. Л.И. Седов. Механика сплошной среды, т. II, М., "Наука". 1976.
4. Л.И. Седов. Механика сплошной среды, т. I, М., "Наука". 1976.

Сведения об авторах

Матвеевко Александр Макарович, профессор, Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н., профессор, академик РАН.

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, тел. (499) 158-44-56.

Чаплыгин Владимир Яковлевич, старший научный сотрудник Московского авиационного института (национального исследовательского университета) тел.: 523-77-70.

