

АНАЛИЗ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ НА КАВИТАЦИОННЫХ РЕЖИМАХ В ПЕРВЫХ СТУПЕНЯХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

ANALYSIS OF PRESSURE PULSATIONS UNDER CAVITATION CONDITIONS IN THE FIRST STAGES OF CENTRIFUGAL PUMPS

Приведен анализ пульсаций давления на кавитационных режимах в первых ступенях центробежных насосов. Целью данной статьи является обоснование выбора конструкции первой ступени центробежного насоса для повышения устойчивости ее работы при учете влияния низкочастотных кавитационных колебаний методом аналитического исследования имеющихся результатов физических экспериментов. В результате исследований рассмотрены три варианта конструкции первой ступени: центробежное колесо, шнекоцентробежная ступень с предвключенным колесом (тип профиля пластина) и шнекоцентробежная ступень с предвключенным колесом (тип профиля дужка круга с выступом), в которых проводился замер пульсаций давления на кавитационных режимах. При этом рассмотрены аспекты влияния на осциллограмму пульсаций давления выбор режима по подаче, а также характер изменения осциллограммы пульсаций давления при изменении значения кавитационного запаса NPSH. В выводах приведен обоснованный выбор использования каждого из вышеперечисленных вариантов конструкций первой ступени центробежного насоса с учетом влияния низкочастотных кавитационных пульсаций давления.

Ключевые слова: центробежный насос, первая ступень, кавитационный режим, пульсации.

Введение

Одна из особенностей центробежных насосов, спроектированных для условий работы при сравнительно низком входном давлении — их склонность к возникновению особого вида неустойчивости — низкочастотным кавитационным колебаниям давления [1]. Как известно, это один из наиболее сложных и малоизученных разделов теории лопастных машин.

Модель явления неустойчивости в системах, включающих шнекоцентробежную ступень, основывается на экспериментальном факте существования кавитационных каверн на входе и в межлопастных каналах предвключенного колеса, которые не оказывают заметного влияния на напорную характеристику насоса. Но в тех случаях, когда режимы кавитационных колебаний совпадают с эксплуатационными режимами насоса, создаётся серьёзная угроза для надёжности конструкции насоса и всей гидравлической системы. Имеется достаточное количество данных [3, 4, 5], свидетельствующих о том, что к выбору конструктивных параметров первой ступени центробежного насоса необходимо подходить не только с точки зрения обеспечения высоких кавитационных качеств, но и с точки зрения устойчивости системы к кавитационным колебаниям давления. Эти явления проявляются в большей степени на частичных подачах. По нашему мнению и мнению многих исследователей

[6, 7, 8], неустойчивость является следствием наличия обратных течений на входе в центробежную или шнекоцентробежную ступень.

Целью данной статьи является обоснование выбора конструкции первой ступени центробежного насоса для повышения устойчивости ее работы при учете влияния низкочастотных кавитационных колебаний.

Результаты исследования

Оценка устойчивости работы первой ступени центробежного насоса традиционно производится на основании осциллограмм давления, получаемых на входе и выходе ступени, или в одном из этих мест.

Для диагностики первых ступеней специализации ВНИИАЭН измерения производились на входе в центробежную и шнекоцентробежную ступени непосредственно перед центробежным или предвключенным осевым колесом.

Датчик давления выбирался в соответствии с максимальной величиной измеряемого давления P_{\max} , которое должно лежать в пределах:

$$P_k \leq P_{\max} \leq 2 P_k,$$

где P_k — контрольное давление (из паспорта датчика).

Погрешность тракта для измерения и анализа пульсаций давления не превышала 20%. Частотный диапазон охватывал 0—100 Гц.

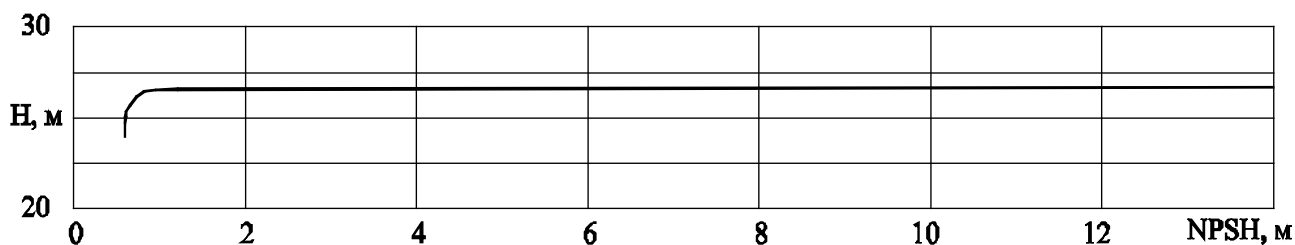


Рисунок 1 — Частная кавитационная характеристика шнекоцентробежной ступени с предвключенным колесом традиционной конструкции (тип профиля лопасти — пластина) на номинальной подаче $Q_{ном} = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$

Измерения пульсаций давления проводились на холодной воде параллельно со снятием частных кавитационных характеристик в широком диапазоне подач и кавитационного запаса (NPSH) при $n = 1500 \text{ об/мин}$, начиная от избыточного давления и вплоть до глубокого вакуума. На рисунках 1, 2 показаны частная кавитационная характеристика шнекоцентробежной ступени с предвключенным колесом традиционной конструкции (тип профиля лопасти—пластина) и серия осциллограмм пульсаций входного давления на номинальной подаче $Q_{ном} = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$.

Сопоставление осциллограмм с кавитационной характеристикой ступени наглядно показывает следующие особенности:

- низкочастотные пульсации давления не возникают как в области режимов, соответствующим большому кавитационным запасам ($NPSH = 13,2 \text{ м}$), так и на режимах, близких к кавитационному срыву;

- низкочастотные пульсации давления соответствуют режимам работы ступени, при которых отсутствует заметное падение напора на кавитационной характеристике насоса;

- в пределах устойчивой работы пульсации давления имеют гармонический характер с преобладающей обратной частотой 50 Гц ($NPSH = 13 \text{ м}$);

- в области сильно развитых пульсаций давления форма колебаний входного давления приобретает вид следующих друг за другом гидроударов с преобладающей частотой $f = 1,5\text{--}4 \text{ Гц}$, что свидетельствует о том, что периодически происходит полное схлопывание кавитационных каверн в насосе ($NPSH = 1,15 \text{ м}$);

- непосредственно после гидроудара наблюдается сравнительно быстрое (по сравнению с периодом колебаний) падение давления. Возникшее таким образом давление сохраняется постоянным, вплоть до следующего гидроудара. Подобные пульсации давления известны и



Рисунок 2 — Серия осциллограмм пульсаций входного давления на номинальной подаче $Q_{ном} = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$ в шнекоцентробежной ступени с предвключенным колесом традиционной конструкции

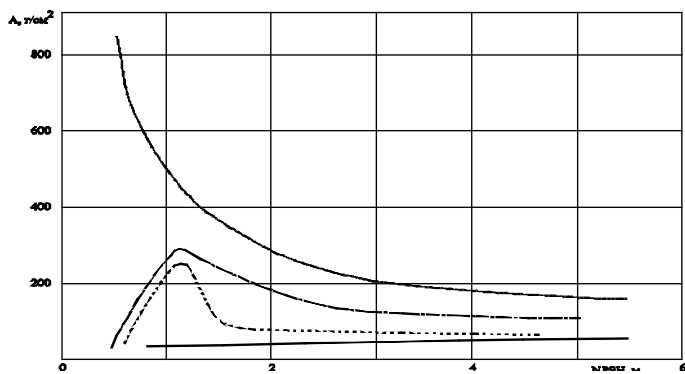


Рисунок 3 – Експериментальна залежність амплитуди коливань від кавітаційного запасу при $n=1500$ об/мин в шнекоцентробежній ступені:

- $Q = 0,06 \text{ см}^3/\text{с}$
- - - $Q = 0,05 \text{ см}^3/\text{с}$
- · - · $Q = 0,04 \text{ см}^3/\text{с}$
- $Q = 0,02 \text{ см}^3/\text{с}$

носять називання разрывных кавітаційних автоколивань [2]. Уменьшення подачі приводить до розширенню по NPSH зони низкочастотних пульсацій тиску.

Степень інтенсивності пульсацій можна оцінити величиною амплитуди пульсацій тиску. На рисунку 3 показано експериментальна залежність амплитуди пульсацій тиску від кавітаційного запасу і подачі ступені, визначена по осцилограммам.

Из графиков видно, что в зависимости от этих двух факторов в шнекоцентробежній ступені можуть

отсутствовать или возникать пульсации давления различной интенсивности.

В задачу данной работы не входило проводить исследования, направленные на решение вопроса о механизме возникновения низкочастотных пульсаций давлений. Однако анализ полученных данных позволил сделать выводы о том, что для каждой конкретной шнекоцентробежной ступени существует свой предел по кавітаційному запасу, до которого в системе не возникают низкочастотные пульсации давления, несмотря на протекание кавітації, а дальнейшее понижение давления на входе приводит к резкому переходу в зону неустойчивости (возникновению низкочастотных пульсаций тиску).

В качестве примера на рисунке 4 показаны осциллограммы давления для первых ступеней трёх конструкций: центробежной, шнекоцентробежной — это же центробежное колесо с предвключенным колесом (тип профиля лопасти–пластина) и шнекоцентробежной с предвключенным колесом (тип профиля — дужка круга с выступом на тыльной поверхности лопасти).

Внешне низкочастотные пульсации давления проявляются в виде усиления монотонного шума и вибрации, автоколебания — в виде мощных периодических толчков, вызывающих сотрясение насоса и трубопроводов.

Построенные по результатам обработки осциллограмм зависимости амплитуды пульсаций тиску и автоколебаний от режима работы по подаче позволяют отметить

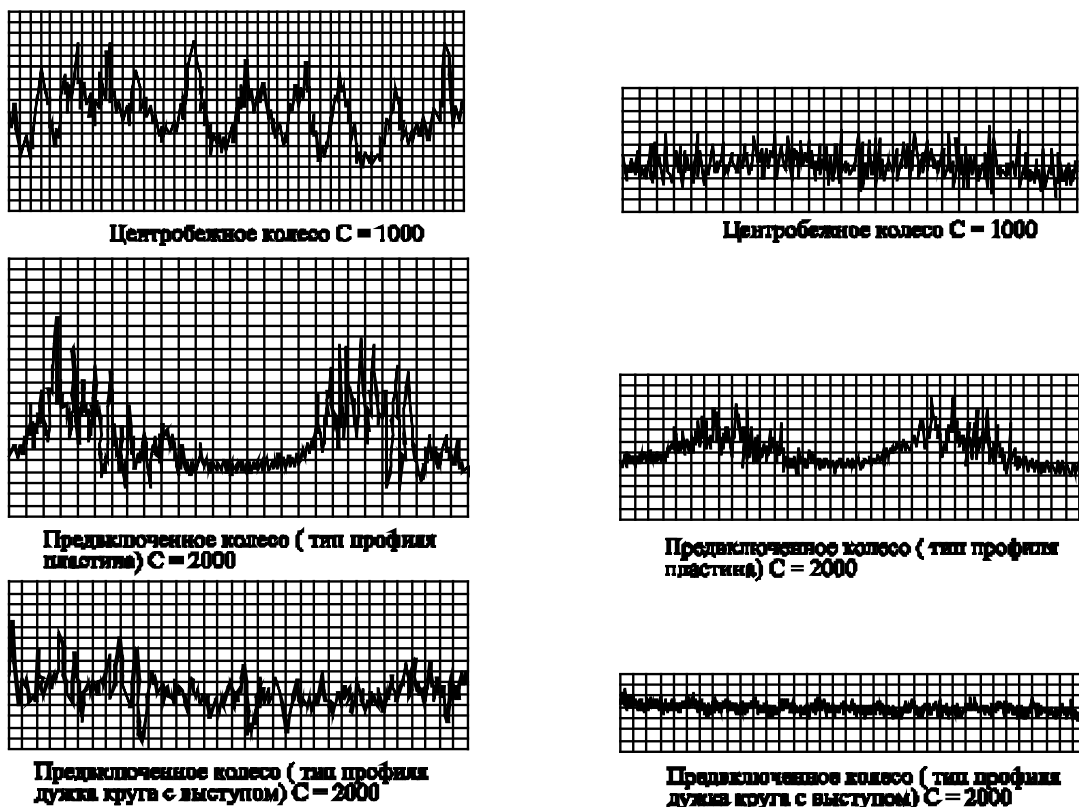


Рисунок 4 – Осцилограммы пульсаций тиску на входе в первые ступени центробежного насоса на разных режимах по подаче

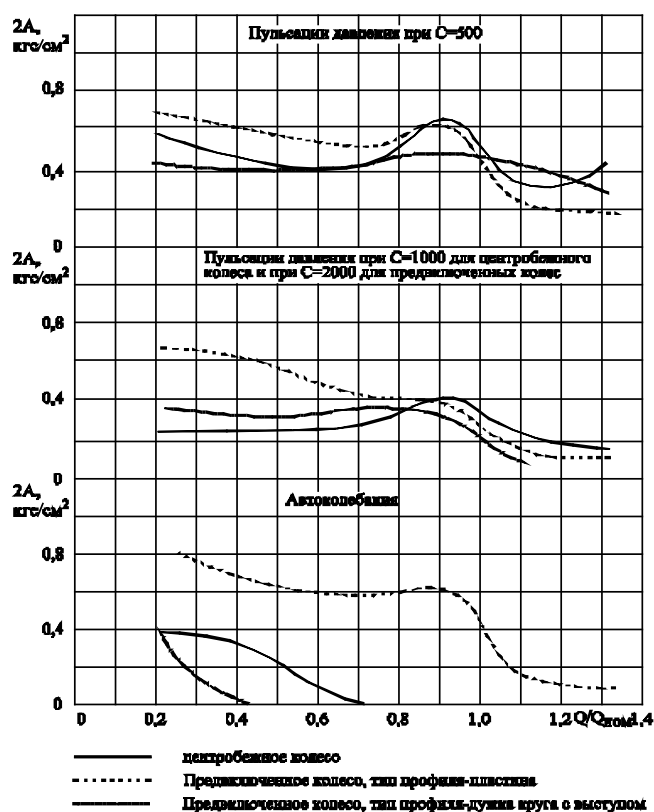


Рисунок 5 — Зависимость пульсаций давления и автоколебаний в первых ступенях центробежного насоса от режима работы по подаче

следующее: при избыточном давлении (кавитационный коэффициент быстроходности $C = 500$) для центробежного колеса и ступени с предвключенным колесом традиционной конструкции максимальная амплитуда имеет место при $Q \approx 0,9 Q_{\text{ном}}$. По мере увеличения подачи она быстро уменьшается и принимает минимальное значение, составляющее примерно 25 % от максимума при $Q \approx 0,9 Q_{\text{ном}}$. При уменьшении подачи амплитуда вначале несколько снижается, а затем монотонно возрастает. Для предвключенного колеса с выступом уровень пульсаций давления по всему диапазону подач более равномерный. В диапазоне подач $Q < 0,8 Q_{\text{ном}}$ он, в среднем, в 1,5 раза ниже, чем для предвключенных колес традиционной конструкции.

Что касается непосредственно вопроса устойчивости, то здесь в самом худшем положении ступени — с традиционной конструкцией предвключенных колес. Для них неустойчивость проявляется во всём диапазоне подач (рисунок 5). В предвключенном колесе с выступами неустойчивость была зафиксирована на режиме $Q = 0,2 Q_{\text{ном}}$. Во всём остальном диапазоне система работает устойчиво.

В результате проведенных исследований установлено, что предвключенное колесо с выступом на тыльной поверхности лопасти наряду со снижением кавитационного воздействия повышает устойчивость работы ступени центробежного насоса.

Чем же можно объяснить более высокую устойчивость работы предвключенных колес с выступами. Вероятнее всего это связано с тем, что наличие выступа уменьшает интенсивность обратных токов на входе в ступень.

Выводы

Граница возникновения низкочастотных пульсаций давления должна быть одним из критериев при выборе допускаемого значения кавитационного запаса первых ступеней центробежного насоса. Получено, что для предвключенных колес традиционной конструкции в основной части рабочего интервала насоса $Q = (0,4 \text{--} 1,2) Q_{\text{ном}}$ низкочастотные пульсации давления отсутствуют при значениях кавитационного коэффициента быстроходности $C < 1800$ для номинальной подачи. Эту границу и следует для них принимать в качестве допускаемой.

Для предвключенных колес с выступами в этом же диапазоне подач ограничения по этому критерию можно не накладывать. Они работают устойчиво вплоть до срыва. Накладывать ограничения на кавитационный коэффициент быстроходности C с точки зрения кавитационной эрозии нет смысла, поскольку область максимального её значения расположена в диапазоне $C = 1200 \text{--} 2000$, т. е. определяющими здесь являются критерии по автоколебаниям и форме зависимости $NPSH = f(Q)$.

Рекомендованные значения не следует принимать как окончательные для всех первых ступеней с аналогичными конструкциями предвключенных колес. В каждом конкретном случае учет влияния низкочастотных кавитационных пульсаций давления должен уточняться, исходя из особенностей конструкции первых ступеней центробежных насосов и их назначения.

Работы по снижению низкочастотных пульсаций давления в первых ступенях центробежных насосов специализации ВНИИАЭН продолжаются в направлении поиска нетрадиционных конструкций надроторных систем.

Литература

1. Пальченко, А.В. Влияние предвключённого колеса на пульсационные характеристики насоса. / А.В. Пальченко, Н.Л. Рынковенко // Лопастные насосы [под ред. Л.Л. Грянко и А.Н. Папира]. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1975. — С. 174—181.
2. Пилипенко, В.В. Кавитационные автоколебания и динамика гидросистем / В.В. Пилипенко, В.А. Задонцев, М.С. Натанзон. — М.: Машиностроение, 1977. — 352 с.
3. Аоки, А. Центробежный насос с предвключённым колесом // Technical Review / рус. пер. — 1976. — №7. — т.13.
4. Кнепфель, К.Д. Исследование влияния предвключённого рабочего колеса на работу центробежного конденсатного насоса / К.Д. Кнепфель, Х.Б. Маттиас // Proceedings of the 5th Conference on Fluid Machinery Budapest, Akad Kiado / рус. пер. — 1975. — № 1.
5. Сак, Н. Колебания в системе, вызванные кавитацией на шнековом насосе. / Н. Сак // Trans ASME. — серия Д / рус. пер. — 1965. — №4. — С. 84—93.
6. Аоки, А. Development of a New Type of Pump with Inducer / А. Аоки, N. Manase, H. Inazuka and others // Technical Review. — 1976. — v.13, № 1. — P. 11—18.

7. Шапиро А.С. Структура реального течения в центробежных и осевых насосах. // Монография. РИЦМГИУ. — 2004. — 279 с.

8. Ершов Н.С. Анализ процессов, происходящих в шнекоцентробежном насосе при наличии обратных токов на выходе из основного рабочего колеса // Лопастные насосы [под ред. Л.Л. Грянко и А.Н. Папира]. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1975. — С. 157—166.

References

1. Palchenko, A.V. Vliyaniye predvkluyuchonnogo koleasa na pulsatsyonnyye kharakteristiki nasosa / A.V. Palchenko, N.L. Runkovenko // Lopastnyye nasosy [pod red. L.L. Gryan-ko y A.N. Papira]. — L.: Mashynostroenye, Lenyng. otd-e, 1975. — S. 174—181.

2. Pylypenko, V.V. Kavytatsyonnyye avtokolebaniya y dynamyka hydrosystem / V.V. Pylypenko, V.A. Zadontsev, M.S. Natanzon. — M.: Mashynostroenye, 1977. — 352 s.

3. Aoki, A. Tsentrobezhnyi nasos s predvkluyuchionnym koleksom // Technical Revie, russkyi perevod. — 1976. — №7, t.13.

4. Knepfel, K.D. Issledovanye vliyaniya predvkluyuchion-nogo rabocheho koleasa na rabotu tsentrobezhnogo kondensat-nogo nasosa / K.D. Knepfel, Kh.B. Mattyas // Proceedings of the 5th Conference on Fluid Machinery Budapest, Akad Kiado /russkyi perevod. — 1975/ № 1.

5. Sak, N. Kolebaniya v sisteme, vyzvnynye kavytatsiyei na shnekovom nasose / N. Sak // Trans ASME. — seryia D / russkyi perevod. 1965. — №4. — S. 84—93.

6. Aoki, A. Development of a New Type of Pump with In-ducer / A. Aoki, N. Manase, H.Inazuka and others // Technical Review . — 1976. — v.13, № 1. — p. 11—18.

7. Shapyro, A.S. Struktura realnogo techeniya v tsentrobezhnykh y osevykh nasosakh // Monohrafiya. RYTsMHIYU. — 2004. — 279 s.

8. Ershov, N.S. Analiz protsessov, proyskhodiyashchykh v shnekotsentrobezhnom nasose pry nalychii obratnykh tokov na vykhode iz osnovnoho rabocheho koleasa // Lopastnyye nasosy [pod red. L.L. Hrianko y A.N. Papyra]. — L.: Mashynostro- enye, Lenynhr. otd-e, 1975. — S. 157—166.

Надійшла 20.09.2016 року

УДК 621.671

Аналіз пульсацій тиску на кавітаційних режимах у перших ступенях відцентрових насосів

В.А. Куценко,
П.Ю. Ткач

Наведено аналіз пульсацій тиску на кавітаційних режимах у перших ступенях відцентрових насосів. Метою даної статті є обґрунтування вибору конструкції першого

ступеня відцентрового насоса для підвищення стійкості його роботи при врахуванні впливу низькочастотних кавітаційних коливань методом аналітичного дослідження на-явних результатів фізичних експериментів. У результаті досліджень розглянуто три варіанти конструкції першого ступеня: відцентрове колесо, шнековідцентровий ступінь з передвключеним колесом (тип профілю пластина) і шнековідцентровий ступінь з передвключеним колесом (тип профілю дужка кола з виступом), в яких проводився вимір пульсацій тиску на кавітаційних режимах. При цьому розглянуто аспекти впливу на осцилограму пульсацій тиску вибору режиму за подачею, а також характер зміни осцилограми пульсацій тиску при зміні значення кавітаційного запасу NPSH. У висновках наведено обґрунтований вибір використання кожного з перерахованих вище варіантів конструкцій першого ступеня відцентрового насоса з урахуванням впливу низькочастотних кавітаційних пульсацій тиску.

Ключові слова: відцентровий насос, перший ступінь, кавітаційний режим, пульсації.

UDC 621.671

Analysis of pressure pulsations under cavitation conditions in the first stages of centrifugal pumps

V.A. Kutsenko,
P.Yu. Tkach

A broad overview of the analysis of pressure fluctuations on the cavitation conditions in the first stage centrifugal pumps is given. The purpose of this article to substantiate the choice of the first stage centrifugal pump design enhancing the stability of its work, taking into account the effect of low frequency oscillations of cavitation (by analytical studies of existing experimental results). The three construction options of the first step – centrifugal impeller, centrifugal impeller with inducer (profile type plate), and centrifugal impeller with inducer (profile type shackle with a projection range) in which the test is performed on the pressure pulsations of cavitation regimes – were examined during the studies. The influence on the pressure fluctuations oscillogram depending on the supply mode, as well as the characteristics of the pressure fluctuations oscillogram depending on the change in the NPSH cavitation margin. The reasonable choice of each of the the mentioned options of the centrifugal pump of the first stage designs due to the effects of low frequency cavitation pressure pulsations is given as the conclusion.

Keywords: centrifugal pump, the first stage, cavitation condition, pulsations.