

УДК 62-91

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДАЧИ ВОЗДУХА НА ВХОД В КОМБИНИРОВАННЫЙ НАСОСНЫЙ АГРЕГАТ

Гафуров С. А.,
Родионов Л. В.,
Блюмин К. В.

Самарский государственный
аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва
(национальный исследовательский
университет) (СГАУ)
443086, Россия, г. Самара,
Московское шоссе, 34
gafurov@ssau.ru

Исследовано влияние кавитации, вызванной подачей воздуха, на внешние акустические характеристики насосного агрегата. Предложен способ диагностирования кавитации в насосном агрегате по его внешнему акустическому полю. Ранее измерения интенсивности звука проводились на различных режимах работы насосного агрегата по его горизонтальной поверхности. Проведенные экспериментальные исследования позволили установить связь между пульсационными характеристиками насосного агрегата и его внешним акустическим полем.

Ключевые слова: насосные агрегаты, нерастворённый воздух, кавитация, эрозия, акустическая визуализация..

1 Введение

В высокопроизводительных авиационных и ракетных насосах возникновение кавитационных явлений неизбежно. Процесс возникновения и развития кавитации в топливных комбинированных насосных агрегатах имеет ряд особенностей, которые описаны в работах [1-3]. Кавитация приводит к повышенному уровню вибрации и шума.

Решение задачи о возникновении и развитии кавитации в авиационных насосах до сих пор является актуальной. Как известно эрозия, вызванная кавитацией, приводит к повышенному износу деталей. При этом в рабочей жидкости всегда присутствует растворённый и нерастворённый газ. Наличие газа интенсифицирует кавитацию и способствует возникновению эрозии. Исследование мест зарождения эрозии является трудоёмкой и сложной задачей. Поэтому актуальным является использование относительно простых средств диагностирования кавитационного состояния насосного агрегата.

С точки зрения обеспечения надёжности и ресурса насосных агрегатов в процессе эксплуатации, актуальным является использование простых и точных методик определения кавитационного состояния в них. При этом важной задачей является учёт взаимодействующей совокупности пульсаций рабочей среды, вибрации элементов системы и излучаемый ими шум. На сегодняшний момент существуют следующие экспериментальные методы:

1. Определение кавитационного запаса на входе в насосный агрегат. Не допускается

его падение более чем на 3 % при постоянном расходе [4].

2. Визуализация течения потока в межлопаточных каналах насоса при использовании прозрачных корпусов и стробоскопов.

3. Определение мест эрозии и возникновения кавитации с помощью окрашивания поверхностей деталей.

4. Измерение статического давления в центре потока или около его стенки.

5. Метод, основывающийся на ультразвуковом измерении [5].

6. Измерение вибрации насоса в предполагаемых местах схлопывания кавитационных пузырьков.

7. Измерение звукового давления в акустическом поле [6]. Акустический метод позволяет определить источник шума, возникающий при развитии кавитации.

Локализация источников шума на кавитационных режимах работы насоса представляет значительный интерес для инженеров. Существует целый ряд диагностических инструментов для достижения указанной цели, однако все они дорогостоящие.

Существует четыре основных способа локализации источника шума:

- акустическая голография ближнего поля (nearfield acoustic holography (NAH));
- статистически оптимизированная акустическая голография ближнего поля (statistically optimized nearfield acoustic holography (SONAH));
- техника формирования луча (beamforming (BF));
- метод интенсивности (direct acoustic intensity measurement).

В целом акустические методы имеют ряд преимуществ:

1. Определение наличия кавитации в реальных условиях работы насосного агрегата.
2. Нет необходимости в создании экспериментального стенда.
3. Нет необходимости в установке дополнительных датчиков и изменении конструкции насосного агрегата.
4. Они достаточно просты, не требуют специальных знаний у людей, эксплуатирующих агрегат.

Использование акустических методов для диагностирования кавитации обусловлено тем, что шум при гидродинамической кавитации представляет собой совокупность выбросов давления, которые обусловлены схлопыванием каверн, образующихся в вихрях за телом, обтекаемым потоком [7]. При этом, когда длина волны значительно больше размеров пузырьков, можно рассматривать жидкость с пузырьками как некую новую среду с новыми усреднёнными параметрами, в первую очередь с значительно большей сжимаемостью. Естественно, что излучение звука в такую среду будет иным по сравнению с излучением в исходную жидкость.

Сложность теоретического исследования звукового излучения при кавитации определяется тем, что излучение шума кавитационной областью является результатом взаимодействия большого количества отдельных кавитационных пузырьков. При этом, как отмечается в работе [8] рассмотрение кавитационной области как совокупности кавитационных полостей, распределённых в некоторой области жидкости, представляет собой трудную задачу, как в экспериментальном, так и в теоретическом плане.

В связи с этим при исследовании кавитационного шума особое значение имеет эксперимент, правильная постановка которого невозможна без знания законов моделирования изучаемого явления.

2 Обзор работ, посвященных экспериментальным исследованиям кавитационных процессов в насосах

В работе [1] на основе экспериментально-го исследования пульсационного состояния

шестерённого насоса и его внешнего акустического поля при наличии кавитации разработаны диагностические признаки кавитации. Они заключаются в изменении амплитуд основных зубцовых гармоник. В спектрах пульсаций на входе изменяется соотношение первой и второй зубцовых гармоник в зависимости от давления на входе. Характерным признаком частичной кавитации является значительное увеличение (в 3...4 раза) амплитуды второй зубцовой гармоники относительно амплитуды первой зубцовой гармоники. Признаком развитой кавитации является значительное снижение (на порядок) амплитуд пульсаций давления на входе в насос.

В работе [9] с помощью высокоскоростной видеосъёмки исследовано возникновение и развитие кавитационной области, размеры которой меньше длины волны, и показано, что интервал нестационарного развития кавитационной области составляет около десяти периодов звукового поля.

В работе [10] проведены экспериментальные визуальные исследования насосного агрегата, работающего на жидком азоте. Для этого впервые в мире разработана экспериментальная установка, позволяющая проводить визуальные исследования течения криогенных жидкостей в насосных агрегатах.

Fanelli [11] и Li [12] провели экспериментальные исследования кавитационного шума и создали численный алгоритм для его изучения.

Mirko Chudina [6, 13, 14] обнаружил, что кавитационный шум носит дискретный характер, который в значительной степени зависит от степени развития кавитации.

Rus [15] одновременно измерял вибрацию и шум в осевой гидравлической турбине, состоящей из двух лопаток.

Su Yongsheng [16] определил зарождение кавитации путём сопоставления измеряемых сигналов пульсаций вибрации и давления на номинальном режиме и режиме с кавитации.

Liu Yuan [17] также определил зарождение кавитации в центробежном насосе путём сопоставления сигналов при замере вибрации и пульсаций давления в условиях наличия кавитации и при её отсутствии.

Pu Zhongqi [18] представил метод определения наличия кавитации в гидротурбине, который базируется на вейвлет анализе.

В работе [19] проведено экспериментальное исследование кавитационного шума и вибрации, возникающих при работе центробежного насоса.

В работе [20] обсуждаются особенности спектров кавитационного шума и влияния на их форму различных параметров акустической кавитации.

В работе [1] проведенные экспериментальные исследования позволили установить тесную связь между кавитационными, пульсационными характеристиками и внешними акустическими полями. С помощью метода акустической интенсивности исследовано акустическое поле комбинированного насосного агрегата.

Таким образом, в последнее десятилетие опубликовано значительное число работ, направленных на изучение шума и вибраций, вызванных возникновением и развитием кавитационных явлений, но все они в основном направлены на регистрацию возникновения кавитации. Однако в литературе не так много работ, посвященных изучению кавитационного шума и вибраций, возникающих при различных типах кавитации.

3 Экспериментальные исследования

В данной работе были проведены экспериментальные исследования акустического поля, создаваемого насосным агрегатом на нескольких режимах его работы (таблица 1). Измерения выполнялись с помощью акустической камеры фирмы Norsonic [21].

Таблица 1. Исследуемые режимы работы насосного агрегата

| Режим | Штатный режим | Режим с кавитацией |
|----------------------------|-----------------------|--------------------|
| Давление на входе в ШС, Па | $2,0 \cdot 10^5$ | $0,18 \cdot 10^5$ |
| п, об/мин | 500, 1000, 1500, 2000 | |
| $K_{КАВ}$ | 9,08 | 3,46 |

Кавитационное состояние насоса определяется числом кавитации

$$K = \frac{P_{in} - P_{vap}}{\rho \cdot V^2 / 2} \quad (1)$$

где P_{in}, P_{vap} - давление на входе в ШС и насыщенных паров соответственно; V - скорость вращения шестерён; ρ - плотность керосина.

Наличие кавитации в насосе диагностировалось по спектрам пульсаций давления и визуальным способом с использованием оптической проставки на входе в насос [1].

Для оценки влияния кавитационных процессов на шум насоса исследованы акустические поля агрегата на штатном и кавитационном режиме. На графиках (рисунки 1 и 3) представлены уровни звукового давления для штатного режима и режима кавитации (рисунки 2 и 4). При анализе особое внимание уделялось частотам соответствующим первой и второй зубцовым гармоникам насосного агрегата.

Из сравнения графиков на рисунках 1 и 2 видно, что при наличии кавитации на расчётном режиме работы уровень звукового давления значительно вырос. Аналогичная картина наблюдается на расчётном режиме работы насоса (рисунки 3 и 4). При работе насоса на режиме с кавитацией в жидкости существует два источника шума: пульсации давления (пульсации скорости) в потоке и пульсации концентрации кавитационных полостей, что подтверждается теоретическими результатами работ [23]. Таким образом, кавитация приводит к появлению дополнительных источников шума по сравнению с обычными гидродинамическими пульсациями давления. При этом кавитационный шум носит дискретный характер, который в значительной степени зависит от степени развития кавитации.

Звуковое давление кавитационного шума можно выразить в виде [24]:

$$F_N(t) = \sum_{k=1}^N \sum_{l=-\infty}^{\infty} \varphi(t - lT_0, \varepsilon_k, \nu_l), \quad (2)$$

где $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$; $\varphi(t, \varepsilon_k, \nu_l)$ - функция, характеризующая форму элементарного сигнала k -й полости в l -й период звуковой волны; ε_k - случайная величина, определяющая в фиксированный момент времени параметры сигналов кавитационных полостей в зависи-

мости от их номера k ; V_i - случайная величина, определяющая флуктуации параметров сигнала k -й полости во времени.

Уравнение (2) отражает механизм поведения совокупности кавитационных полостей.

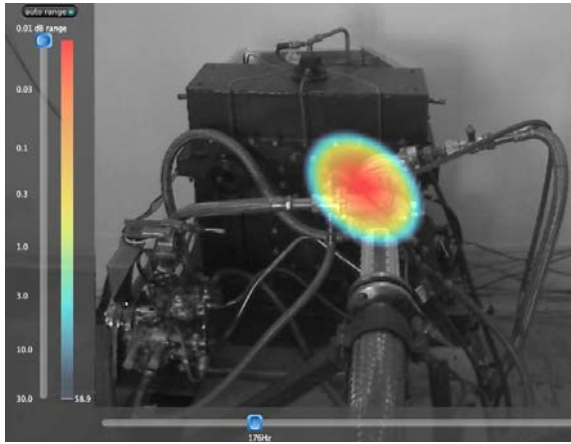


Рисунок 1. Уровень звукового давления на штатном режиме ($n=500$ об/мин)

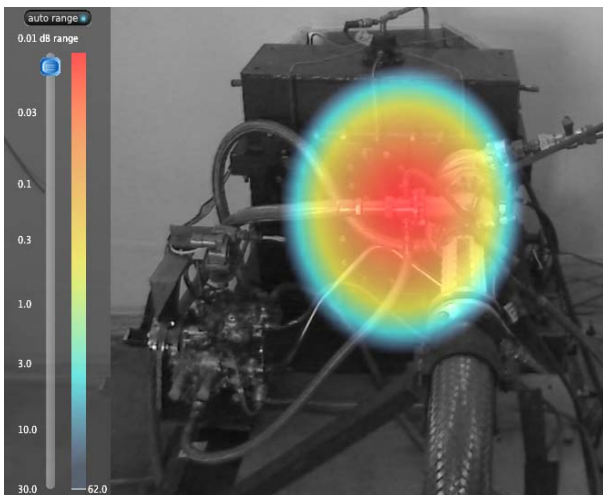


Рисунок 2. Уровень звукового давления на режим кавитации ($n=500$ об/мин).

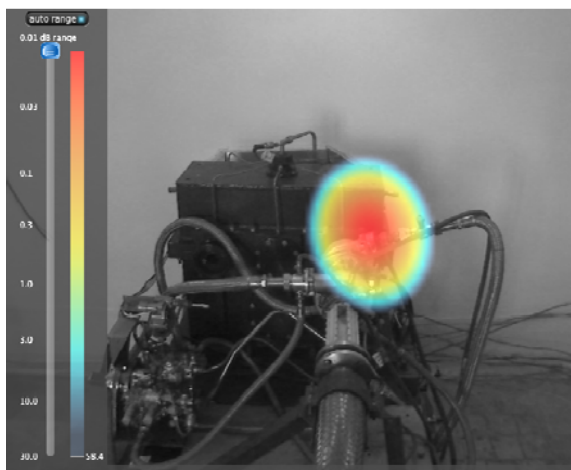


Рисунок 3. Уровень звукового давления на штатном режиме ($n=1500$ об/мин).

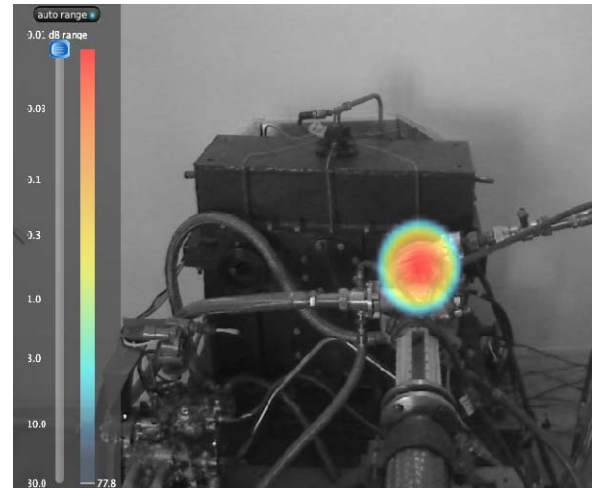


Рисунок 4. Уровень звукового давления на режим кавитации ($n=1500$ об/мин)

В результате исследований установлено, что по акустическому состоянию насоса можно оценивать наличие кавитационных процессов. Наиболее «информативными» являются 1-я и 2-я дискретные гармоники измеренного шума.

Форма огибающей частотного спектра зависит от типа кавитации. При паровой кавитации спектральная плотность мощности на низких частотах является практически постоянной, а на высоких частотах спадает по закону $\frac{1}{\omega^2}$. Переходная область определяется частотой $\omega = \gamma$, где γ - постоянная затухания кавитационного выброса.

При газовой кавитации в спектре имеется характерный максимум, положение которого соответствует резонансной частоте f_0 газовых пузырьков и зависит от скорости потока. Эту частоту можно приблизительно оценить с помощью выражения [24]: $f_0 = \frac{1}{R}$, где R радиус кавитационной каверны.

4 Заключение и обсуждение

Проведенные исследования показали возможность использования метода Beamforming для акустической диагностики наличия кавитации в насосном агрегате. Данный метод менее трудоёмкий по сравнению с методом интенсивности, который обычно ис-

пользуется для решения подобных задач [14].

В отличие от методов NAH и SONAH, метод формирования луча (beamforming) применим в дальнем акустическом поле и он более точен при измерении высоких частот. Частотный диапазон и расстояние от микрофонной решетки до источника шума зависит от типа микрофонной решетки и числа микрофонов.

Недостатком метода формирования луча является плохое "разрешение", особенно в диапазоне малых частот. Наибольшее расстояние микрофонной решетки D , и расстояние до источника L , определяет "разрешение" (или точность с которой источник может быть локализован): $Re s = 1.22 \frac{L}{D} \lambda$.

Для получения приемлемых результатов, микрофонная решётка должна располагаться на существенном расстоянии от источника и располагаться под углом не более 30 градусов, чтобы покрывать весь источник. В общем случае, расстояние от микрофонной решётки до источника шума должно быть не менее диаметра самой решётки, но и не более, если такое возможно. Значительным преимуществом метода формирования луча является возможность локализации источника шума в движущихся объектах.

Преимуществом метода интенсиметрии является относительно большой динамический диапазон измерений (разница между максимальной и минимальной измеренной интенсивностью в дБ). Он составляет от 30 дБ до 60 дБ при этом для метода NAH and SONAH эта величина около 20 дБ. Динамический диапазон для метода формирования луча варьируется от 6 дБ до 15 дБ.

Другим преимуществом метода интенсиметрии является широкий частотный диапазон (20...20 кГц) в сравнении с методом формирования луча (250...10 кГц), но указанный частотный диапазон достаточен для акустической диагностики комбинированных насосов.

Метод интенсиметрии имеет определенные недостатки из-за реактивной составляющей при измерениях близко к поверхности шумящего объекта.

Работа выполнена при государственной

поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации мероприятий Программы повышения конкурентоспособности СГАУ среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013-2020 годы

Список использованных источников

- [1] Гаспаров, М. С. Гидродинамика и виброакустика комбинированных насосных агрегатов [Текст] // М.С. Гаспаров, А.Н. Крючков, Е.В. Шахматов, В.П. Шорин. – Самара: СГАУ, 2006. – 86 с.
- [2] Prokofiev, A., Makariyants, G., Shakhmatov, E. (2010) Modeling of pipeline vibration under the pressure ripples in the working fluid, *Proceedings of the 17th International Congress on Sound and Vibration*, Cairo, Egypt, 18 – 22 July.
- [3] Shakhmatov, E.V. (2012) Ed. *Complex solution of mechanical and aerospace engineering vibroacoustics problems*, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&CO.KG, 81.
- [4] ISO 3555, Centrifugal, mixed flow and axial pumps - Code for acceptance tests - Class B, (1977)
- [5] McNulty, PJ, Pearsall, IS. (1982). Cavitation inception in pumps, *Journal of fluids engineering*, **104**(3), pp. 99-104.
- [6] Chudina, M. (2003) Detection of cavitation phenomenon in a centrifugal pump using audible sound, *Mech. syst. signal process*, **17**(6), pp. 1335-1347
- [7] Hunsaker, J.C. (1935). Cavitation research, *Mech. Eng.*, **57**, pp. 211 - 216
- [8] Акуличев, В.А. Некоторые соотношения в кавитационных зонах [Текст] / В.А. Акуличев, Л.Д. Росенберг // Акустический журнал. – 1965. – №11(3). – С. 287 – 293.
- [9] Акуличев, В.А. Экспериментальные исследования элементарной кавитационной зоны [Текст] / В.А. Акуличев // Акустический журнал. – 1968. – № 14(3). – С. 337-343.
- [10] Ito, Y., Tani, N., Kurishita, Y., Kitano, S., Nagasaki, T. (2012) New visualization test facility for liquid nitrogen and water cavitation in rotating inducer, *Proceedings of the Eighth International Symposium on Cavitation*, pp. 757-762
- [11] Fanelli, M. (1996) *Some Present Trends in Hydraulic Machinery Research, Hydraulic Machinery and Cavitation*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands
- [12] Li, S C. (2000) *Cavitation of Hydraulic Machinery*, Imperial College Press., London
- [13] Chudina, M. (2003) Noise as an Indicator of Cavitation in a Centrifugal Pump, *Acoustical Physics*, **49**, pp. 463-474.
- [14] Chudina, M., Prezelj, J., Chernetich, J. (2012) Use of noise and vibration spectra to detection cavitation in kinetic pumps, *Proceedings of the Eighth International Symposium on Cavitation*, pp. 456 - 461
- [15] Rus, T., Dular, M., Hocevar, M. An (2007) Investigation of the Relationship between Acoustic Emis-

sion, Vibration. Noise and Cavitation Structures on a Kaplan Turbine, *Journal of Fluids Engineering*, 129, pp. 1112-1122

[16] Yongsheng, S., Yongxiang, Zh., Tingfeng, M. (2008) Application of parallel recombination simulated annealing algorithms in recognition of inception cavitation fault, *Journal of Wuhan University of Technology*, 32, pp. 1025-1028

[17] Yuan, L., Yongyong, H., Darong, Ch. (2009) Wavelet entropy based condition test and identification of cavitation, *Journal of Mechanical Strength*, 31, pp. 19-23

[18] Zhongqi, P., Wei, Zh., Keren, Sh. (2005) Turbine Cavitation Testing Based on Wavelet Singularity Detection, *Journal of Vibration and Shock*, 24, pp. 71-74/

[19] Yong, W., Houlin, L., Shouqi, Y., Dongxi, L. (2012) Experimental measurement on cavitation induced vibration and noise of centrifugal pumps, *Proceedings of the Eighth International Symposium on Cavitation*, pp. 498 - 502

[20] Акуличев, В.А. Некоторые статические характеристики кавитации [Текст] / В.А. Акуличев, В.В. Ольшевский // Акустический журна. – 1968. – № 14(2). – С. 163 – 169.

[21] Igolkin, A., Koh, A., Kryuchkov, A., Safin, A., Shakhmatov, E. (2012) Pressure reducing valve noise reduction, *19th International Congress on Sound and Vibration*, Vilnius, Lithuania, 8-12 July

[22] Лямшев, Л.М. Теория гидродинамического кавитационного шума [Текст] / Леонид Лямшев // Акустический журнал. – 1969. – № 15(4). – С. 572-578.

[23] Акуличев, В.А. Взаимосвязь статических характеристик акустической кавитации и кавитационного шума [Текст] / В.А. Акуличев, В.А. Ольшевский // Акустический журнал. – 1968. – № 14(1). – С. 30-36.

[24] Шальнёв, К.К. Кавитация в гидродинамике [Текст] Известия Академии наук СССР, 8, 72-116

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF AIR SUPPLY IN COMBINED PUMP UNIT

**Gafurov S. A.,
Rodionov L. V.,
Blyumin K. V.**

Samara State Aerospace University
(SSAU)
34, Moskovskoye shosse, Samara,
443086, Russia
gafurov@ssau.ru

It's well known erosion caused by cavitation leads to increased wear of details. Investigation of erosion place of origin is intensive and complex problem. Therefore using of simple methods of cavitation diagnosis is very actual. One of these methods is vibroacoustical diagnosis which take into account not only noise occurred due to working process but also pressure pulsation of working fluid and vibration of system components. Noise measurement may locate their source thereby determine the most acoustically loaded details of the investigated unit.

This paper describes some questions of cavitation influence on external acoustic field in combined pump unit. We proposed the method for cavitation diagnosis in combined pump unit. This method is based on measurement of external acoustic field. This method showed high accuracy and ease of use. The experimental studies have established a connection between pulsation characteristics of the pump unit and an external acoustic field.

Key words: pump unit, combined air, cavitation, erosion acoustic visualization