

# МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИКО-ВИХРЕВОГО ПОЛЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ЦЕНТРОБЕЖНОЙ МАШИНЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЛИТТЕРОВ

**А.В. Кондратов, Д.В. Клименко, С.Ф. Тимушев**

*Московский авиационный институт (национальный  
исследовательский университет), Москва*

В последнее время все большее значение придается изучению проблем повышения надежности и ресурса центробежных насосов, которые являются основным источником шума в гидросистемах. Первые упоминания об этой проблеме появляются в 60-х годах прошлого века в связи с разрушением крупных промышленных насосов [1, 2]. Гидродинамическая вибрация возбуждается пульсациями давления, возникающими в проточной полости насоса за счет гидродинамических источников различной природы [3], к которым относятся вихреобразование, рециркуляция потока, кавитация, ступенчатая неоднородность параметров потока на выходе из центробежного рабочего колеса. Последний фактор вызывает генерацию пульсаций давления на так называемых частотах следования лопаток или на частоте прохождения лопаток (ЧСЛ) и ее высших гармониках и комбинационных частотах, которые доминируют в спектрах. Эти колебания давления являются неотъемлемой частью рабочего процесса центробежного насоса [4]. В центробежных насосах они имеют большую амплитуду из-за особенностей формирования шаговой неоднородности потока в центробежной лопаточной решетке. Детальные исследования параметров потока при абсолютном и относительном движении на выходе из рабочего колеса центробежных насосов, вентиляторов [5], компрессоров [6] подтверждают, что течение в лопаточном канале и на выходе из центробежного рабочего колеса имеет значительную неоднородность из-за особенностей формирования пограничного слоя в канале лопатки и вторичных течений [7, 8]. Хорошо известно, что физическая природа пульсаций давления в центробежном насосе является совокупным проявлением псевдозвуковых и акустических возмущений. Псевдозвук или

вихревая мода [9] быстро затухает вниз по течению от ротора, оставляя лишь акустическую моду колебаний давления в напорном трубопроводе. Двойственный характер пульсаций давления в центробежных насосах можно учесть, применив декомпозицию [10] с введением акустико-вихревых уравнений. Особенно резкое изменение параметров потока происходит у входных кромок направляющих лопаток и вблизи языка спирального отвода; поэтому выбору оптимального зазора между ротором и направляющим аппаратом или языком спиральной камеры [11] уделяется столь большое внимание, что подтверждается экспериментальными данными из разных источников по амплитуде пульсаций давления и динамических напряжений. в центробежных насосах. [12]. CFD-моделирование в настоящее время становится рутинным подходом для исследований в задачах пульсаций давления и акустики [13–15]. Исследования пульсаций давления в рабочей полости насоса дают информацию о нестационарных нагрузках [16–19], а также о генерации вибрации и шума. в насосе. При измерении динамических напряжений на входных кромках направляющей лопатки [20] центробежного насоса тензодатчиками установлено, что в диапазоне расхода 0,6 – 1,0 от его оптимального значения динамические напряжения прямо пропорциональны амплитудам пульсаций давления.

В конструкции насоса сплиттеры широко используются для улучшения кавитационных и энергетических параметров [21], в то же время пока мало результатов по влиянию укороченных лопаток на пульсации давления в турбомашинах [22, 23]. Очевидно, что применение сплиттеров может снижать неравномерность параметров потока на выходном радиусе центробежного рабочего колеса и амплитуду пульсаций давления, и шум ЧСЛ, поэтому полезны исследования их формы и положения в канале основной лопатки. Проблема оптимизации многоярусных центробежных колес может решаться с применением двумерных и трехмерных методов численного и физического моделирования [24]. В качестве двумерного метода предлагается метод дискретных вихрей [25].

## Литература

1. Chen Y N 1961 Water-Pressure Oscillations in the Volute Casings of Storage Pumps. Sulzer Technical Review, Research number, pp 21-34.
2. Shtrub R A 1964 Pressors Fluctuations and Fatigue Stresses in Storage Pumps and Pump-Turbines. Transactions of the ASME, 86(2) 191 <https://doi.org/10.1115/1.3677575>
3. J F Guelich and U Bolleter 1992 Pressure Pulsations in Centrifugal Pumps. J VIB ACOUST 114 272
4. Petit O and Nilsson H 2013 Numerical Investigations of Unsteady Flow in a Centrifugal Pump with a Vaned Diffuser. International Journal of Rotating Machinery 2013 961580 <https://doi.org/10.1155/2013/961580>
5. Raj D and Swim W B 1981 Measurements of the Mean Flow Velocity and Velocity Fluctuations at the Exit of an FC Centrifugal Fan Rotor. J ENG P 103(2) 393 <https://doi.org/10.1115/1.3230733>
6. D Eckardt J 1975 Instantaneous Measurements in the Jet-Wake Discharge Flow of a Centrifugal Compressor Impeller. J ENG P 97(3) 337 <https://doi.org/10.1115/1.3445999>
7. M W Johnson and J Moore 1980 The Development of Wake Flow in a Centrifugal Impeller. J ENG P 102(2) 382 <https://doi.org/10.1115/1.3230265>
8. R E Wagner and H R Velkoff 1972 Measurement of Secondary Flows in a Rotating Duct. J ENG P 94(4) 261 <https://doi.org/10.1115/1.3445681>
9. Crow S C 1970 Aerodynamic Sound Emission as a Singular Perturbation Problem. Studies in Applied Mathematics 49(1) 21 <https://doi.org/10.1002/sapm197049121>
10. Timouchev S, Tourret J, Pavic G, Aksenov 2006 A Numerical 2-D and 3-D methods for computation of internal unsteady pressure field and near-field noise of fans. NOISE CONTROL ENG J 54(1) 15 DOI: 10.3397/1.2888774
11. Bunjes J S 1981 Diffuser or volute pump? A comparison of performances. Fluid Machinery for the Oil, Petrochemical and Related Industries (Eur. Congr. London: Mech. Eng. Publ. The Hague, 24-26 March 1981)

12. Zogg, U. Bolleter 1993 Generation and Propagation of Hydraulic Noise in Centrifugal Pumps. Pump Noise and Vibration. Proc. 1st Int. Symp. Pump Noise and Vibration (Clamart, France 7-9 July 1993) pp 263-270
13. Timushev S F, Fedoseev S Yu 2015 Methods of numerical simulation of vibration of the LRE axial booster pump. Trudy MAI (published by Moscow Aviation Institute) 83
14. Klimenko D V Timushev S F Korchinskiy V V 2015 Comparative analysis of pressure pulsations in designs of the tubular guide channels of the LRE screw centrifugal pump. Trudy MAI (published by Moscow Aviation Institute) 82
15. Timushev S F, Klimenko D V, Firsov V P, Antyukhov I V 2015 Numerical modeling of pressure pulsations in the turbo expander of perspective cryostatting system. Trudy MAI (published by Moscow Aviation Institute) 82
16. Y. Y. Jiang, S. Yoshimura, R. Imai, H. Katsura, T. Yoshida, C. Kato 2007 Quantitative evaluation of flow-induced structural vibration and noise in turbomachinery by full-scale weakly coupled simulation. J FLUID STRUCT 23 531
17. Hou-lin L, Han-wei D, Jian D, Ming-gao T, Yong W, Hao-qin H 2016 Numerical and experimental studies of hydraulic noise induced by surface dipole sources in a centrifugal pump. J HYDRODYN 28(1) 43 doi:10.1016/S1001-6058(16)60606-6
18. Nidal H and Abu-Hamdeh 2019 Experimental and theoretical study of a vane pass frequency for a centrifugal pump. Archive of Mechanical Engineering, 66(1) doi:10.24425/ame.2019.126371
19. Zhi-Jun S., Chen-Xing J., Dong-Hua W., Zeng-Hao Z. and Feng-Chen L. 2015 Numerical simulation of dynamic flow characteristics in a centrifugal water pump with three-vaned diffuser. ADV MECH ENG 7(8) 12 doi:10.1177/1687814015598487
20. Offenhäuser 1973 Druckschwankungsmessungen an Kreiselpumpen mit Leitrad. VDI-Berichte 193
21. Francesco Torre 2018 Design optimization of splitter blades for rocket engine turbopump. MSc thesis, Delft University of Technology
22. L Meng et al 2014 Study on the Pressure Pulsation inside Runner with Splitter Blades in Ultra-High Head Turbine. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 22 032012

23. Haiqin Song et al 2020 Analysis of rotor-stator interaction of a pump-turbine with splitter blades in a pump mode. Mathematics (Published by MDPI) 8 1465 doi:10.3390/math8091465
24. Li Jiawen, Timushev S, Klimenko D, Krivenko A 2019 Modeling pressure pulsation fields in a screw centrifugal pump (Conference Paper). Proc. of the 26th International Congress on Sound and Vibration (Montreal; Canada; 7-11 July 2019)
25. Постоловский С.Н., Ильичев К.П. Расчетное исследование отрывного обтекания круговых лопаточных решеток. Энергомашиностроение, №10, 1974
26. M. Ubaldi, P. Zunino, G. Barigozzi, A. Cattane An Experimental Investigation of Stator Induced Unsteadiness on Centrifugal Impeller Outflow. Journal of Turbomachinery JANUARY 1996, Vol. 118/41M.