

Верификация cfd расчета кавитации с экспериментом

Антон Александрович Проценко

Инженер

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Москва, Россия

anton.very.good@gmail.com

ORCID 0009-0004-7785-3818

Владислав Дмитриевич Фоменко

Инженер

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Москва, Россия

vladislav.fomenko.2014@gmail.com

ORCID 0000-0003-0550-0859

Андрей Сергеевич Надточий

Ведущий инженер по гидродинамическим расчетам

Филиал АО «ГМС Ливгидромаш»

Ливны, Россия

nadtochiy@hms.ru

ORCID 0009-0008-2146-0547

Поступила в редакцию 07.02.2024

Принята 27.03.2024

Опубликована 15.04.2024

УДК 532.5:532.526.4

EDN MONKQL

ВАК 4.3.3. Пищевые системы (технические науки)

OECD 02.03.IU ENGINEERING, MECHANICAL

Аннотация

В настоящий момент отсутствует однозначная методика гидродинамического моделирования процесса кавитации лопастного насоса и определения коэффициентов Шнерра-Сауэра с использованием модели многофазного течения «Volume of fluid method, (VOF)» для лопастных насосов с боковым кольцевым подводом. Цель статьи – проверить границы применимости модели Шнерра-Сауэра при расчете частных характеристик центробежного насоса на различных подачах. Объектом исследования выступал лопастной консольный насос с боковым кольцевым подводом и рабочим колесом с пятью лопастями. В ходе работы определялось значение кавитационного запаса при подаче 120 кубометров в час и при подаче в 85 кубометров в час экспериментальным методом. Экспериментальное определение кавитационного запаса проводилось согласно требованиям ГОСТ 6134-87. Кавитация в насосе достигалась путем снижения давления на всасывании при помощи вакуум-насоса. Также NPSH определялся методом гидродинамического моделирования. В ходе гидродинамического моделирования использовалась многофазная модель «Volume of fluid method, (VOF)» и кавитационная модель «Scherr-Sauer cavitation», подбор коэффициентов Шнерра-Сауэра проводился для подачи (120 м³/ч), верификация по режиму недогруза насоса (85 м³/ч). Итогом работы являются полученные значения кавитационного запаса и графики частных кавитационных характеристик исследуемого насоса при подаче 120 кубометров в час и при подаче в 85 кубометров в час, полученные

в ходе эксперимента и в ходе CFD моделирования, значения коэффициентов Шнерра-Сауэра и выводы по использованию этой модели.

Ключевые слова

кавитация; Volume of fluid method; CFD моделирование; коэффициенты Шнерра-Сауэра.

Введение

Задача определения кавитационного запаса является одной из основных в насосостроении. Если значения полного напора на входе в лопастной насос входе работы оказывается ниже давления насыщенного пара при данной температуре, в насосе возникает кавитация, которая пагубно влияющая на характеристики насоса и на его срок службы (Handal ,2020; Teplov,2020; Chaburko, 2020; Lomakin , 2020; Kasatkin , 2020; Kang 2018). КПД насоса, работающего в режиме кавитации снижается, также кавитация приводит к падению напора. Если процесс кавитации интенсивно протекает в проточной части насоса, то происходит резкое падение напора практически до нуля (кавитационный срыв).

Во время кавитации происходит образование и последующее схлопывание пузырьков водяного пара. Схлопывание пузырьков вблизи поверхностей проточной части насоса приводит к механическому, химическому и тепловому воздействию на элементы конструкции проточной части насоса.

В ходе длительной работы насоса на режимах, сопровождающихся кавитацией, возникает так называемая кавитационная эрозия, разрушающая лопастное колесо и отводящее устройство (Kang 2018; Wan, 2018). Для борьбы с кавитацией могут применятся различные методы, такие как увеличение диаметра горловины входа колеса, уменьшение частоты вращения ротора насоса, установка перед центробежным колесом осевой ступени и многие другие.

Уже на этапе проектирования насоса необходимо оценить его кавитационные качества. Одним из методов оценки кавитационных качеств насоса является вычислительная гидродинамика (CFD) (Shukla, 2011), экспериментальное исследование на натурном образце или масштабной модели и аналитический расчет. Однако лучшим способом является эксперимент. Целью данного исследования является верификация результатов численного гидродинамического моделирования в программе STAR-CCM+ с использованием модели многофазного течения «Volume of fluid method, (VOF)» и кавитационной моделью «Scherr-Sauer cavitation» с результатами натурного эксперимента.

Материалы и методы исследования

Для определения кавитационных качеств насоса были проведены кавитационные испытания в соответствии с требованиями ГОСТ 6134-2007 по классу точности 2. На рисунке 1 представлена гидравлическая схема стенда, где фигурируют следующие обозначения: КШ – кран шаровой, ВН – вакуум-насос, ОК – обратный клапан, ДР – дроссель, РМ – расходомер, М – манометр, Н – насос, МВ – мановакуумметр, ДД – датчик давления, ДТ – датчик температуры, ЭД – электродвигатель, ПЧ – преобразователь частоты, Ф – фильтр, ДО – датчик оборотов, КТ – кран трехходовой. На рисунке 2 представлена фотография испытательного стенда.

Испытания проводились следующим образом: бак, объемом 1000 литров заполнялся на 80% чистой водой температурой около 17 градусов, насос выводился на рабочие обороты (3000 об/мин) и при помощи задвижки ДР 2 обеспечивалось требуемое значение расхода (120 и 85 кубометров в час), далее вакуум-насос откачивал воздух с верхней части бака, обеспечивая понижение давления на входе в насос, далее показания мановакуумметра МВ1 и манометра М записывались в протокол испытаний. Всего было проведено 19 измерений для подачи в 85 кубометров в час и 18 измерений для 120 кубометров в час. Напор насоса определялся по следующей формуле

$$H = \frac{P_2}{\rho g} - \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g}$$

где P_2 – давление на выходе из насоса, Па; P_1 – давление на входе в насос, Па; V_1 – скорость на выходе из насоса, м/с; V_2 – скорость на входе в насос, м/с; g – ускорение свободного падения м²/с. Скорость потока определялась по подаче и площади каналов патрубков насоса

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

где Q – показания расходомера, м³/час; D – диаметр канала патрубка, м. Кавитационный запас определялся как разница полного напора на входе в насос над напором насыщенного пара

$$\Delta h = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} - \frac{P_{\text{нп}}}{\rho g}$$

где $P_{\text{нп}}$ – давление насыщенных паров воды, Па. Значения напоров после испытания были приведены к одной частоте вращения в 2985 об/мин по следующей формуле подобия:

$$H_n = \frac{H n_n^2}{n^2}$$

где n_n – частота приведения (2985 об/мин); n – показания датчика оборотов, об/мин.

Результаты и обсуждение

В таблицах 1 и 2 представлены значения кавитационного запаса (NPSH) и напора насоса при подачах 120 и 85 кубометров в час соответственно (рис. 3 и рис. 4). Значение NPSH, при котором напор падает на 3% называется вторым критическим режимом кавитации. В ходе эксперимента это значение составило 3.2 метра для подачи 120 м³/ч и 2.48 метра для подачи 85 м³/ч.

Для расчета кавитации была использована модель кавитации Schnerr-Sauer (Шнерр-Сауэр), которая является упрощенной моделью Rayleigh-Plesset (Релей-Плессет). Упрощение заключается в исключении ускорения роста пузырьков, вязкостных эффектов и поверхностного натяжения. Для применения модели Шнерра-Сауэра необходимо подобрать коэффициенты роста и схлопывания пузырьков. Эти коэффициенты являются коэффициентами пропорциональности для данной модели, определяющими интенсивность кавитации. Они определяются экспериментально.

Для их нахождения были выбраны две последние точки из характеристики, представленной на рисунке 3, так как они соответствуют началу кавитации. В таблице 3 представлены результаты верификации. Как можно видеть, погрешность не превышает 3%, поэтому примем данные результаты.

Далее были построены частные кавитационные характеристики для сравнения результатов численного моделирования с экспериментом, представленные на рисунках 4 и 5. Несложно заметить, что при неплохом совпадении характеристик (в точке падения напора на 3%) при подаче в 120 м³/час имеется существенная погрешность при подаче 85 м³/час.

Как можно видеть, даже при небольшом изменении подачи появляется сильная погрешность расчета в сравнении с экспериментом. Следовательно, для модели Шнерра-Сауэра необходимо подбирать коэффициенты для каждого режима работы насоса, что противоречит идее о прогнозировании кавитационных качеств насоса по заранее определенным коэффициентам. Отсюда можно заключить, что данная модель подходит больше для качественного исследования кавитации, чем для количественного. Ее возможно исследовать для точного исследования кавитационных качеств насоса, но уже после подбора коэффициентов.

Заключение

Полученные значения коэффициентов Шнерра-Сауэра не могут в достаточной степени покрыть все диапазоны работы насоса, поэтому данная модель (без изменения коэффициентов для каждого режима работы насоса) подходит для качественной оценки кавитации, но не количественной.

Список литературы

1. Handal I., Tkachuk V., Petrovand A. Traditional methods for the design of radial-axial hydraulic turbines with verification in CFD simulation // IOP conference. Series: mat. scien. and engin. 2020. Vol. 779. № 1. pp. 2-12.

2. Teplov O., Lomakin V. Improving the performance of a centrifugal vane pump by installing vortex generators on the suction surfaces of blades // IOP conference. Series: mat. scien. and engin. 2020. Vol. 779. № 1. pp. 2-12.
3. Chaburko P., Kuznetsov A. Method for leakage measurement in the recirculation path of a hermetic pump // IOP conference. Series: mat. scien. and engin. 2020. Vol. 779. № 1. pp. 12-39.
4. Lomakin V., Valiev T., Chaburko P. Application of optimization algorithms to improve the vibroacoustic characteristics of pumps // IOP conference. Series: mat. scien. and engin. 2020. Vol. 779. № 1. pp.
5. Kasatkin M., Petrov A. Hydrodynamic modeling of cavitation in a multistage centrifugal pump during its operation in the constant feed mode with a change in the rotor speed of the pump // IOP conference. Series: mat. scien. and engin. 2020. Vol. 779. № 1. pp. 12-47.
6. Kang Y.Z., Feng C., Liu L.Z. Comparison of three kinds of sensors used to identify the incipient cavitation // Sensor review. 2018. Vol. 38. N 1. pp. 13-20.
7. Wan W., Liu B., Raza A. Numerical prediction and risk analysis of hydraulic cavitation damage in a high-speed-flow spillway // Shock and Vibration. 2018. Vol. 2018. № 1.
8. Shukla M.K., Jain R., Prasad V. CFD Analysis of 3-D flow for francis turbine // MIT international journal of mechanical engineering. 2011. Vol 1. № 2. pp. 93-100.

Verification of CFD calculation of cavitation with experiment

Anton A. Protsenko

Engineer
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia
anton.very.good@gmail.com
ORCID 0009-0004-7785-3818

Vladislav D. Fomenko

Engineer
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia
vladislav.fomenko.2014@gmail.com
ORCID 0000-0003-0550-0859

Andrey S. Nadtochiy

Engender HMS Livgidromash
Branch of JSC «HMS Livgidromash»
Livny, Russia
nadtochiy@hms.ru
ORCID 0009-0008-2146-0547

Received 07.02.2024

Accepted 27.03.2024

Published 15.04.2024

UDC 532.5:532.526.4

EDN MONKQL

VAK 4.3.3. Food systems (technical sciences)

OECD 02.03.IU ENGINEERING, MECHANICAL

Abstract

At the moment, there is no unambiguous method for hydrodynamic modeling of the cavitation process of a vane pump and determining the Schnerr-Sauer coefficients using the multiphase flow model «Volume of fluid method (VOF)» for vane pumps with lateral annular supply. The purpose of the article is to test the limits of the applicability of the Schnerr-Sauer model in calculating the partial characteristics of a centrifugal pump at various feeds. The object of the study was a vane cantilever pump with a lateral annular supply and an impeller with five blades. During the work, the value of the cavitation reserve was determined when feeding 120 cubic meters per hour and when feeding 85 cubic meters per hour by an experimental method. The experimental determination of the cavitation reserve was carried out in accordance with the requirements of GOST 6134-87. Cavitation in the pump was achieved by reducing the suction pressure using a vacuum pump. NPSH was also determined by hydrodynamic modeling. In the course of hydrodynamic modeling, the multiphase model «Volume of fluid method (VOF)2 and the cavitation model «Scherr-Sauer cavitation» were used, the selection of Scherr-Sauer coefficients was carried out for supply (120 m³/h), verification according to the underload mode of the pump (85 m³/h). The result of the work is the obtained values of the cavitation reserve and graphs of the partial cavitation characteristics of the pump under study at a supply of 120 cubic meters per hour and at a supply of 85 cubic meters per hour, obtained during the experiment and during CFD modeling, the values of the Schnerr-Sauer coefficients and conclusions on the use of this model.

Keywords

cavitation; Volume of fluid method; CFD modeling; Schnerr-Sauer coefficients.

References

1. Handal I., Tkachuk V., Petrovand A. Traditional methods for the design of radial-axial hydraulic turbines with verification in CFD simulation // IOP conference. Series: mat. scien. and engin. 2020. Vol. 779. № 1. pp. 2-12.
2. Teplov O., Lomakin V. Improving the performance of a centrifugal vane pump by installing vortex generators on the suction surfaces of blades // IOP conference. Series: mat. scien. and engin. 2020. Vol. 779. № 1. pp. 2-12.
3. Chaburko P., Kuznetsov A. Method for leakage measurement in the recirculation path of a hermetic pump // IOP conference. Series: mat. scien. and engin. 2020. Vol. 779. № 1. pp. 12-39.
4. Lomakin V., Valiev T., Chaburko P. Application of optimization algorithms to improve the vibroacoustic characteristics of pumps // IOP conference. Series: mat. scien. and engin. 2020. Vol. 779. № 1. pp.
5. Kasatkin M., Petrov A. Hydrodynamic modeling of cavitation in a multistage centrifugal pump during its operation in the constant feed mode with a change in the rotor speed of the pump // IOP conference. Series: mat. scien. and engin. 2020. Vol. 779. № 1. pp. 12-47.
6. Kang Y.Z., Feng C., Liu L.Z. Comparison of three kinds of sensors used to identify the incipient cavitation // Sensor review. 2018. Vol. 38. N 1. pp. 13-20.
7. Wan W., Liu B., Raza A. Numerical prediction and risk analysis of hydraulic cavitation damage in a high-speed-flow spillway // Shock and Vibration. 2018. Vol. 2018. № 1.
8. Shukla M.K., Jain R., Prasad V. CFD Analysis of 3-D flow for francis turbine // MIT international journal of mechanical engineering. 2011. Vol 1. № 2. pp. 93-100.