

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАВИТАЦИОННОЙ ЭРОЗИИ ЗУБА ШЕСТЕРЕННОГО НАСОСА ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ САМОЛЁТА

Пономарев С.А., Родионов Л.В., Крючков А.Н., Пономарева С.А.
Самарский университет, г. Самара, ponomarev.serg-hanter@yandex.ru

Ключевые слова: кавитация, эрозия поверхности, шестеренный насос, математическое моделирование.

Кавитационная эрозия рабочих поверхностей зубьев шестеренных насосов является одной из основных причин снижения ресурса топливных насосов авиационных двигателей. В процессе эксплуатации шестеренного насоса с внешним эвольвентным зацеплением в зоне зацепления зубьев образуются так называемые «запертые объёмы». При расширении этих объёмов давление рабочей жидкости (авиационного топлива) падает ниже давления насыщенных паров, что приводит к возникновению кавитационных пузырьков. Последующее их схлопывание вблизи поверхности зуба генерирует ударные волны и кумулятивные микроструйки, вызывающие эрозию металла. Особый интерес для моделирования представляет центральная область зуба, так как именно здесь наблюдаются наибольшие повреждения. Периферийные зоны зуба в большей степени защищены перетоком жидкости через торцевые и радиальные зазоры, которые демпфируют ударное воздействие.

Для корректного математического описания эрозии необходимо моделирование давления в запираемом объёме с учётом кавитации. Ключевым подходом является решение уравнения неразрывности относительно плотности, а не давления, что обеспечивает устойчивость счёта при падении давления ниже давления насыщенных паров. В дальнейшем при моделировании будет учтен этот момент. Переход к плотности позволяет корректно описывать двухфазную среду при наличии паровых пузырьков, когда давление фиксируется на уровне давления насыщенных паров.

Скорость схлопывания кавитационного пузырька и, следовательно, интенсивность эрозии определяются его радиусом. В работе Яхно и др. [2] и Руденко М.Г. [3] сказано, что наиболее опасным является ассиметричное схлопывание вблизи твердой границы, которое реализуется именно в центральной части зуба, где отсутствуют боковые перетечки.

Одной из ключевых проблем моделирования является учёт истинного объёмного модуля упругости смеси жидкость-газ. Эксперименты [1] показали, что при содержании растворённого воздуха в топливе до 24% модуль упругости падает до 6,9 МПа, что в десятки раз ниже модуля упругости чистой жидкости. Это существенно замедляет рост давления при схлопывании и увеличивает время воздействия пузырька на поверхность. В работе Руденко [3] дополнительно показано, что кавитация может возникать даже при давлении выше давления насыщенных паров, если в центральной зоне зуба касательные напряжения сдвига достигают критической величины. Условие разрыва сплошности в этом случае имеет вид:

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \geq p; \quad (1)$$

где τ – касательное напряжение, μ – динамическая вязкость, $\partial u / \partial y$ – градиент скорости в зазоре. Это объясняет локализацию эрозии именно в центре зуба, где градиенты скорости максимальны.

Для снижения кавитационной эрозии в конструкции шестеренного насоса применяются разгрузочные канавки на подпятниках. В работе Ци Гонин и др. [4] показано, что смещение канавки в сторону низкого давления и увеличение её площади в зоне центра зуба позволяет уменьшить амплитуду отрицательных давлений на 36–47%.

Также можно наблюдать экспериментальное подтверждение возникновения очагов кавитации в центре зуба, которое проводилось на стенде с высокоскоростной видеосъёмкой (до 10000 кадров/с) согласно методике [5]. Визуализация подтвердила, что зарождение кавитационных пузырьков происходит именно в момент соединения запертого объёма с линией всасывания, а их схлопывание локализовано в центральной части зуба, что полностью коррелирует с ситуацией в исследуемом топливном насосе. Прожиг в центре зуба можно видеть на рис. 1.



Рис. 1 – Прожиг на вершине зуба

Таким образом, анализируя выше сказанное, становится понятно, что акцент в моделировании должен быть сделан именно на возникновении кавитации в момент соединения запертого объёма с разгрузочными канавками.

Анализируя график давления запертого объема на рис. 2 (измерение давления производилось в трёх точках запертого объема) видно, что после раскрытия запертого объёма в течении непродолжительного промежутка времени происходит падение давления почти до абсолютного нуля, что ведёт к активной газовой и паровой кавитации, что, в свою очередь, вызывает кавитационную эрозию.

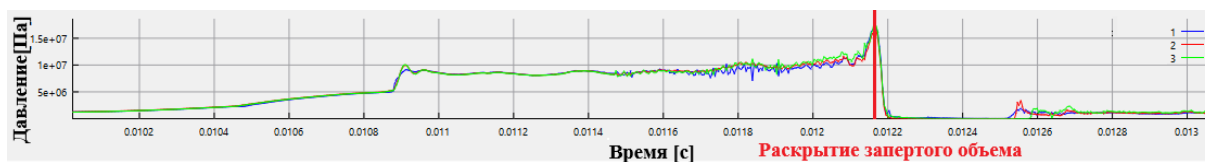


Рис.2 – График давления в одной из зубчатых впадин

Результаты моделирования паровой фракции представлены на рис. 3. Видно постепенное концентрирование пара в центральной области зуба при раскрытии замкнутого объёма. Наибольшая доля газовой фазы сосредоточена вблизи оси симметрии зуба, снижаясь до нуля по направлению к его краям.

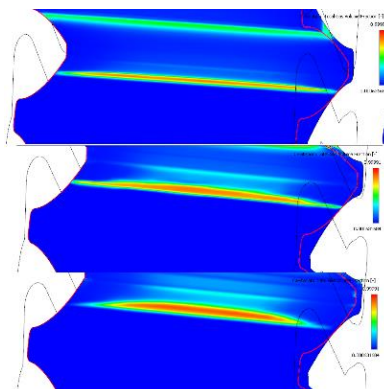


Рис.3 – Доля паровой фракции по ширине зуба

Список литературы

1. Eaton M., Keogh P.S., Edge K.A. The modelling, prediction, and experimental evaluation of gear pump meshing pressures with particular reference to aero-engine fuel pumps // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering. – 2006. – Vol. 220. No. 5. – P. 365-379.
2. Яхно О.М., Костюк Д.В., Стричек Я., Антоняк П. Влияние кавитации на величину пульсаций подачи шестеренного насоса // Вестник национального технического университета «Киевский политехнический институт». – 2012.
3. Руденко М.Г. О возможности возникновения кавитации в зубчатых передачах // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2009. – № 3 (39). – С. 69-71.
4. Ци Гонин, У Баохай, Фу Цзянфэн. Сравнительный анализ типовых разгрузочных канавок высокоскоростного высоконапорного топливного шестеренного насоса авиационного двигателя // Acta Aeronautica et Astronautica Sinica. – 2024. – Т. 45. № 5.
5. Вэй Лецзян, Ли Тао, Лу Лифэн, Цян Янь, Ло Сяомэй. Влияние трапецеидальной разгрузочной канавки на давление запираения и пульсацию расхода в шестеренном насосе внешнего зацепления // Гидравлика и пневматика. – 2021. – Т. 45. № 3. – С. 62-69.

Сведения об авторах

Пономарев Сергей Анатольевич – аспирант. Область научных интересов: разработка отечественных агрегатов, гидравлическое оборудование, математическое моделирование.

Родионов Леонид Валерьевич – к.т.н., доцент кафедры автоматических систем энергетических установок. Область научных интересов: объемные гидромашины, динамика и виброакустика машин.

Крючков Александр Николаевич – д.т.н., профессор кафедры автоматических систем энергетических установок. Область научных интересов: акустика насосных агрегатов и топливных систем энергетических установок.

Пономарева Софья Андреевна – аспирант. Область научных интересов: насосные агрегаты, механика жидкости и газа кровеносной системы человека.

MATHEMATICAL MODELING OF CAVITATION EROSION OF A GEAR TOOTH IN AN AIRCRAFT FUEL SYSTEM GEAR PUMP

Ponomarev S.A., Rodionov L.V., Kryuchkov A.N., Ponomareva S.A.
Samara University, Samara, ponomarev.serg-hanter@yandex.ru

Keywords: cavitation, surface erosion, gear pump, mathematical modeling.

Cavitation erosion of gear teeth is a key factor reducing the service life of aircraft engine fuel pumps. This paper analyzes the conditions for cavitation occurrence in trapped volumes of gears. It is revealed that the greatest damage is concentrated in the central tooth region due to asymmetric bubble collapse near a solid boundary.