

В.А. Волков, И.М. Дергунов, А.В. Муслаев, В.Ю. Стрельцов

Ментор Графикс Девелопмент Сервисез Лимитед

РАСЧЕТ КАВИТАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ В ФОРСУНКАХ С ПОМОЩЬЮ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА FloEFD™.

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты численного моделирования кавитационных режимов течения различных жидкостей в форсунках, для которых имеются опубликованные экспериментальные данные. В расчетах использовали 3D систему осредненных уравнений Навье-Стокса, для замыкания которой применяли $k-\epsilon$ модель турбулентной вязкости и баротропное уравнение состояния среды с малой массовой долей примеси инородного растворенного газа. Получено хорошее согласование результатов моделирования с экспериментальными данными.

1. ВВЕДЕНИЕ

В случае стационарных течений кавитация жидкостей возникает обычно в окрестности наиболее глубоких локальных минимумов поля давления. Такую кавитацию называют гидродинамической. Она может происходить во многих технических устройствах и оказывать при этом, как положительное, так и негативное влияние на их работу.

Кавитация всегда начинается с образования внутри жидкости множества мелких пузырьков, наполненных смесью ее пара и растворенных в ней газов. Вниз по потоку от этой зоны возникает область течения двухфазной среды, которую называют кавитационной каверной.

В ряде вычислительных пакетов для моделирования кавитации применяют макрокинетическое уравнение переноса паровой фазы, в правой части которого присутствует модельное выражение, учитывающее изменение массовой доли пара в ходе процессов образования, роста и схлопывания пузырьков. Указанное выражение определяет свойства соответствующей модели кавитации, которую называют неравновесной. Ее характерной особенностью является присутствие ряда специфических модельных параметров, таких как коэффициент поверхностного натяжения жидкости, размер и число пузырей, дисперсный состав и др.

Следует отметить, что для представляющих большой практический интерес технических жидкостей, таких как жидкие горючие, синтетические и минеральные масла, гидравлические жидкости и др., большинство имеющихся моделей становятся малопригодными, поскольку информация по требуемым термодинамическим и теплофизическим свойствам этих жидкостей весьма скудная и разрозненная. Это

обстоятельство учитывалось при разработке модели кавитирующей среды, путем определения минимального набора свойств и параметров, позволяющих воспроизводить основные гидродинамические эффекты, вызываемые кавитацией.

В большинстве случаев гидродинамическая кавитация оказывает негативное влияние на работу различных технических устройств: насосов, турбин, гребных винтов и т. п. Однако, применительно к устройствам впрыска, было обнаружено, что работа форсунок в кавитационном режиме позволяет контролировать массовый расход и качество распыла жидкости при сравнительно небольшом эрозионном воздействии на элементы конструкции. Данный эффект используется, в частности, для поддержания постоянства требуемого расхода горючего в устройствах впрыска двигателей.

Благодаря широкой распространенности подобных устройств, имеется значительное число экспериментальных и теоретических исследований кавитационных режимов работы форсунок. Информация, содержащаяся в данных работах, была использована для апробации модели равновесной кавитации технологических жидкостей, реализованной в пакете гидродинамического моделирования FloEFD™.

2. МОДЕЛЬ КАВИТАЦИОННОГО ТЕЧЕНИЯ

Кавитационные течения описываются системой уравнений Навье-Стокса, в предположении, что температура среды постоянна. Корректность использования данного допущения при моделировании гидравлической кавитации подтверждается экспериментальными данными [1].

Замыкающее соотношение, определяющее зависимость плотности среды от давления, получено на базе системы соотношений, описывающих с помощью потенциала Гельмгольца, равновесное термодинамическое состояние смеси, состоящей из одного реального и нескольких идеальных газов. Использование данной системы позволяет определить равновесные параметры среды при условии, что необходимые термодинамические свойства реального газа известны.

Для случаев, когда имеющаяся информация о свойствах реального газа является недостаточной для наполнения термодинамической модели, допущение об изотермичности среды позволяет свести систему соотношений к уравнению

состояния баротропного типа. В рамках данной работы дополнительно полагалось, что жидкость является несжимаемой, а в области полного перехода жидкости в пар, его параметры рассчитываются по уравнению состояния идеального газа.

Графический вид зависимости плотности среды от давления приведен на рис. 1.

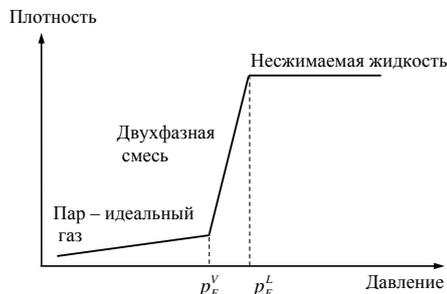


Рис.1. Зависимость плотности от давления для кавитирующей среды.

Величины p_E^L — давление, при достижении которого начинается кавитация и p_E^V — давление, при достижении которого вся жидкость переходит в пар, получены из условия равновесия фаз, с помощью термодинамического потенциала Гельмгольца.

В двухфазной области $p_E^V \leq p \leq p_E^L$, зависимость плотности среды от давления определяется соотношением:

$$\rho = \frac{p - p_0^E}{RT_0} \frac{M_I}{Y_I}$$

В случае исследования кавитирующих сред, включенный в состав смеси идеальный газ, играет роль инертного растворенного газа, который, в большинстве случаев, содержится в жидкости. Массовая концентрация растворенного газа является параметром используемой модели.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТЕЙ В ФОРСУНКАХ

3.1. Форсунка с водой

Постановка задачи. Рассматривается задача об истечении воды из модельной форсунки [2], конструкция которой показана на рис. 2. Форсунка представляет собой цилиндр, в котором выточены два соосных цилиндрических отверстия диаметром 50мм и 8 мм. Температура воды 293 К, давление на входе 251700 Па, 269500 Па, 286700 Па и 306900 Па. Давление на выходе 101325 Па. Растворенный газ — воздух.

Таблица 1. Свойства воды при 20°C

Плотность	998.2 кг/м ³
Молярная масса	0.018 кг/моль
Динамическая вязкость	0.001 Па·с
Давление насыщения	2318 Па

Результаты расчета получены для всех 4-х

режимов, исследованных в [2]. На рис. 3 приведено сопоставление рассчитанных в EFD полей плотности с фотографиями из работы [2] для двух режимов с развитой кавитацией.

На рис. 4 приведены расчетные и экспериментальные данные по длинам кавитационной зоны для всех режимов.

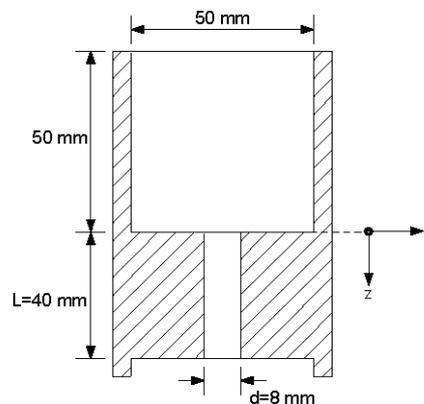


Рис. 2. Конструкция форсунки.

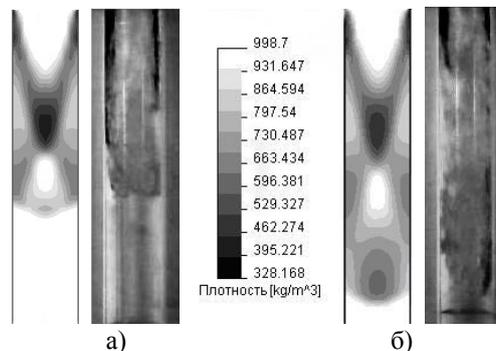


Рис. 3. Распределение плотности при различных давлениях на входе: а) — 286700 Па и б) — 306900 Па.

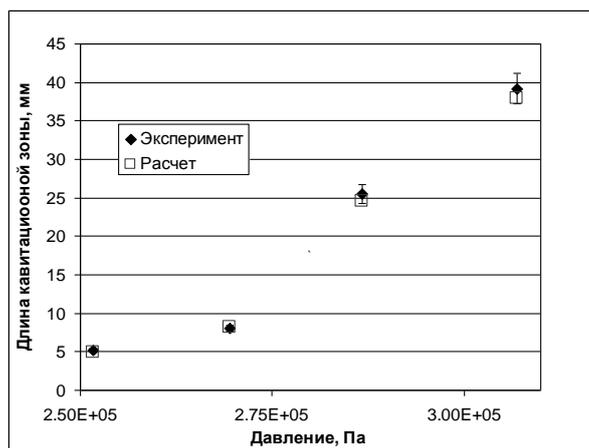


Рис. 4. Результаты расчета длины кавитационной зоны при различных давлениях на входе в форсунку.

Из рис. 4 видно, что имеет место хорошее соответствие рассчитанных и измеренных в эксперименте длин кавитационных зон. Погрешность не превышает 5%.

В результате моделирования кавитационного истечения воды в форсунке получены результаты, хорошо согласующиеся с экспериментом, что

позволяет сделать вывод о корректности модели кавитации применительно к наиболее распространенному в технических приложениях веществу.

3.2. Дроссельный канал с дизельным горючим

Постановка модельного эксперимента по исследованию кавитационных режимов течения дизельного горючего в дроссельном канале описана в [1]. Результаты данной работы использовались целым рядом исследователей для валидации используемых математических моделей кавитационного течения при расчете устройств впрыска горючего [3 — 4].

В экспериментах [1] жидкое горючее пропускалось через дроссель, сделанный в середине канала. При фиксированном перепаде давлений, измерялся массовый расход горючего, а также визуализировалась кавитационная зона, возникающая на узком участке канала. Дополнительно, в определенных местах этого участка измерялись скорость и давление. Детальный вид дроссельного участка канала, с соответствующими размерами, приведен на рис. 5.

Расчеты проводились в стационарной трехмерной симметричной постановке. В качестве инертного растворенного газа был выбран воздух с массовой концентрацией $Y_{air}=0.1\%$.

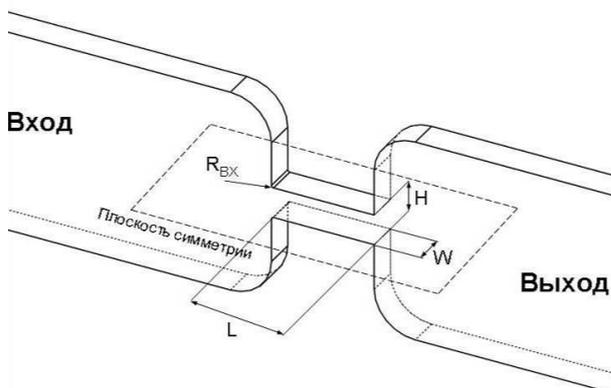


Рис. 5. Расчетная модель дроссельного канала. Здесь длина $L=0.001$ м, высота $H=0.000299$ м, толщина $W=0.0003$ м, радиус входа $R_{ВХ}=0.00002$ м.

Таблица 2. Свойства жидкого горючего при 30°C

Плотность	836 кг/м ³
Молярная масса	0.198 кг/моль
Динамическая вязкость	0.0025 Па·с
Давление насыщения	3937 Па

Результаты расчета получены для девяти режимов с различным давлением на выходе из дроссельного канала: от 10^6 до $9 \cdot 10^6$ Па.

На рис. 6 приведены расчетные и экспериментальные данные по расходной характеристике дросселя. По оси абсцисс отложен перепад давления в канале, по оси ординат — устанавливающийся массовый расход горючего.

Видно, что имеет место хорошее соответствие между результатами расчета и экспериментальными данными из [1]. Отмеченный на графике диапазон относительной погрешности для экспериментальных точек составляет 5%.

Необходимо отметить, что возникновение кавитации зафиксировано при перепаде давления около $6 \cdot 10^6$ Па, что соответствует данным [1]. Как видно из рис. 6, начиная с перепада давления около $7 \cdot 10^6$ Па, расход горючего меняется слабо. Этот эффект зафиксирован и в экспериментах.

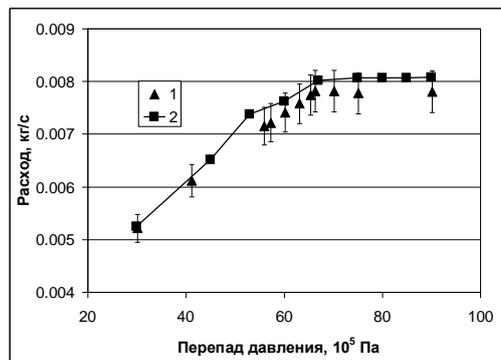
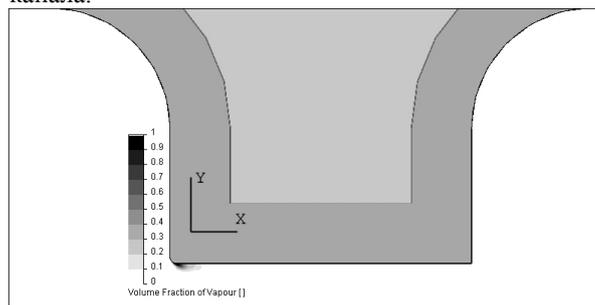
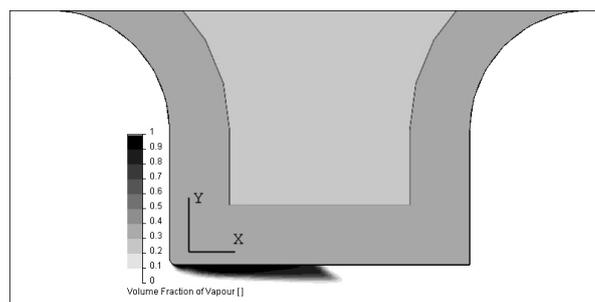


Рис. 6. Расходная характеристика дизельной форсунки: экспериментальные [1] — 1 и расчетные данные — 2.

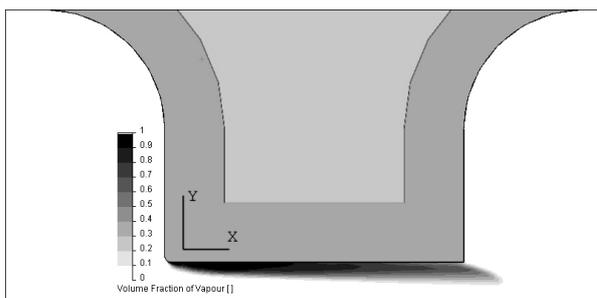
На рис. 7 представлены двумерные распределения объемной концентрации пара в дроссельном канале для трех режимов истечения с кавитацией. Области, где присутствует пар, на рисунках выглядят более темными. Каждый режим характеризуется большим перепадом давления в дросселе. Наименьшая кавитационная зона (рис. 7а) соответствует перепаду давления $6.7 \cdot 10^6$ Па. По мере снижения давления на выходе до 10^6 Па, длина кавитационной зоны растет (рис. 7б) и достигает конца дроссельного участка (рис. 7в). При этом область, в которой происходит кавитация, не перекрывает полностью поперечное сечение канала.



а) перепад давления $6.7 \cdot 10^6$ Па



б) перепад давления $7.5 \cdot 10^6$ Па



в) перепад давления $9 \cdot 10^6$ Па

Рис. 7. Объемная концентрация пара в кавитационной зоне при различных перепадах давления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное сопоставление результатов гидродинамического моделирования кавитационных течений технических жидкостей в форсунке и дроссельном канале с экспериментальными данными показало, что используемая модель кавитационных течений качественно и с хорошей точностью количественно позволяет проводить инженерный расчет кавитационных течений даже в тех случаях, когда данные о свойствах жидкости весьма ограничены.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

p — давление, Па;

ρ — плотность, кг/м³;

T_0 — температура среды, К;

p_0^E — давление насыщенного пара конденсирующегося

вещества при T_0 , Па;

M — молярная масса, кг/моль;

Y — массовая доля компонента в смеси;

$R = 8.31451$ — универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К.

Индексы:

L — параметры жидкости;

V — параметры пара;

E — параметры в состоянии насыщения;

I — параметры инертного растворенного газа;

air — параметры воздуха;

BX — параметры на входе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Winklhofer E., Kull E., Kelz E., Morozov A.** Comprehensive hydraulic and flow field documentation in model throttle experiments under cavitation conditions// ILASS-Europe annual meeting, 2001. P. 574 — 579.
2. **Stanley C., Rosengarten G., Milton B., Barber T.** Investigation of cavitation in a large-scale transparent nozzle// Proc. FISITA World Automotive Student Congress, 2008, F2008-SC-0014.
3. **Martynov S.**, 2005, Numerical Simulation of the Cavitation Process in Diesel Fuel Injectors. PhD thesis, University of Brighton, September 2005.
4. **Peng Karrholm F., Weller H., Nordin N.** Modelling Injector Flow Including Cavitation Effects for Diesel Applications. Proc. FEDSM2007 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference, July 30-August 2, 2007 San Diego, California USA.