

## Исследование динамики кавитирующей струи<sup>1</sup>

Болотнова Р.Х., Нурисламова Э.А.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

Исследование динамических процессов истечения вскипающей жидкости из сосудов высокого давления является одним из актуальных направлений научных исследований, связанных с обеспечением взрывобезопасности на промышленных объектах.

Вопросы истечения пароводяной смеси рассматривались в работах [1]–[3], в [1] исследовались процессы эволюции газовых струй с формированием дисков Маха и образованием вихревых колец. В [2] проводились эксперименты со струями вскипающей перегретой воды с использованием тонких цилиндрических каналов. В [3] исследовались режимы истечения вскипающего теплоносителя, вызванного торцевым разрывом трубопровода.

В настоящей работе в продолжение исследований [4], [5] разработана математическая модель двухфазной газожидкостной смеси в трехмерной постановке и выполнено численное исследование процесса формирования струи при истечении водяного пара из сосуда высокого давления через тонкое сопло для условий экспериментов [2].

Система модельных уравнений включает законы сохранения массы, импульса и энергии каждой фазы в соответствии с однодавленческим, двухскоростным и двухтемпературным приближениями, учитывает межфазное сопротивление, контактный теплообмен и массообменные процессы испарения и конденсации.

С использованием предложенной модели газожидкостной смеси, реализованной на основе открытого пакета OpenFOAM [6], численно исследовался процесс истечения в окружающую среду вскипающей струи водяного пара из сосуда высокого давления ( $p_0 = 9.45$  МПа,  $T_0 = 600$  К) через тонкое сопло радиуса  $R_s = 0.25$  мм и длиной  $X_s = 0.5$  мм [2].

Результаты численных исследований показали, что в расчетах, как и в эксперименте [2], наблюдается интенсивное расширение струи со сверхзвуковыми скоростями истечения. Вдоль границы расширяющейся сверхзвуковой струи формируется висячий скачок уплотнения, при отражении которого от оси симметрии происхо-

дит формирование прямого скачка уплотнения (диска Маха), являющегося пограничной зоной между областями сверхзвукового и дозвукового течений. Вдоль боковой границы струи формируется основной поток газа, который характеризуется также сверхзвуковым режимом истечения.

С течением времени по внешнему участку струи сверхзвуковой режим истечения сохраняется. Взаимодействие высокоскоростного потока с примыкающей к нему слабо возмущенной зоной приводит к искривлению траектории движения газа и развитию неустойчивости Кельвина–Гельмгольца [1], что сопровождается образованием и развитием вихревых зон, которые оказывают влияние на закручивание струи в сторону внешнего участка.

Формирование серии тороидальных вихрей вблизи оси симметрии в окружающую струю газе приводит к появлению осциллирующей формы основного струйного течения с сохранением полости внутри струи. С течением времени струйный поток в процессе взаимодействия с газовой областью образует в ней последовательную серию акустических волновых импульсов, имеющих периодическую структуру, которые могут являться источником пульсаций, наблюдаемых в экспериментах [2].

### Список литературы:

- [1] Ishii R., Fuji-moto H., Hatta N., Umeda Y. Experimental and numerical analysis of circular pulse jets // J. Fluid Mech. 1999. Vol. 392. P. 129–153.
- [2] Решетников А.В., Бусов К.А., Мажейко Н.А., Скоков В.Н., Коверда В.П. Переходные режимы вскипания струй перегретой воды // Т и А. 2012. Т. 19, № 3. С. 359–367.
- [3] Алексеев М.В., Вожаков И.С., Лежнин С.И., Прибатурин Н.А. Волновые процессы при истечении водяного теплоносителя со сверхкритическими начальными параметрами // Т и А. 2017. Т. 24, № 5. С. 821–824
- [4] Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф. Особенности формирования полой струи водяного пара сверхкритических параметров состояния, истекающего через тонкое сопло // Т и А. 2018. № 5. С. 783–789.
- [5] Болотнова Р.Х. Исследование динамики формирования полой струи при истечении пара из сверхкритического состояния // Многофазные системы. 2018. Т. 13, № 4. С. 73–78.
- [6] OpenFOAM. The Open Source Computational Fluid Dynamics (CFD) Toolbox. URL: <http://www.openfoam.com>.

<sup>1</sup>Работа выполнена при финансовой поддержке средствами государственного бюджета по госзаданию 0246-2019-0052