

УДК 532.52: 536.423

Генерация ударноволновых и вихревых структур при истечении струи вскипающей воды^{*}

М.В. Алексеев, С.И. Лежнин, Н.А. Прибатурин, А.Л. Сорокин

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: alekseev@itp.nsc.ru

Представлены результаты численного моделирования ударных волн и генерации вихревых структур при нестационарном истечении струи вскипающей жидкости. Проведено сопоставление особенностей эволюции ударных волн и формирования вихревых структур при нестационарном истечении вскипающей воды с соответствующими структурами при нестационарном истечении газа.

Ключевые слова: струя вскипающей жидкости, ударная волна, вихревые структуры.

Истечение вскипающей воды из сопел и каналов является теплофизическим процессом, в котором комплексно сочетаются явления взрывного парообразования, волновых процессов, развития неустойчивости при истечении струи в свободное пространство, запираания потока жидкости. Большая часть ранее проведенных исследований была посвящена определению расхода струи и условий перехода к критическому режиму истечения [1] и выполнялась для каналов малого диаметра. Также изучалась форма струи [2] для стационарных режимов истечения. Детальное изучение начальной стадии развития истечения не проводилось. Однако в первоначальный момент времени после начала внезапного истечения перегретой жидкости развиваются нестационарные волновые процессы, связанные со вскипанием воды как внутри, так и снаружи канала истечения [3]. Во внешнюю среду уходит нестационарная волна сжатия, из которой формируется ударная волна, внутрь трубы распространяется волна разрежения. После завершения волновых процессов формируется струя вскипающего теплоносителя.

Известно [4], что при истечении из сопла сверхзвуковой струи инертного газа в окружающем пространстве формируются вихревые структуры. Проведено большое количество экспериментальных исследований нестационарных сверхзвуковых струй, посвященных изучению многообразия сильных нелинейных эффектов при эволюции таких струй (например, [5]). Первый этап эволюции струи, известный как дифракция ударной волны на кромке, исследовался в течение длительного времени многими авторами (например, [6]). В этих работах изучались струи, формирующиеся за ударной волной, которая генерировалась в ударной трубе и/или в реактивной или взрывной камере. Первая ударная волна, проходящая через открытый конец трубы или сопла, дифрагирует на кромке трубы. На следующем этапе вторая ударная волна, генерирующая вихрь вблизи кромки сопла, как правило, распространяется в сторону оси струи и,

^{*} Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-29-00093).

наконец, формируется всякая ударная волна, замыкаемая движущимся диском Маха. На третьем этапе выстраивается ячеистая структура ударных волн, которая генерирует ниже по потоку от диска Маха сильную струю, ограниченную контактной поверхностью. Эта поверхность испытывает волнообразные деформации из-за неустойчивости Кельвина–Гельмгольца и в дальнейшем отвечает за генерацию второго вихря. На заключительном этапе квазистационарная ячейка ударных волн образуется около открытого конца и начинает генерировать автоколебания, излучая очень сильные волны давления, называемые «скрич» (screech) [7]. Детальное экспериментальное исследование структуры нестационарных ударных волн и образования вихревого кольца выполнялось в работе [8], было проведено сопоставление с результатами численного моделирования. Среди последних работ следует отметить [9], где проводилось численное моделирование вторичного вихревого кольца при истечении сверхзвуковой импульсной струи.

Целью настоящей работы является расчетное исследование нестационарного процесса истечения вскипающей жидкости из трубопровода в окружающую среду и сравнение ударно-волновых процессов и получаемых вихревых структур с соответствующими структурами при нестационарном истечении газа.

Моделирование процесса истечения осуществляется в следующей постановке. В начальный момент времени в длинном трубопроводе находится вода при высоком давлении, нагретая выше температуры насыщения, соответствующей окружающему атмосферному давлению. Происходит полный торцевой разрыв трубы. Из образовавшегося разрыва в окружающую атмосферу начинает истекать перегретая жидкость. Возникающие нестационарные процессы приводят к появлению ударно-волновых явлений и постепенному формированию струи вскипающей жидкости. Важную роль при этом играет процесс фазового перехода жидкость–пар, приводящий к интенсивному испарению жидкости и образованию двухфазной струи.

Для выполнения численного моделирования используется термодинамически неравновесная гомогенная модель [10] (двухтемпературная с одним давлением в пренебрежении скольжением фаз). В предположении осесимметричности течения система уравнений модели, описывающей процесс истечения, включает уравнения Эйлера, дополненные уравнением «производства» пара. Кинетика фазового перехода базируется на релаксационной модели, позволяющей учитывать влияние неравновесности. А именно, предполагается, что скорость роста локального массового паросодержания пропорциональна отклонению от его равновесного значения. При этом считается, что параметры паровой фазы (вследствие ее более высокой теплопроводности) соответствуют равновесию, а жидкой фазы — метастабильному состоянию. Время релаксации определено в работе [10] из экспериментальных данных как функция двух параметров: объемного паросодержания и относительного перепада давления — $(P_{SAT}(T) - P)/P_{SAT}(T)$. Так как в общем случае в зависимости от значений локальных параметров вода может находиться в недогретом, метастабильном или равновесном состоянии, то для расчета давления среды используется как равновесное, так и неравновесное приближения.

Для решения системы уравнений применялся пакет программ [11], в котором используется разностный монотонный консервативный метод коррекции потоков. Особенностью данного метода является отсутствие необходимости использования какой-либо модели турбулентности при моделировании нестационарных течений. Как показано в работе [12], прямое численное интегрирование системы газодинамических уравнений этим методом эквивалентно применению некоторой подрешеточной модели турбулентности.

Численное моделирование образования ударных волн при торцевом разрыве трубопровода в сопряженной постановке проводилось в расчетной области, где в стенке трубопровода располагался теплоноситель при начальном давлении P_0 (10–16 МПа) и температуре T_0 (270–300 °С), а внешняя среда имела начальное давление $P_a = 0,101$ МПа.

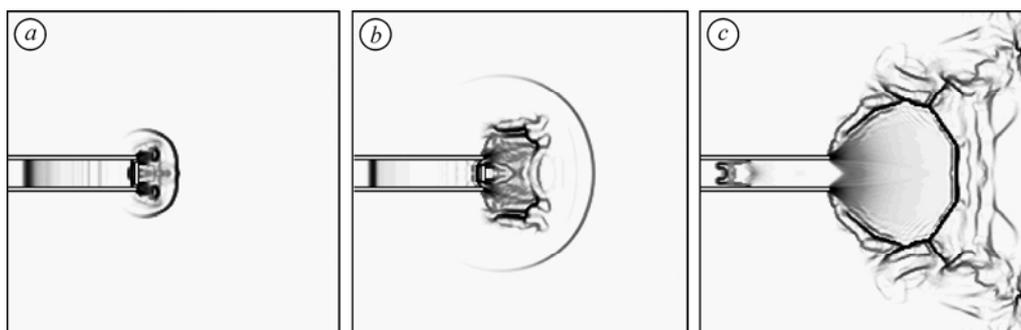


Рис. 1. Формирование структуры ударных волн и вихревых структур при истечении сверхзвуковой вскипающей струи (нормированный градиент плотности).

$D = 0,040$ м; $t = 0,3$ (a), $0,5$ (b), 2 (c) мс.

На всех границах внешней среды и на входе в трубу задавались граничные условия свободного втекания-вытекания, а на стенках трубы — условия скольжения и непротекания. При решении приведенной выше системы уравнений применялась равномерная расчетная сетка с шагом $0,1D$ (D — диаметр трубопровода, который принимался равным 40–250 мм).

Результаты расчета показали полную картину формирования ударных волн при истечении и образования вихревых структур на контактных границах двухфазная среда–окружающее пространство. На рис. 1 представлена эволюция нормированного градиента плотности при истечении вскипающей струи (черным показан максимальный градиент плотности). Во внешнем пространстве распространяется ударная волна, далее формируется бочкообразная структура с висячими скачками плотности, за которыми происходит образование вихрей. На рис. 2 представлен процесс формирования похожих структур при истечении сверхзвуковых газовых струй [8].

Из рисунков видно, что первичные ударно волновые процессы для истечения газовой и вскипающей струи подобны, их можно сопоставить при одинаковых отношениях диаметра сопла к скорости волны (временное подобие процессов). На больших временах при истечении вскипающей струи релаксационные процессы фазового перехода размывают картину ударных волн и вихревых структур. При сверхзвуковом истечении газовой струи появляются самоподдерживающиеся колебания с последующей генерацией вихрей, которые далее взаимодействуют между собой [9]. Подобный процесс генерации и взаимодействия вихрей проявляется и при истечении вскипающей струи. На рис. 3 представлена динамика изменения плотности (черным показана максимальная плотность)

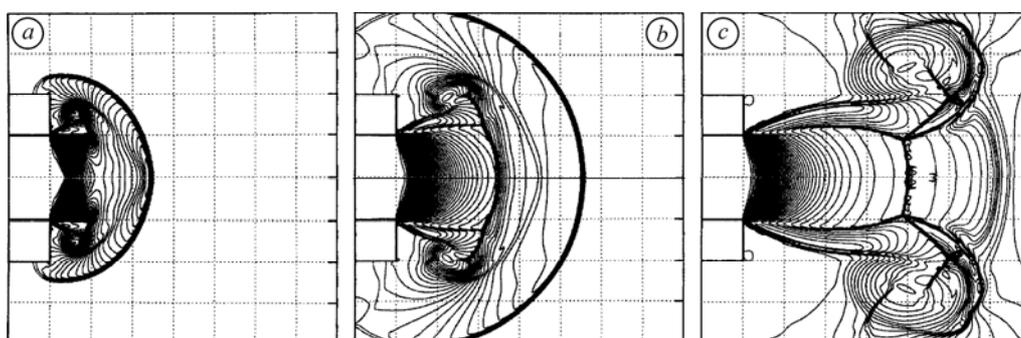


Рис. 2. Расчетная форма эволюции ударных волн и вихревых структур для сверхзвуковой газовой струи (изолинии плотности) [8].

$D = 0,020$ м; $t = 34$ (a), 74 (b), 224 (c) мкс.

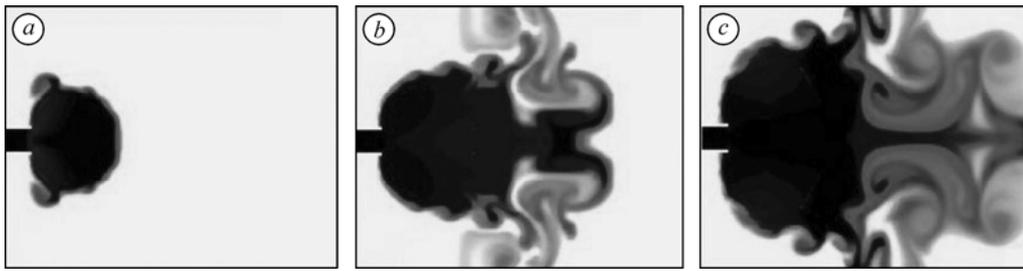


Рис. 3. Динамика изменения плотности во времени при истечении вскипающей струи.
 $D = 0,040$ м, $P = 3,1$ МПа, $T = 235$ °С; $t = 26$ (a), 78 (b), 156 (c) мс.

при истечении вскипающей струи на большем промежутке времени, чем на рис. 1. Как можно заметить на бочкообразной структуре фронта вскипания генерируются периодические вихреобразные структуры, которые далее взаимодействуют между собой.

Список литературы

1. Мальцев Б.К., Хлесткин Д.А., Келлер В.Д. Экспериментальное исследование истечения насыщенной и недогретой воды при высоких давлениях // Теплоэнергетика. 1972. № 6. С. 61–63.
2. Решетников А.В., Мажейко Н.А., Скрипов В.П. Струи вскипающих жидкостей // ПМТФ. 2000. Т. 44, № 3. С. 125–131.
3. Гофман Г.В., Крошилин А.Е., Нигматулин Б.И. Нестационарное волновое истечение вскипающей жидкости из сосудов // Теплофизика высоких температур. 1981. Т. 19, № 6. С. 1240–1250.
4. Elder F.K.JR., De Haas N. Experimental study of the formation of a vortex ring at the open end of a cylindrical shock tube // J. Appl. Phys. 1952. Vol. 23. P. 1065–1069.
5. Golub V.V. Development of shock wave and vortex structures in unsteady jets // Shock Waves. 1994. Vol. 3, No. 4. P. 279–285.
6. Abe A., Takayama K. Numerical simulation and density measurement of a shock wave discharge from the open end of a shock tube // JSME Int. J. Ser. 2, Fluids engineering, heat transfer, power, combustion, thermo-physical properties. 1990. Vol. 33, No. 2. P. 216–223.
7. Powell A., Umeda Y., Ishii R. Observation of the oscillation modes of circular choked jets // J. Acoust. Soc. Am. 1992. Vol. 92, No. 5. P. 2823–2836.
8. Ishii R., Fujimoto H., Hatta N., Umeda Y. Experimental and numerical analysis of circular pulse jets // J. Fluid Mech. 1999. Vol. 392. P. 129–153.
9. Zhang H., Chen Z., Li B., Jiang X. The secondary vortex rings of a supersonic underexpanded circular jet with low pressure ratio // Eur. J. of Mech. B/Fluids. 2014. Vol. 46. P. 172–180.
10. Downar-Zapolski P., Bilicky Z., Bolle L., Franco J. The non-equilibrium relaxation model for one-dimensional liquid flow // Int. J. Multiphase Flow. 1996. Vol. 22, No. 3. P. 473–483.
11. Boris J.P., Landsberg A.M., Oran E.S., Garder J.H. LCPFCT — flux-corrected transport algorithm for solving generalized continuity equations. NRL/MR/6410-93-7192. 1993.
12. Grinstein F.F., Fureby C. Implicit large eddy simulation of high-re flows with flux-limiting schemes // AIAA Paper. 2003. No. 2003-4100. AIAA CFD Conf. June, 23-26, 2003, Orlando, FL.

Статья поступила в редакцию 13 августа 2014 г.,
после доработки — 11 сентября 2014 г.