

*Н.А.Прибатурин¹, Ю.А.Безруков², М.А.Быков², С. Н. Краснов²,
В.М.Онишин², С.И.Лежнин¹, А.Л.Сорокин¹*

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия (1)

ФГУП ОКБ «Гидропресс», Подольск, Россия (2)

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУИ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ВСКИПАЮЩЕЙ ВОДЫ ПРИ РАЗРЫВЕ ТРУБОПРОВОДА

АННОТАЦИЯ

Проведены экспериментальные исследования по истечению вскипающей воды из отверстий диаметром 8–60 мм. Начальное давление воды в баке составляло 7–11,5 МПа, температура воды 160–235°C. Определены различные стадии формирования струи, скорость истечения и скорость вылета струи. Предложена расчетная модель квазистационарного истечения вскипающей жидкости, приведены расчетные данные по изменению плотности парожидкостной среды в струе.

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение истечения вскипающего теплоносителя из трубопроводов и сосудов является важной задачей энергетики. Основными исходными данными для расчета возможных динамических нагрузок на элементы трубопровода, защитных оболочек, устройств снижения давления являются скорость истекающего из разрыва теплоносителя, его расход, плотность образующейся парожидкостной струи. Имеется сравнительно большое количество экспериментальных работ по истечению вскипающей жидкости из каналов различной длины. Так, например, при истечении через короткие каналы подтверждено неравновесное поведение теплоносителя [1-6]. Для нагретой воды основная масса опытов проведена в диапазоне начальных давлений от 2 до 24 МПа. При этом в силу лабораторного характера работ диаметр канала, через который происходило истечение, составлял малое значение 0,5 – 3,5 мм. Расход теплоносителя через канал хорошо соответствует гидравлическому режиму истечения жидкости из сосуда под действием постоянного перепада давления. При больших начальных давлениях происходило взрывное вскипание воды и запирание канала. Как показано в работах [2-4], это связано с достижением предельных перегревов жидкости и существенной перестройкой структуры течения. В этом случае достигаются режим взрывного гомогенного вскипания жидкости на центрах парообразования флуктуационной природы [2] и критическое запирание канала. Как показано в работах [2,5], такой режим наступает при начальной температуре жидкости $T_0 \geq 0,9T_{кр}$, причем для воды в силу особенности ее кинетики вскипания коэффициент уменьшается до 0,75. Проведенные исследования также показали влияние степени начального недогрева воды до состояния насыщения, определяемого

по начальному давлению, на скорость истечения. Зависимость расхода недогретой воды от начального давления при сохранении постоянной начальной температуры воды практически линейная. Форма струи вскипающего теплоносителя существенно изменяется в зависимости от значения начального перегрева жидкости. Так, по данным работы [2], полученным на каналах с диаметром 0,5 мм, стержневой вид струи сменяется коническим и затем параболическим. Отмечается, что при малых перегревах воды ($T_0 = 150^\circ\text{C}$) струя не отличается от струи невскипающей жидкости. Коническая форма с углом раскрытия 90° возникает при $T_0 = 200^\circ\text{C}$. Полный развал струи вскипающей воды происходит только при достижении предельных перегревов воды ($T_0 > 215^\circ\text{C}$), в этом случае угол раскрытия струи достигает 180 градусов, а ее форма становится параболической.

Отметим, что все выполненные экспериментальные исследования соответствуют уже установившемуся течению, исключают фазу формирования струи и получены для каналов малого размера. Целью данной работы было исследование формирования истечения вскипающей воды через каналы диаметром до 60 мм и создание расчетных моделей истечения.

2. МЕТОДИКА И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1. Условия экспериментов

Экспериментальное исследование истечения горячей воды осуществлялось из баков объемом 5 и 130 литров через патрубки диаметром 8, 20, 25, 40 и 60 мм. Начальное давление воды в баке изменялось от 7 до 11,5 МПа, температура воды изменялась от 105 до 235°C. Формирование течения происходило при разрыве диафрагмы, первоначально полностью закрывающей торец патрубка. Для тестирования методов измерения и обработки получаемых данных были также проведены опыты по истечению холодной воды из бака через патрубки указанных диаметров, температура воды составляла 20°C, а давление изменялось от 0,5 до 14,5 МПа.

Методика изучения течения базировалась на применении скоростной цифровой кино съемки и последующей цифровой обработки полученного изображения.

2.2. Основные результаты

На рис. 2.1. приведена p - T -диаграмма воды, на которой отмечены все начальные состояния опытов, линия насыщения, критическая точка и спинодаль. Разрыв диафрагмы приводил к падению давления жидкости от начального значения до атмосферного. Условия взрывного вскипания жидкости [6] не достигались для всех серий опытов.

Типичная картина формирования струи истекающей горячей воды из короткого патрубка приведена на рис. 2.2. На рис. 2.3 приведена квазистационарная форма струи вскипающей воды, образующаяся после окончания формирования истечения. Как правило, этой формы струя достигала через 20 – 25 мс (в зависимости от диаметра канала патрубка) после начала истечения. При изменении диаметра патрубка в пределах 20 – 60 мм картина истечения в обоих случаях не изменялась. На рис. 2.2, 2.3 приведены также некоторые результаты цифровой обработки получаемых изображений – выделение контурных линий с псевдораскрашиванием и выделение зон с максимальным изменением градиента освещенности. Первая обработка позволяет четко выделить внешние границы струи и границы изменения плотности в струе, а вторая качественно показывает характерное развитие возмущений как внутри струи в начальный момент времени, так и на ее поверхности в более поздние моменты времени. Сопоставляя результаты опытов проведенных для холодной и горячей воды, можно отметить вывод о том, что в первый момент времени, определяемый длительностью порядка 1 – 1,5 мс существенной разницы между выбросом жидкости из патрубка не существует. Дальнейшее развитие истечения вызывает различную эволюцию струй холодной и горячей жидкости.

Анализ результатов всех проведенных опытов показывает, что в процессе истечения горячей воды можно выделить три характерные стадии. Первая стадия связана с формированием движения жидкости непосредственно сразу же после разрыва диафрагмы. Эта стадия характеризуется высокой скоростью вылета жидкости из патрубка и сильной неравновесностью. Средняя осевая скорость вылета струи на этом интервале времени составляет высокие значения и по результатам обработки всех опытов изменяется от 150 до 300 м/с в зависимости от диаметра патрубка и начального перепада давления. Обобщенный график изменения скорости струи в зависимости от диаметра насадка приведен на рис. 2.4. Измеренная в опытах скорость здесь приведена к безразмерному виду путем деления на гидравлическую скорость истечения. Как видно, наблюдается устойчивый рост скорости струи при увеличении диаметра патрубка. График на рис. 2.4 показывает также, что в начальный момент времени скорости вылета из насадка горячей и холодной жидкостей практически совпадают. При уменьшении диаметра канала скорость струи уменьшается и для малых диаметров каналов (8 мм) стремится к предельной гидравлической скорости истечения.

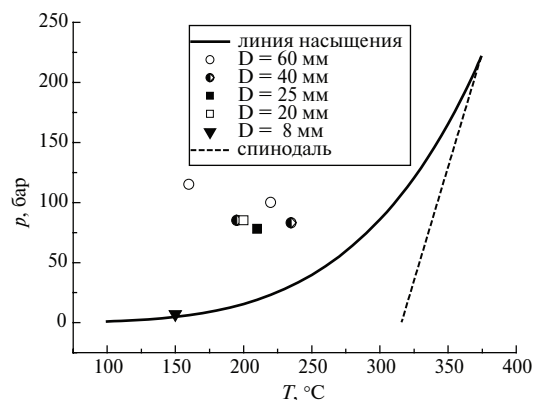


Рис. 2.1. p - T -диаграмма рабочих точек

Вторая стадия связана с взрывным характером развала струи. Через 3 – 4,5 мс после начала истечения происходит резкое и многократное увеличение объема струи. Развал струи происходит за время порядка 1 -1,5 мс. На взрывной характер этого явления указывает и тот факт, что разлет жидкости происходит не только по ходу истечения и в боковые стороны, но и против основного потока.

Сразу же по окончании взрывного разлета струи наступает третья фаза истечения, при которой формируется устойчивая форма струи истекающей вскипающей жидкости. Это формирование заканчивается через 16 – 20 мс после разрыва диафрагмы. В этот момент происходит полное раскрытие струи, угол в основании раскрытия составляет 180 градусов, формируется параболическая форма струи.

3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Анализ истечения вскипающей жидкости из насадка показал, что в зависимости от начальных параметров горячей жидкости, первоначально находящейся в сосуде, возможны три различных режима истечения:

а) «истечение несжимаемой холодной воды» (или гидравлический режим). Реализуется при температуре воды $T_0 \leq 373$ К, когда нет парообразования. Скорость истечения при этом определяется гидравлической формулой Бернулли;

б) «истечение слабо недогретой воды».

При давлении и температуре жидкости, находящейся в сосуде удовлетворяющих неравенствам $p_a < p_{SAT}(T_0) \leq p_0$, $T_0 > 373$ К давление в окрестности отверстия истечения резко падает до давления насыщения $p_{SAT}(T_0)$ после чего начинается парообразование. Скорость образующегося потока равна значению местной скорости звука в парожидкостной смеси на срезе насадка;

в) «истечение сильно недогретой воды».

При выполнении условия

$$(p_0 - p_{SAT}(T_0)) > \frac{\rho_2^2(T_0)r^2(T_0)}{2\rho_1(T_0)C_1(T_0)T_0}$$

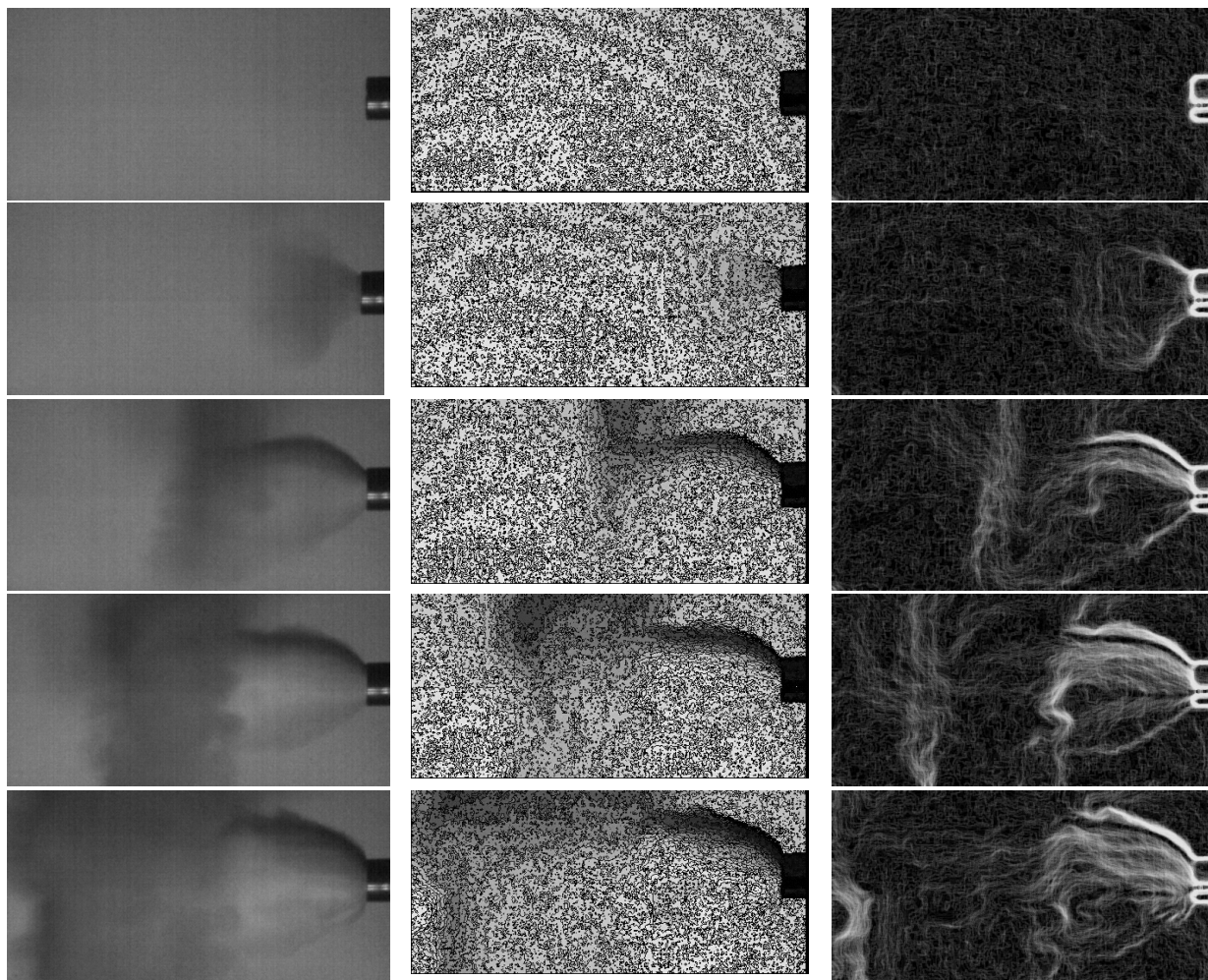


Рис. 2.2. Формирование истечения вскипающей воды из насадка. Исходное изображение слева, $D_0=40\text{мм}$, $p_0=8,3\text{ МПа}$, $T_0 = 235^\circ\text{C}$, время между кадрами 0,5 мс

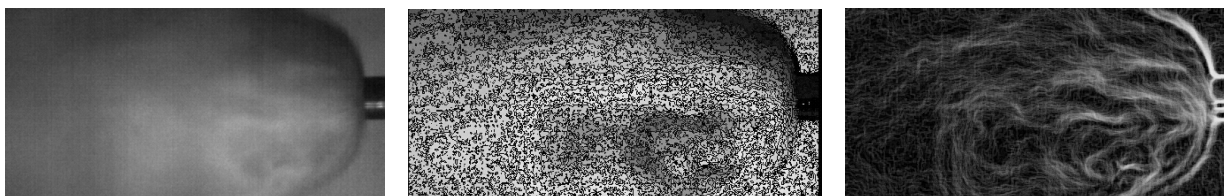


Рис. 2.3. Установившаяся форма струи вскипающей воды. Исходное изображение слева, $D_0=40\text{мм}$, $p_0=8,3\text{ МПа}$, $T_0 = 235^\circ\text{C}$

парообразование в сосуде до среза насадка истечения невозможно, а давление жидкости на срезе истечения равняется давлению насыщения при начальной температуре жидкости в баке $p_{SAT}(T_0)$. При этом скорость теплоносителя на срезе определяется формулой

$$u_1 = \sqrt{\frac{2(p_0 - p_{SAT}(T_0))}{\rho_1(T_0)}}.$$

Внутренняя энергия потока на срезе сечения истечения есть внутренняя энергия чистой жидкости, находящейся на линии насыщения:

$$U = W_1 - p\tilde{V} = W_1 - \frac{P}{\rho_1}.$$

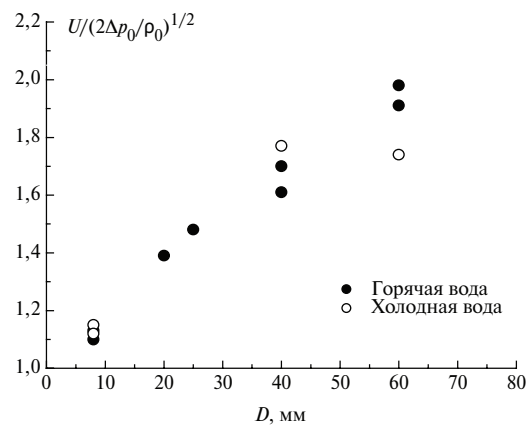


Рис. 2.4. Начальная скорость вылета струи

Здесь и далее r – удельная теплота фазового перехода, U – внутренняя энергия, W – энтальпия, индекс «1» – жидкость, «2» – пар.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что за расчетную схему квазистационарного истечения вскипающей жидкости из насадка можно принять следующую схему – рис.3.1. На срезе насадка истечения возникает граница перехода от течения жидкости к течению парожидкостной среды. Давление на границе равно давлению насыщения, соответствующему температуре жидкости $p_{SAT}(T_0)$. Давление в баке с горячей жидкостью вдали от сечения истечения равно начальному давлению p_0 . Истечение происходит в атмосферу с давлением p атм. Состояние парожидкостной среды, возникающей за сечением истечения, соответствует термодинамическому равновесию (локальное давление в каждой точке соответствует давлению насыщения, определенному по локальной температуре смеси в каждой точке).

В основу расчетного моделирования струи вскипающей жидкости была положена модель идеальной сжимаемой жидкости. Система уравнений движения, неразрывности, энергии замыкалась уравнением состояния смеси как зависимости давления P от плотности ρ и от удельной внутренней энергии U : $p = p(\rho, U)$. Уравнение состояния в этой форме неявно определялось через зависимость $U(p, \rho)$ на линии насыщения:

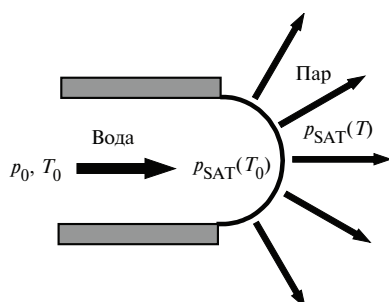


Рис. 3.1. Схема истечения вскипающей жидкости из короткого насадка

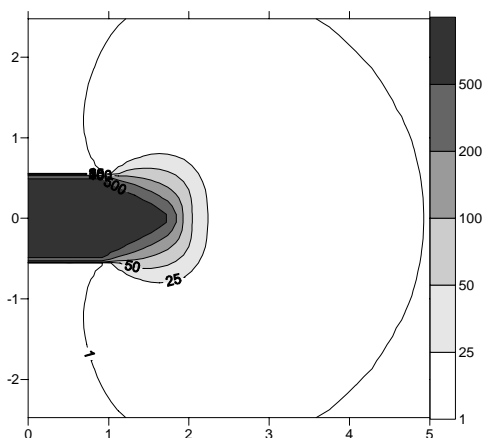


Рис. 3.2. Изолинии равной плотности в струе истекающей вскипающей воды, $D_0=40$ мм, $p_0=8,3$ МПа, $T_0=235^\circ\text{C}$

$$U = F_1(p) + F_2(p)/\rho,$$

где

$$F_1(p) = W_1(p) - \frac{r(p)/\rho_1(p)}{1/\rho_2(p) - 1/\rho_1(p)},$$

$$F_2(p) = \frac{r(p)}{1/\rho_2(p) - 1/\rho_1(p)} - p.$$

При выполнении расчетов ставилось условие осевой симметрии, а на всех свободных границах – условие свободного втекания-вытекания. Граничные условия на срезе насадка определялись по результатам предварительного анализа режима истечения и не зависели от времени. Расчеты проводились до установления квазистационарного течения. На рис. 3.2 приведен пример расчета плотности смеси в струе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены опыты по исследованию истечения нагретой воды, первоначально находящейся под давлением в баке большого объема, через короткие каналы диаметром 8 – 60 мм в диапазоне начальных давлений 0,6 – 11,5 МПа и температур воды 20 – 235°C. Зафиксирован процесс формирования истечения холодной и горячей воды, эволюции формы струи. Определены характерные скорость струи, длительности различных фаз течения, размеры струи.

Предложена модель для расчета параметров установившегося истечения вскипающей жидкости из коротких каналов.

Авторы благодарны В.Г. Меледину (ИТ СО РАН) за цифровую обработку изображений. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 05-08-50169.

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. 41. № 3. С. 125 – 132.
3. Хлесткин Д.А., Канищев В.П. Характерные режимы истечения горячей воды // Теплоэнергетика. 1977. № 8. С. 69–71.
4. Хлесткин Д.А., Коршунов А.С., Канищев В.П. Определение расходов воды высоких параметров при истечении в атмосферу через цилиндрические каналы // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1978. № 5. С. 126–135.
5. Решетников А.В., Исаев О.А., Скрипов В.П. Расход вскипающей жидкости при истечении в атмосферу. Переход от модельного вещества к воде // ТВТ. 1988. Т. 26. № 4. С. 774–777.
6. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии // В.П. Скрипов, Е.Н. Синицын, П.А. Павлов и др. М.: Атомиздат, 1980.