

РЕАКТИВНАЯ СИЛА СТРУИ ПЕРЕГРЕТЫХ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ЧЕРЕЗ ЩЕЛЕВОЙ КАНАЛ

К.А. Бусов, А. В. Решетников, Н.А. Мажейко

Институт теплофизики Уральского отделения РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул.

Амундсена 106, Россия, kbusov@mail.ru

Аннотация

Обсуждаются результаты экспериментального изучения характеристик вскипающих жидких струй – форма струи и ее реактивная сила, при истечении через короткий щелевой канал. В качестве исследуемых жидкостей использовались вода, этанол, водный раствор этанола. Исследования проводились при начальных параметрах (температура, давление) соответствующих линии насыщения и при фиксированном давлении. В данной работе не выявлены кризисные явления в эволюции формы струи и изменении реактивной тяги струй перегретых жидкостей, истекающих через короткий щелевой канал.

Введение

Струи вскипающих жидкостей находят применение в различных областях деятельности человека. В энергетике используются теплоносители с высоким содержанием энтальпии, которая высвобождается при возникновении аварийных ситуациях, связанных с разгерметизацией энергетических установок. Также вскипание перегретых жидкостей [1] находит применение как высокоэффективный способ для мелкодисперсного распыления различных веществ и топлив. Экспериментальные исследования показали, что с увеличением степени перегрева жидкости происходит смена механизмов парообразования в струе горячей жидкости, которая приводит к существенным изменениям характеристик и структур потока [2-6]. Одной из важных характеристик потока является реактивная отдача струи перегретой жидкости при истечении из сосудов высокого давления через каналы, имеющие различную геометрическую форму.

Результаты и обсуждения

В экспериментальных исследованиях динамических характеристик вскипающих струй, истекающих через короткий цилиндрический канал, был обнаружен кризис формы струи жидкости (полный развал) и, как следствие, кризис ее реактивной отдачи (резкое уменьшение реакции струи до нулевых значений). Кризисные явления наблюдались для таких жидкостей как вода, н-пентан, фреон, этанол, водный раствор этанола, водный раствор глицерина и др. [7,8]. Обнаруженное кризисное поведение потока поставило вопросы о возможностях устранения такого поведения параметров истекающей среды.

На основании проведенных исследований с различными жидкостями было выяснено, что их кризисное истечение становилось возможным при выполнении двух условий: реализации в потоке взрывного вскипания и наличии прилегающей плоскости за выходным срезом канала, благодаря которой происходил захват струи и растекание двухфазного потока вдоль этой плоскости (эффект Коанда). Таким образом, для минимизации или подавления кризисных явлений можно воздействовать на кинетику парообразования (например, добавить в исследуемую жидкость другую жидкость с более высокой температурой кипения) или изменить геометрические условия за выходным срезом канала, из которого происходит истечение, либо выбрать рабочий канал с другой (не цилиндрической) геометрией.

Опыты показали, что кризисные явления не проявляются при использовании короткого щелевого канала шириной 4мм и высотой 0,15мм. Внешняя геометрия за щелевым каналом, благодаря которой струя жидкости захватывалась и растекалась в радиальном направлении после прохождения через короткий цилиндрический канал, была сохранена без изменений. При истечении исследуемых веществ (вода, водный раствор этанола, этанол) через короткий щелевой канал с острой кромкой наблюдалась инверсия формы струи. Если щелевой канал был ориентирован горизонтально, то струя раскрывалась с большим углом в вертикальной плоскости. Угол раскрытия струи изменялся с увеличением температуры. В горизонтальной плоскости угол расширения струи практически не менялся с ростом температуры и был равен $\sim 20^\circ$. В процессе наблюдения и фотографирования струй перегретых жидкостей прослеживалась эволюция формы струи от степени перегрева. Ниже описаны формы струй жидкостей, прошедших через короткий щелевой канал при начальных параметрах (температура, давление) соответствующих линии насыщения.

В опытах по истечению струй перегретой воды в температурном интервале от $T_{0s}=383$ К до $T_{0s}=573$ К можно было наблюдать различную форму и структуру струи рис.1.

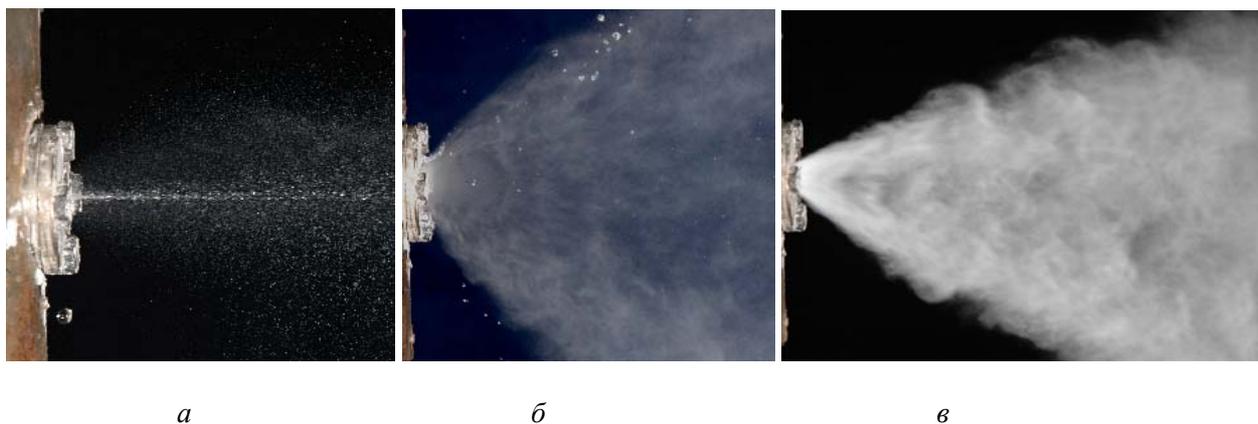


Рис.1. Форма струи перегретой воды при истечении через щелевой канал: *а)* $T_{0s} =393$ К, *б)* $T_{0s} =438$ К, *в)* $T_{0s} =553$ К.

Так при небольшом перегреве воды (до 293 К) истекающая струя имела капельную структуру (рис.1.*а*). Такое распыление струи на капли обусловлено как гидравлическим диспергированием через узкую щель, так и слабоинтенсивными фазовыми превращениями. С повышением температуры происходит более интенсивное испарение с поверхности струи, поэтому жидкая фаза постепенно сменяется паровой. Жидкостный след внутри паровой области наблюдается до температуры $T_{0s}=413$ К. В температурном диапазоне $T_{0s}=413 - 428$ К, когда жидкостная сердцевина полностью отсутствует, по границам струи видны крупные капли, которые уменьшаются с дальнейшим увеличением температуры и не наблюдаются при температуре $T_{0s}>473$ К (рис.1.*б*). Из фотографий также можно увидеть, как меняются очертания верхней и нижней границ вскипающей струи с ростом температуры. До $T_{0s}<513$ К границы довольно четкие, имеющие небольшие возмущения. При более высокой температуре повышается интенсивность парообразования, вследствие чего наблюдается увеличение возмущений на границах потока (рис.1.*в*). Вблизи выходного среза канала поток имеет четкие границы.

Эксперименты по истечению струй перегретого 50% водного раствора этанола проводились в температурном интервале от $T_{0s}=373$ К до $T_{0s}=553$ К. Как и для воды, при небольших перегревах, наблюдается истечение водного раствора этанола в виде жидкой фазы, состоящей из мелких капель.

Жидкостная сердцевина видна до температуры $T_{0s}=393$ К. Капли на границе потока остаются видимыми до температуры $T_{0s}=503$ К.

Исследование формообразования струи перегретого этилового спирта проводилось в температурном диапазоне от $T_{0s}=373$ К до $T_{0s}=513$ К (рис.2).

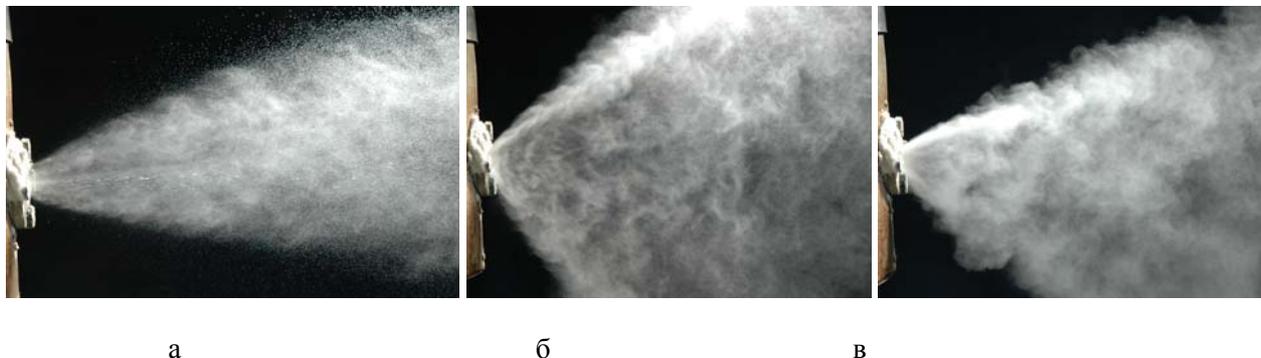


Рис.2. Фотографии струй вскипающего этанола при истечении через короткий щелевой канал (начальные параметры (температура, давление) соответствуют линии насыщения). а) $T_{0s} = 393$ К; б) $T_{0s} = 443$ К; в) $T_{0s} = 493$ К.

До $T_{0s}=393$ К имело место мелкодисперсное гидродинамическое распыление этанола (рис.2.а). С дальнейшим ростом температуры и, следовательно, при более интенсивном испарении с поверхности струи, жидкостная фаза постепенно исчезала. При $T_{0s}=408$ К на фотографиях виден жидкостный след в виде капель. На обеих границах потока просматриваются очень мелкие капли. Начиная с температуры $T_{0s}=443$ К (рис.2.б) происходит прилипание нижней границы потока к внешним примыкающим поверхностям за каналом. Для данной температуры капли остаются видимыми только около нижней части струи. При дальнейшем перегреве, капли уменьшаются в размере и постепенно пропадают из вида. Полное исчезновение мелких капель происходит при температуре $T_{0s}=473$ К. С дальнейшим повышением температуры изменяется вид границ потока, которые становятся все более неровными из-за возросшей интенсивности парообразования (рис.2.в). С ростом перегрева возмущения на границах струи увеличиваются и смещаются в сторону выходного среза канала.

Опытные данные, полученные при измерении реактивной отдачи струй перегретых жидкостей, как с линии насыщения, так и при постоянном давлении показаны на рис.3.

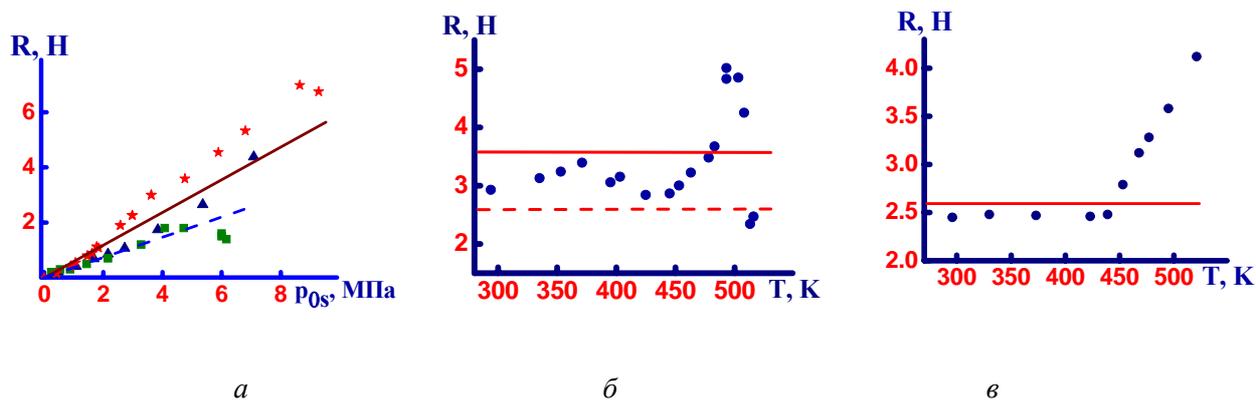


Рис.3. а) Изменение реактивной отдачи струй перегретых жидкостей с увеличением давления на бинодали: вода (звездочки); 50% водный раствор этанола (треугольники); этанол (квадратики); б) Изменение реактивной отдачи струи перегретого этанола с ростом температуры при фиксированном давлении $p_{0s}=6$ МПа; в) Изменение реактивной отдачи струи перегретой воды с ростом температуры при фиксированном давлении $p_0=4.5$ МПа. Прямая и пунктирная линии на графиках – гидравлическое и газовое приближения соответственно.

Как видно из рисунка, реактивная сила струи 50% водного раствора этанола описывается вначале газовым приближением до давления $p_{0s}=4$ МПа (рис.3.а). При более высоком давлении происходит переход от газового режима течения к гидравлическому. Этот переход от одного режима течения к другому, по-видимому, связан с тем, что для легкокипящего компонента (этанола) значения давления и температуры приближаются к термодинамическим критическим. Газовым приближением описывается истечение чистого этанола до приближения к критической точке. Экспериментальные данные, полученные для воды, соответствуют гидравлическому расчету лишь до $p_{0s}=2$ МПа ($T_{0s}=483$ К). При дальнейшем росте давления вдоль линии насыщения наблюдается увеличение реактивной отдачи струи по сравнению с истечением холодной жидкости.

В опытах также была прослежена эволюция струй жидкостей (вода, этанол, 50% водный раствор этанола), истекающих из короткого щелевого канала при фиксированном давлении, и измерена их реактивная тяга. Истечение этанола и водного раствора этанола происходило при постоянных давлениях $p_0=4$ МПа и $p_0=6$ МПа (рис.3.б.), воды - $p_0=3$ МПа и $p_0=4.5$ МПа (рис.3.в.). Формы струй истекающих жидкостей при постоянном давлении имели менее возмущенные границы. При небольших перегревах наблюдались абсолютно четкие и почти линейные границы потока.

Помимо изменений в формообразовании потока, проведенные эксперименты указали на некоторые особенности в поведении реактивной отдачи струи исследованных жидкостей при истечении при постоянном давлении: рост величины реактивной силы, начиная с некоторой температуры (различной для разных жидкостей).

Заключение

Таким образом, в проведенных экспериментах со вскипающими жидкостями, истекающими через короткий щелевой канал при внешних геометрических условиях, соответствующих кризисному поведению струи перегретой жидкости, истекающей через короткий цилиндрический канал [6-8], кризисных явлений в поведении формы струи (полный развал) и ее реактивной отдачи обнаружено не было.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 11-08-00002-а.

Литература

1. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. М.: Наука. 1972. 312 с.
2. A. Wildgen and J. Straub. The boiling mechanism in superheated free jets// Int. J. Multiphase Flow. 1989. V. 15. № 2. pp. 193-207.
3. Polanco G., Hold A. E. and Munday G. General review of flashing jet studies // J. Hazardous Materials. 2010. no.173. pp. 2-18.
4. Решетников А.В., Мажейко Н.А., Скоков В. Н., Коверда В. П. Неравновесные фазовые переходы в струе сильно перегретой воды // ТВТ. 2007. Т. 45. № 6. С.838 -846.
5. Решетников А.В., Мажейко Н.А., Виноградов А.В., Бусов К.А., Коверда В.П. Динамические характеристики вскипающих струй перегретых водных растворов // Теплоэнергетика. 2010. №8. С.69-73.
6. Решетников А.В., Мажейко Н.А., Бусов К.А., Коверда В.П., Роевко В.В. Кризисные явления в струе вскипающих водных растворов // Труды пятой Российской национальной конференции по теплообмену РНКТ-5. Москва, 25 - 29 октября 2010. Т.4. С.153-156.