

ОСОБЕННОСТИ КРИТИЧЕСКОГО ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В РАЗРЕЖЕННУЮ СРЕДУ

А.Г. Коченков, В.Г. Тонконог

Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментального исследования низконапорного истечения вскипающей воды в плоских соплах с начальным давлением 80 кПа и противодавлением в диапазоне 8 – 72 кПа. Показано определяющее влияние турбулентных вихрей на механизм зарождения паровой фазы и расходные характеристики двухфазного потока. Установлено влияние режимных параметров и геометрии сопла на процесс образования вихрей. Предложены критериальные уравнения для определения частоты зарождения вихрей и критического расхода жидкости в плоских соплах при низконапорном истечении жидкости.

1. ВВЕДЕНИЕ

Движение жидкости с фазовыми превращениями является одним из разделов гидро- и термодинамики гетерофазных потоков и представляет существенный практический интерес для различных отраслей энергомашиностроения: ядерная и традиционная энергетика, авиа- и ракетостроение, переработка углеводородов и др. Прогнозирование безопасной и управляемой работы энергооборудования, проектирование систем подготовки технических жидкостей требует знания условий формирования гетерофазного потока, структуры потока и его характеристик.

Исследованию течения с фазовыми превращениями уделяется достаточно много внимания. При этом в подавляющем числе работ рассматриваются гетерофазные среды, образующиеся в следствии истечения жидкости из состояний характеризующихся высокими начальными параметрами [1 – 5]. В меньшей степени исследовано “низконапорное истечение жидкости” с фазовыми превращениями, с начальным давлением равным или менее атмосферного. В единичных работах по низконапорному истечению [6, 7] отмечается, что существующие методики для определения критического расхода жидкости высоконапорных потоков, не пригодны для случая низконапорного истечения. Одной из причин данного явления называется различие в механизмах зарождения паровой фазы, и, как следствие, различие в структурных формах потока в том и другом случаях.

Целью данной работы является определение режимов течения двухфазных сред, локальных и интегральных характеристик потоков.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Исследования проводились на стенде, выполненном по схеме разомкнутого расходного контура (рис. 1). Стенд состоит из следующих элементов: расходного бака с нагревателями, средств измерения температуры, расхода, давления, рабочего участка с исследуемым каналом, сепаратора и вакуумного насоса РВН - 75. Рабочий участок стенда позволяет устанавливать плоские и осесимметричные каналы и выполнять фото- и видеорегистрацию потока.

Объектом исследований являлись плоские, горизонтально ориентированные, сопла. Длина сужающейся части всех сопел с углом раствора 30° была одинакова и составляла 20 мм. Геометрия расширяющейся части каналов представлена в таблице 1.

Таблица 1

Номер сопла	Высота*ширина минимального сечения, мм	Угол раствора, α , град	Степень расширения
1	2*4	6	8
2	2*4	12	17
3	2*4	12	27
4	2*4	17	27

В качестве рабочей жидкости использовались дистиллированная вода. При видеосъёмке для усиления контрастности изображения в воду добавлялся краситель - перманганат калия в количестве 0,05 гр/литр. В тестовых опытах влияние добавок перманганата калия на характеристики и структуру потока не обнаружено.

В экспериментах на вход в канал поступала капельная жидкость (объёмное паросодержание $\varphi=0$). Начальное давление p_0 в опытах поддерживалось на уровне 80 ± 3 кПа. Начальная температура жидкости t_0 задавалась различной в диапазоне $3 - 70$ °С, противодействие p_1 за срезом канала изменялось в диапазоне $8 - 72$ кПа.

3. СТРУКТУРА ПОТОКА

При задаваемых в опытах режимных параметрах выявлены три основные структурные формы потока. Определяющим условием реализации той или иной структурной формы является относительный перепад давлений $\beta = p_1/p_0$. При истечении жидкости через сопло в разреженную среду с $\beta > 0,65 - 0,7$ в расширяющейся части происходит отрыв потока от верхней образующей, наблюдается расслоённое волнообразное движение жидкости вдоль нижней образующей (рис. 2а я). По мере уменьшения β точка отрыва потока смещается к срезу сопла.

При уменьшении β до значений равных $0,65 - 0,7$ во всём тракте канала, за исключением области горла, наблюдается сплошной поток капельной жидкости. В области горла на образующих сопла образуются отрывные зоны (рис. 2б). В сопле с углом раствора 60° наблюдались две отрывные зоны, по одной у каждой образующей. Они имеют плоскую вытянутую форму и занимают незначительную часть площади поперечного сечения. В соплах с большим углом раствора одна из отрывных зон может вырождаться. Аналогичные сведения о вырождении второй отрывной зоны в соплах с углом раствора более 10° содержится в [8]. В отрывных зонах поочередно генерируются вихри и вследствие этого процесса происходят колебания центральной капельной струи от одной образующей сопла к другой (рис. 3). В опытах наблюдался периодический срыв вихрей из отрывных зон. Вследствие колебания центрального потока жидкости, периодического отрыва вихрей из отрывных зон и их уноса течение жидкости имеет нестационарный периодический характер. Разворот сопла на 90° вокруг оси не повлиял на расход жидкости и частоту образования вихрей. Влияние массовых сил сказывалось только на размерах отрывных зон и образующихся в них вихрях. Уменьшение β до величины, менее $0,6 - 0,65$ приводит к появлению в ядре вихрей вращающихся паровых кластеров, состоящих из одного большого парового фрагмента и группы малых пузырёй, окружающих его (рис. 2б).

При противодействиях превышающих давление насыщения $p_s(t_0)$ на $3 - 5$ кПа, в расширяющейся части сопла за минимальным сечением на стенках образуется паровая фаза. За горлом сопла наблюдается ярко выраженный фронт испарения (рис. 2в), который совершает колебательные движения от одной образующей к другой. За фронтом испарения наблюдается развитый двухфазный поток. На некотором удалении от горла происходит конденсация паровой фазы с образованием фронта конденсации (рис. 2в), за которым имеет место поток капельной жидкости с вихрями. В ядрах вихрей чётко прослеживаются паровые кластеры. При дальнейшем уменьшении противодействия положение фронта конденсации смещается к срезу сопла. Истечение жидкости с противодействием менее давления насыщения характеризуется тем, что за фронтом испарения наблюдается развитый дисперсный двухфазный поток (фрагменты жидкости различных размеров рассредоточенных в паровой фазе). Центральная струя жидкости совершает колебательное движение, сопровождающееся прилипанием жидкости к образующим сопла (рис. 4а). Вследствие фазовых переходов и динамической неустойчивости струи жидкости за горлом сопла происходит образование неоднородного дисперсного двухфазного потока. Одновременно на образующих сопла имеет место пленочное течение жидкости. По мере уменьшения противодействия и снижения начального недогрева толщина пристеночной плёнки жидкости уменьшается (рис. 4б).

Таким образом, при истечении жидкости в разреженную среду можно выделить три основные структурные формы:

- Расслоенная структура – при $\beta > 0,65 - 0,7$;
- Вихревая структура – при $\beta \leq 0,65 - 0,7$, но при $p_1 > p_s(t_0)$;
- Развитый двухфазный поток – при противодавлении $p_1 \leq p_s(t_0)$.

4. КРИТИЧЕСКИЙ РАСХОД ЖИДКОСТИ

В опытах установлен критический режим истечения жидкости характеризующийся постоянным значением расхода при различных противодавлениях (рис. 5). Критический режим истечения реализуется при $\beta < 0,65 - 0,7$, что согласуется с результатами [7]. Из совместного анализа экспериментальных данных по расходу и структуре потока установлено, что критическому режиму истечения жидкости соответствуют вихревая структура и структура развитого двухфазного потока. Докритический режим истечения характеризуется расслоенной структурой потока.

При критическом режиме истечения сечение (область потока) лимитирующее расход располагается за горлом сопла в расширяющейся части канала. В этой области происходит формирование двухфазного потока, имеющего дисперсную или пузырьково – вихревую структуру. Из опытных данных следует, что среднерасходная скорость потока в этой области соответствует расчётным значениям скорости звука в двухфазной среде при объёмном паросодержании $\varphi = 0,5$, рассчитанная по уравнению [5]:

$$W_{кр} = \left[1 / \left(\varphi \frac{\rho \rho'' + (1 - \varphi) \rho'}{P} - \frac{1}{C_p'' T} \right) \right]^{0,5} \quad (1)$$

где: ρ' , ρ'' – плотность жидкой и паровой фазы соответственно; p - давление, T – температура, c_p'' – теплоёмкость паровой фазы.

Так среднерасходная скорость потока в горле $W_r = 16,6$ м/с (при $p_0 = 80$ кПа, $p_1 = 10$ кПа, $t_0 = 17$ °С), а $W_{кр} = 17,1$ м/с.

На критический расход жидкости оказывают влияние режимные параметры и геометрия канала. Влияние начального недогрева жидкости на критический расход показано на рис. 5. Уменьшение начального недогрева при прочих равных условиях приводит к уменьшению критического расхода. Аналогичные результаты имели место в опытах [7].

В исследуемом диапазоне размеров расширяющейся части сопла ($22 < l/d_{эвк} < 100$) величина критического расхода не зависела от длины сопла (рис. 6). Это согласуется с экспериментами по высоконапорному истечению других авторов [4, 5], в которых установлено, что влияние длины проявляется в каналах с $l/d < 3$.

На рис. 7 приведена зависимость удельного расхода жидкости от угла раствора сопла. При низконапорном истечении максимальный критический расход устанавливается в сопле с углом раскрытия $9 - 10^\circ$. Из работы [8] известно, что пульсации характеристик потока в таком сопле достигают максимальных значений. При течении жидкости в сопле с углом раствора менее 9° имеет место снижение величины критического расхода, т.к. поток в сопле находится в стеснённых условиях. В сопле с углом раствора 6° , наблюдались отрывные зоны, генерирующие вихри, но вследствие стеснённости площадь поперечного сечения, которую они занимают, составляет порядка 10% от площади проходного сечения. В потоке наблюдались пульсации давления, амплитуда которых увеличивалась с увеличением угла раствора сопла. Это явление обусловлено изменением размеров вихрей, образующихся в отрывных зонах. Максимального значения амплитуда колебаний принимает в сопле с углом раствора $9 - 10^\circ$. Дальнейшее увеличение угла раскрытия приводит к вырождению одной из отрывных зон. В результате диаметр вихрей срываются поочерёдно с верхней и нижней образующей различен. Для образования вихря в верхней отрывной зоне затрачивается больше времени. Колебания центральной жидкой струи происходит преимущественно вблизи нижней образующей сопла, период колебаний центральной жидкой струи увеличивается. Вырождением одной из отрывных зон объясняется уменьшение критического расхода при увеличении угла раствора сопла более $9 - 10^\circ$. В сопле с углом раствора 17° наблюдалась только одна отрывная зона. Течение потока жидкости осуществлялось вдоль противоположной образующей сопла. Пульсации давления в таком сопле практически вырождаются.

5. ЧАСТОТА ЗАРОЖДЕНИЯ ВИХРЕЙ

В экспериментах проводилось измерение частоты образования вихрей по разложению видеоизображения потока на кадры. Временной интервал между кадрами составлял 0,04с.

На рис. 8 приведена зависимость частоты образования вихрей от удельного критического расхода жидкости. Частота образования вихрей определялась по числу вихрей, проходящих сечение среза сопла за определённый промежуток времени. В условиях опытов максимальная частота вихреобразования устанавливалась в сопле с углом раствора β^0 , см. рис. 8. По мере увеличения угла раствора частота вихреобразования уменьшается. Это обусловлено тем, что с увеличением угла раствора сопла увеличивается объём отрывных зон, а следовательно и время на образование вихря большего размера.

При разбиении видеоизображения потока, с развитой гетерофазной структурой на кадры установлено, что структура пристеночного плёночного течения жидкости имеет сложную конфигурацию и может быть представлена в виде отдельных зон. Наблюдался поочерёдный срыв фрагментов плёнки с верхней и нижней образующей сопла. Установлено, что частота срыва фрагментов плёнки с образующих сопла соответствует частоте образования вихрей при истечении жидкости с противодавлением $p_1 \leq p_s(T_0)$.

6. ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ ПО РАСХОДУ И ЧАСТОТЕ ОБРАЗОВАНИЯ ВИХРЕЙ

Для определения критического расхода жидкости предложено следующее уравнение:

$$J_{от} = \frac{j}{\rho' W_{кр}} = 0,8731 \cdot \Theta^{0,495} \cdot (1666 \cdot Sh - 377819 \cdot Sh^2 - 0.71785) \quad (2)$$

где: $J_{от}$ – относительный удельный расход; j – удельный расход, кг/м²с; ρ' – плотность жидкости, кг/м³; $W_{кр}$ – критическая скорость звука, рассчитанная по уравнению (2) при паросодержании $\varphi=0,5$, м/с; $\Theta=1-(p_s(t_0)/p_0)$ – относительный начальный недогрев жидкости; $Sh = \nu \cdot d_{эkv} / W$ – число Струхалия, безразмерный параметр определяющий частоту пульсаций потока, вследствие образования вихрей. ν – частота образования вихрей, Гц; $d_{эkv}$ – эквивалентный диаметр горла сопла, м; W – скорость потока в горле, м/с.

Уравнение (2) описывает все экспериментальные точки с отклонением не более $\pm 5\%$ при доверительной вероятности 0,95 в интервале значения относительного недогрева Θ от 0,105 до 0,98. Результаты расчёта критического расхода по уравнению (2) представлены на рис. 9.

Для определения частоты вихреобразования при критическом режиме истечения воды в разреженную среду предложено уравнение:

$$Sh = 0.000674 \cdot \Theta^{-0.0518} \cdot \left(\frac{h_{cp} - h_g}{2l} \right)^{-0.425} \quad (3)$$

где: h_{cp} и h_g высота среза и горла сопла соответственно, м; l – длина расширяющейся части сопла, м.

Зависимость (3) описывает все экспериментальные точки с отклонением не более $\pm 9\%$ при доверительной вероятности 0,95 в интервале значения относительного недогрева Θ от 0,105 до 0,98. Результаты расчёта частоты образования вихрей по уравнению (3) представлены на рис. 10.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены условия реализации различных структурных форм двухфазного потока в процессах истечения воды в разреженную среду. Режим течения потока характеризуется нестационарными, периодически повторяющимися процессами, которые связаны с образованием, ростом и уносом вихрей в области горла сопла, а так же колебанием и дроблением центральной жидкой струи. Установлено, что при $\beta < 0,67 \pm 0,025$ имеет место кризис течения по расходу. Установление критического режима истечения происходит

вследствие структурных преобразований в потоке. Запирание канала происходит в области отрывных зон, имеющих место в расширяющейся части сопла за горлом. Выявлена зависимость величины критического расхода жидкости от частоты образования вихрей. Предложены критериальные уравнения для определения критического расхода жидкости и частоты образования вихрей в зависимости от режимных параметров и угла расширяющейся части сопла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. -М.: Энергия, 1976.
2. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. М., Энергоиздат. 1981.
3. Тонг Л. Теплопередача при кипении и двухфазное течение. - М.: Мир, 1968, 344 с.
4. Фисенко В.В. Критические двухфазные потоки. Атомиздат, - М., 1978. – 160 с.
5. Тонконог В.Г., Мухачев Г.А. Критическое истечение вскипающих жидкостей в соплах. - В кн.: Теплофизика и гидрогазодинамика процессов кипения и конденсации. Двухфазные потоки. Часть 4. Рига, 1986, с.67-75.
6. Муравьев И.Ф. Истечение вскипающей воды через цилиндрические протяжённые каналы в области низких начальных давлений// Теплоэнергетика. №4. 2000. С. 54 – 57.
7. Малаховский И.В. Возникновение и развитие кавитации в каналах с отрывом потока. Редколлегия “Инженерно – физического журнала”, реф. коп. №6133 – 83. Минск, 1983 г., 17 с.
8. Чжен П. Отрывные течения. Т. 1. М.: Мир, 1972. – 300 с.

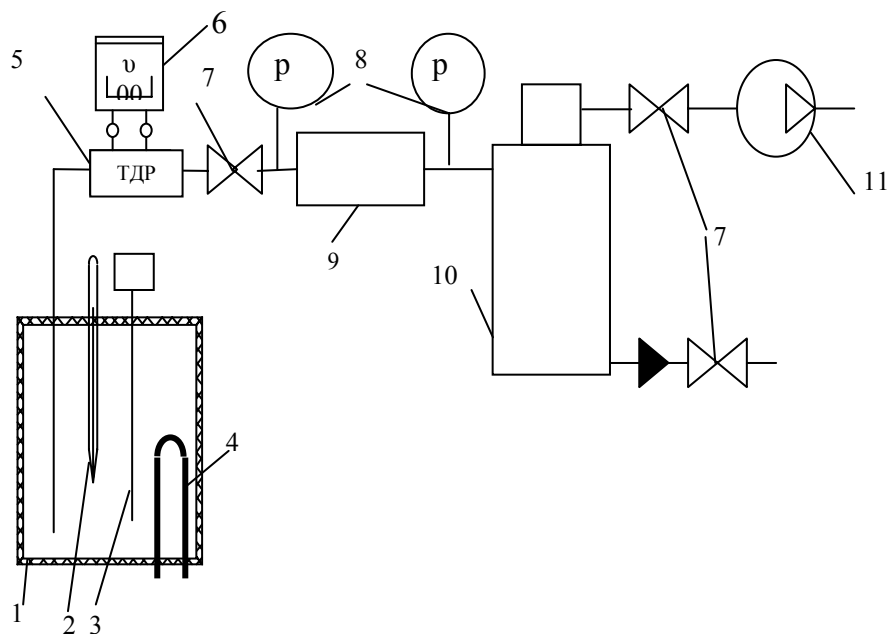
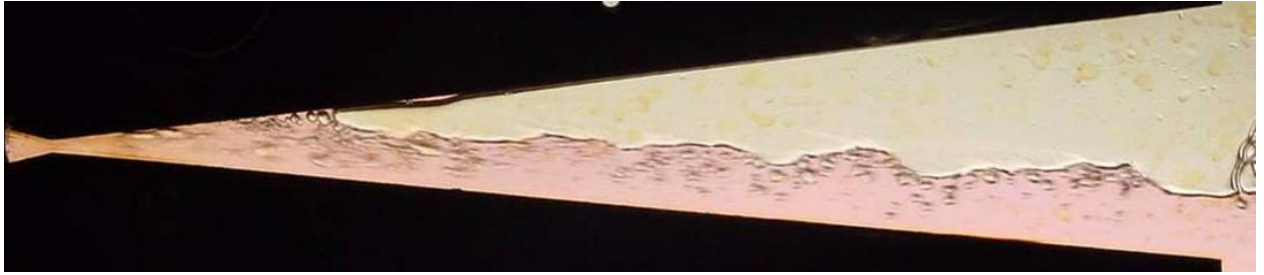
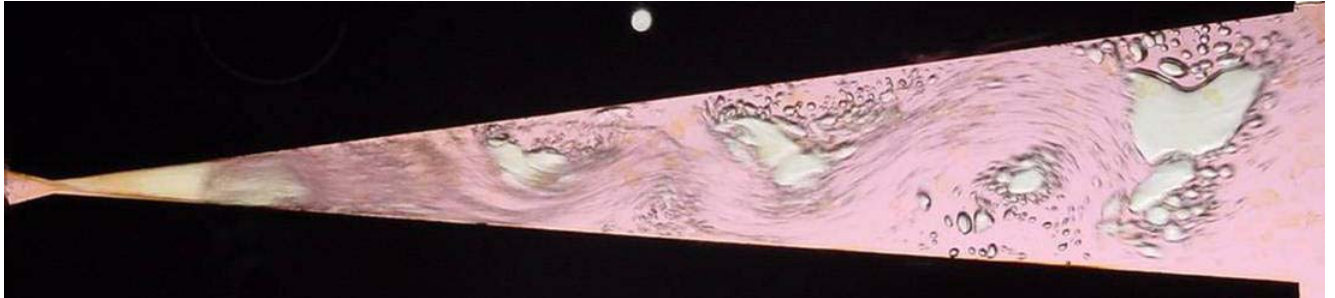


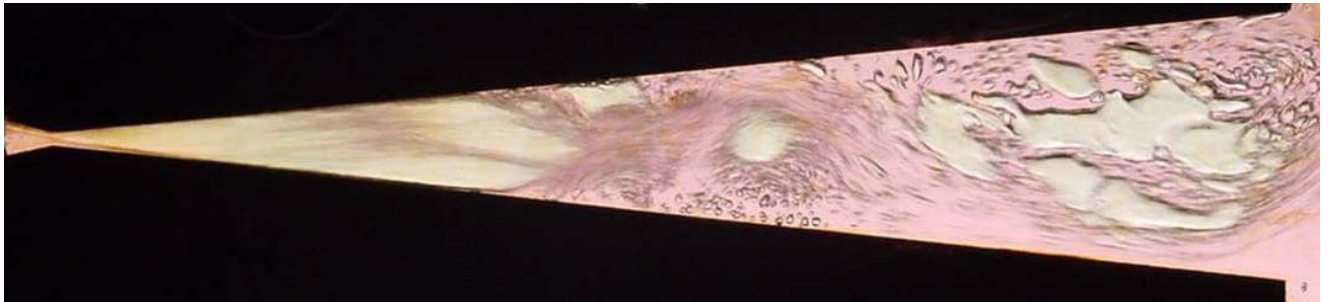
Рис. 1. Принципиальная схема стенда. 1 – термостатированный расходный бак; 2 – ртутный термометр ТЛ – 4; 3 – система измерения уровня; 4 – электронагреватель; 5 – турбинный датчик расхода ТДР 8 – 1 – 1; 6 – частотомер; 7 – запорная арматура; 8 – вакуумметры; 9 – рабочий участок с исследуемым каналом; 10 – сепаратор; 11 – вакуумный насос РВН – 75.



а



б

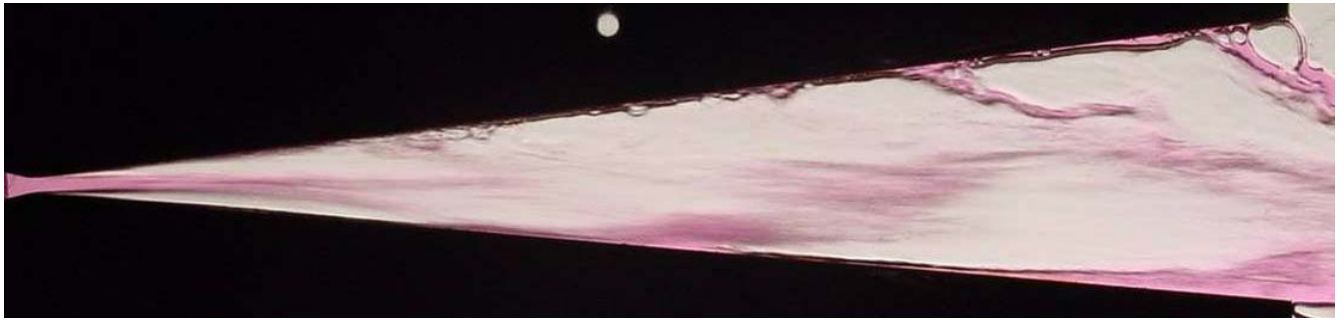


в

Рис 2. Структура потока при истечении воды в разреженную среду с противодействием более давления насыщения ($p_1 > p_s(t_0)$). Направление потока слева – направо. Угол раствора сопла $\alpha=12^\circ$. а – $t_0 = 46^\circ\text{C}$, $p_0=80$ кПа, $p_1=73,1$ кПа; б – $t_0 = 43^\circ\text{C}$, $p_0=80$ кПа, $p_1=32,6$ кПа; в – $t_0 = 46^\circ\text{C}$, $p_0=80$ кПа, $p_1=20,3$ кПа



Рис. 3. Унос вихря из отрывной зоны в области горла и отклонённый им центральный поток жидкости (фотография увеличена). Сопло: $\alpha = 12^\circ$, $F_{cp}/F_r = 17$. Вода, $t_0 = 30\text{C}$, $p_0=79900\text{Па}$, $p_1 = 21478\text{Па}$



а



б

Рис. 4. Структура потока при истечении воды в разреженную среду с противодавлением менее давления насыщения ($p_1 < p_s(t_0)$). Угол раствора сопла 12° . а – $t_0 = 70^\circ\text{C}$, $p_0 = 80$ кПа, $p_1 = 27$ кПа; б – $t_0 = 70^\circ\text{C}$, $p_0 = 80$ кПа, $p_1 = 8$ кПа

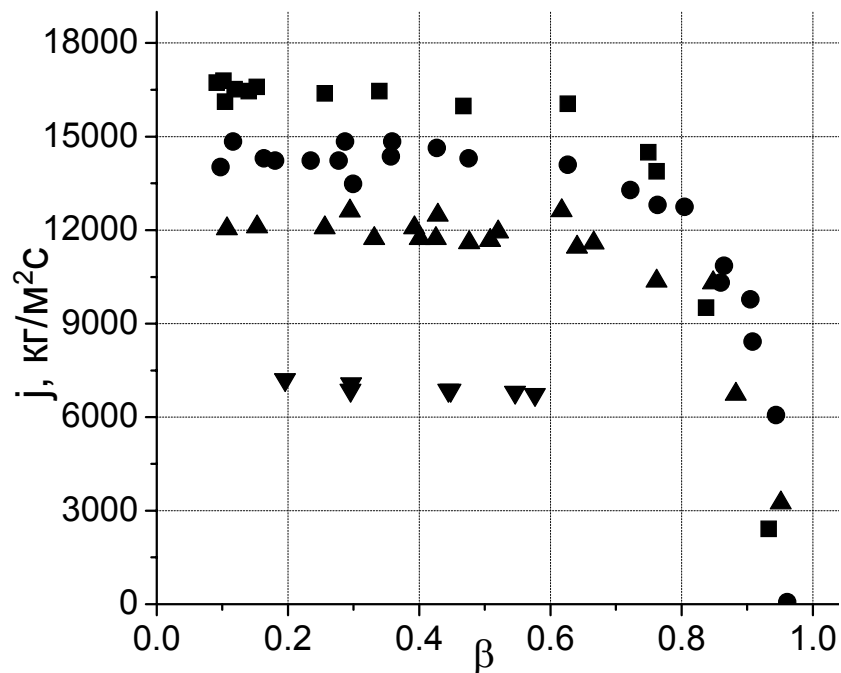


Рис. 5. Удельный расход воды при истечении в разреженную среду. Сопло, $\alpha = 12^\circ$. ■ – $t_0 = 3^\circ\text{C}$, $p_0 = 80$ кПа; ● – $t_0 = 45^\circ\text{C}$, $p_0 = 80$ кПа; ▲ – $t_0 = 70^\circ\text{C}$, $p_0 = 80$ кПа; ▼ – эксперимент [5], $t_0 = 94^\circ\text{C}$, $p_0 = 97$ кПа

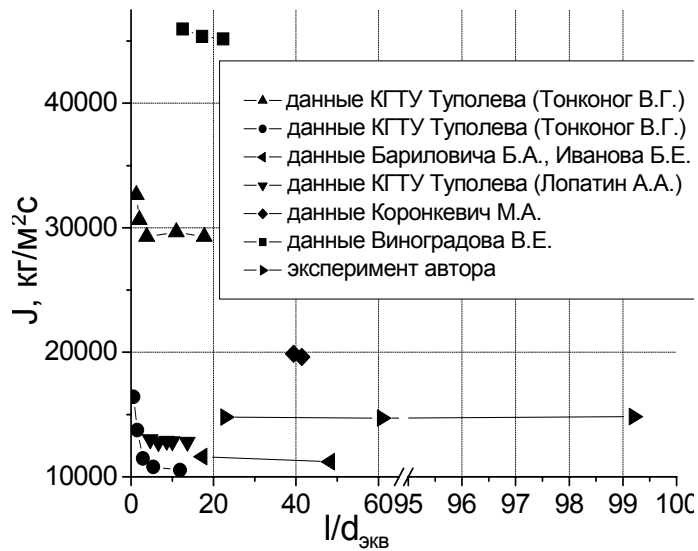


Рис. 6. Влияние относительной длины расширяющейся части сопла на удельный расход

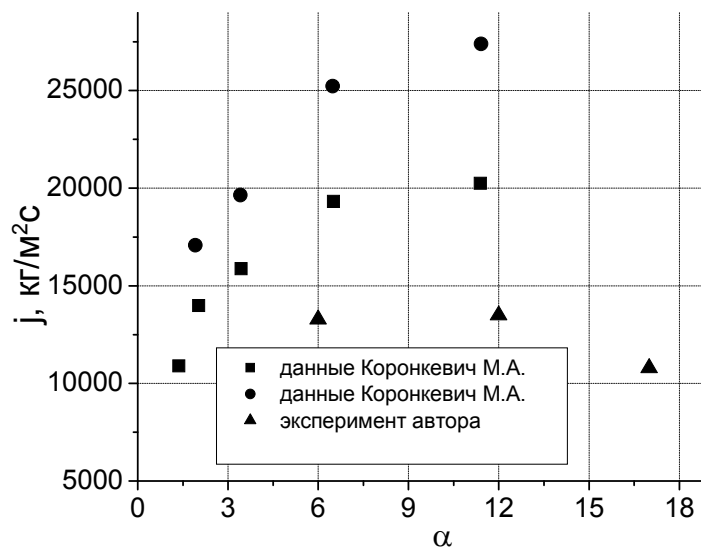


Рис. 7. Влияние угла раствора сопла на удельный расход

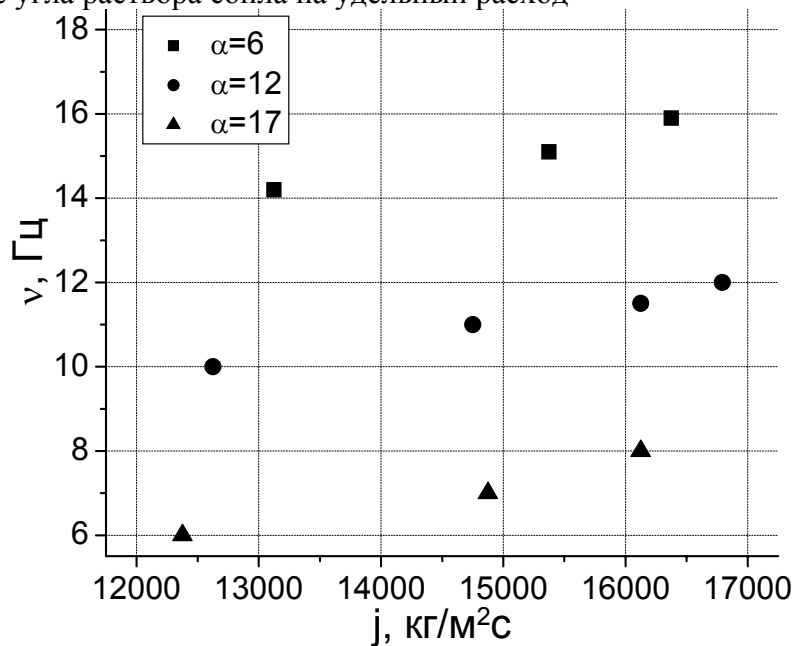


Рис. 8. Влияние удельного расхода жидкости на частоту образования вихрей в соплах с различными углами раствора

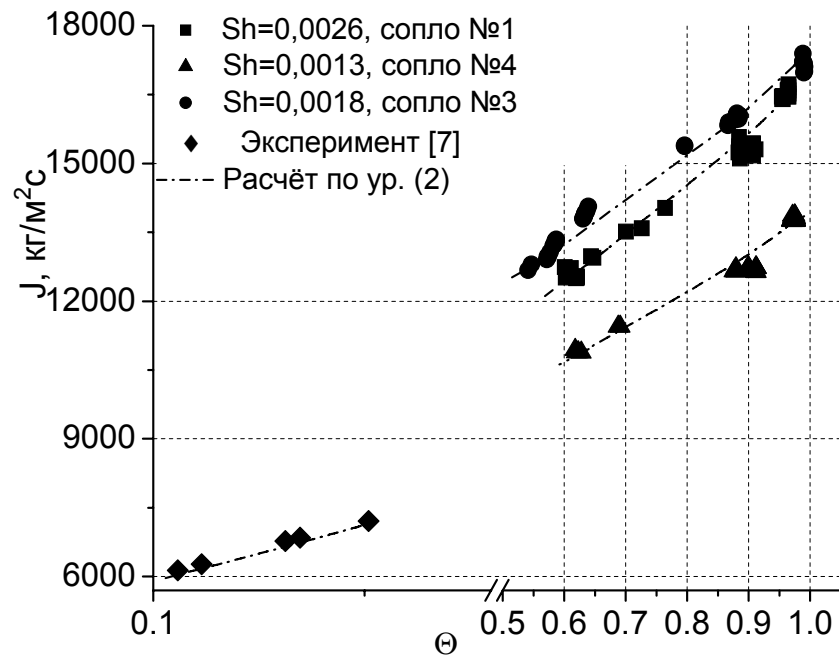


Рис. 9. Сравнение собственных экспериментальных данных и данных [7] со значениями, полученными по уравнению (2)

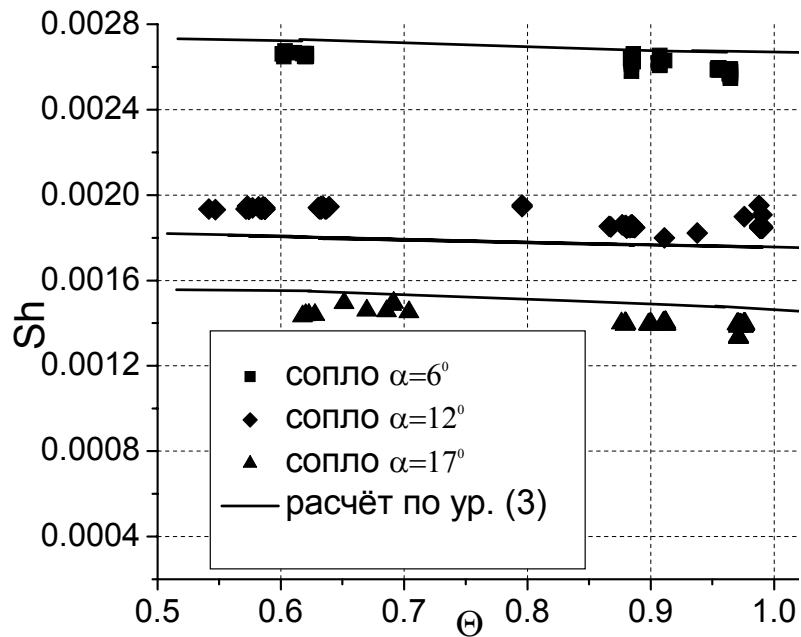


Рис. 10. Сравнение экспериментальных данных со значениями, полученными по уравнению (3)