

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА

АННОТАЦИЯ

Приводятся результаты расчета характеристик двухфазного потока, образующегося в процессе адиабатного истечения воды через сопла Лавала. Опыты проводились с насыщенной водой в диапазоне начальных давлений 0.6–4.0 МПа. Истечение жидкости осуществлялось в воздушную среду с атмосферным давлением. Выявлена существенная термическая неравновесность двухфазного потока как внутри канала, так и за его срезом. Предложена методика расчета характеристик потока в тракте сопла Лавала.

1. ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальное исследование двухфазных потоков, образующихся при адиабатном истечении капельных жидкостей, позволили выявить зависимость критического расхода, импульса тяг от начальных параметров процесса и конструктивных характеристик каналов [1]. Несмотря на то, что полученная информация представляет существенный практический интерес, в опытах не удалось непосредственно измерить параметры фаз, составляющих поток. Поскольку вопросы, связанные с определением термической неравновесности процесса, являются ключевыми при анализе явлений в потоке вскипающей жидкости и разработке расчетных схем, то целесообразно на базе имеющегося экспериментального материала получить такую информацию.

2. МЕТОД КОСВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА

Сущность данного метода заключается в том, что параметр, прямое измерение которого сопряжено с определенными трудностями (нежелательность внесения возмущений в поток и инициирование фазовых переходов), выражается из уравнений, описывающих явление, через другие величины, измерение которых более доступно [2].

Проведя анализ литературы [2–4], был предложен подход для определения характеристик потока в сопле Лавала.

Согласно представлениям механики, реакцию сопла можно записать как сумму всех сил, действующих на него:

$$R = \int_{F_{\text{нар}}} P_1 dF + \int_{F_{\text{вн}}} R_{\text{вн}} dF, \quad (1)$$

где $R_{\text{вн}}$ – отнесенная к единице площади сила, действующая на внутреннюю поверхность сопла. Сила $R_{\text{вн}}$ складывается из касательной составляющей – напряжений трения и нормальной составляющей –

статического давления. Реакцию сопла, согласно теореме импульсов, можно выразить через параметры потока на срезе канала:

$$R = GW + F_{\text{ср}}(P_{\text{ср}} - P_1). \quad (2)$$

Рассмотрим уравнения (1) и (2) совместно с уравнениями неразрывности и энергии для случая истечения через сопло жидкости, претерпевающей фазовые превращения. На входе в канал жидкость всегда находится в капельном состоянии, т.е. процесс расширения начинается из однофазной области. При описании движения вскипающей жидкости в канале переменного сечения приняты следующие допущения.

1. Процесс расширения жидкости происходит без теплообмена с окружающей средой (адиабатный-изоэнтропный процесс).

2. Течение одномерное.

3. Скорости компонент, составляющих поток, одинаковы.

4. Паровая фаза с момента ее образования находится в насыщенном состоянии.

5. Жидкая фаза может находиться в метастабильном состоянии как в капельном потоке (до момента образования паровой фазы), так и в парожидкостном потоке.

6. Касательная составляющая силы $R_{\text{вн}}$ – напряжение трения – пренебрежимо мала по сравнению с нормальной составляющей – статическим давлением.

С учетом принятых допущений уравнения (1) и (2) совместно с уравнениями сохранения массы и энергии примут вид:

$$GW + F(P - P_1) = \int_{F_{\text{нар}}} P_1 dF + \int_{F_{\text{вн}}} PdF;$$

$$\rho W F = \text{const}; \quad (3)$$

$$i + \frac{W^2}{2} = \text{const};$$

$$s = \text{const}.$$

Система уравнений (3) незамкнута. В зависимости от вида замыкающих условий метод косвенного определения параметров потока может быть ориентирован на решение различных задач.

В данном случае ставилась задача определить температуру жидкой фазы, скорость и паросодержание. Стоит отметить, что все параметры для расчетов брались по сечениям канала. В качестве условий, замыкающих систему уравнений (3), принимались опытные значения расхода жидкости через сопло, статическое давление в тракте канала и геометрия канала:

$$G = G(P_0), \quad P = P(L), \quad F = F(L). \quad (4)$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА ПО ТРАКТУ СОПЛА ЛАВАЛЯ

Проведенные расчеты позволили определить перегревы, паросодержания и скорости жидкости в адиабатных потоках при различных условиях течения и выявить влияние на них параметров процесса и геометрии каналов.

С момента зарождения паровой фазы (рис. 1) происходит резкое увеличение объемного паросодержания и при значении $F_T/F_T=3$ достигает значений 0,9. При таких режимах вероятна инверсия структуры потока (переход от пузырькового режима течения к дисперсному – капли жидкости распределены в паре). Предельное теоретическое значение паросодержания, при котором еще возможна пузырьковая структура потока, равняется $\varphi=0,74$. На практике инверсия структуры потока происходит при меньших значениях объемного паросодержания $\varphi \approx 0,5$, что обусловлено влиянием различных факторов.

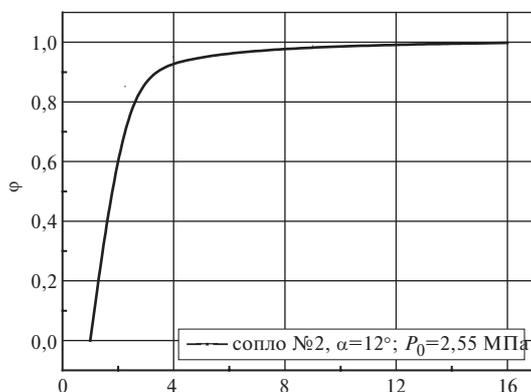


Рис. 1. Паросодержание по длине канала

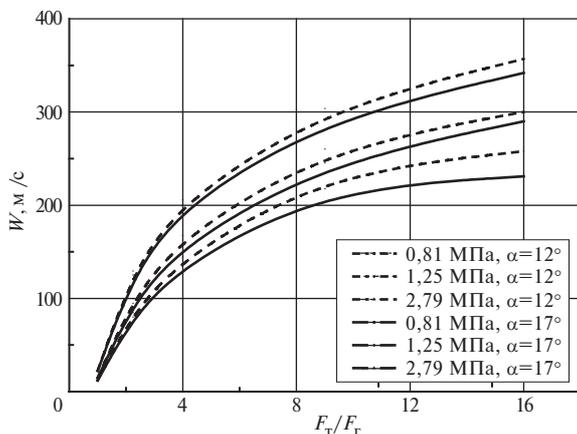


Рис. 2. Скорость потока по длине канала

Скорость потока, как следует из рис. 2, монотонно возрастает по тракту сопла.

Отклонение экспериментальных значений скорости потока на срезе канала от значений скорости, рассчитанных по методу косвенного определения параметров потока, не превышает 3%.

Перегревы, имевшие место в опытах с насыщенной водой, при значениях $P < 4,0$ МПа оказались существенно меньше значений предельных перегревов, соответствующих границе метастабильных со-

стояний (рис.3). Таким образом можно утверждать, что при оговоренных условиях истечения ($P < 4,0$ МПа) имеет место гетерофазный механизм зарождения паровой фазы. Поскольку опыты, проведенные другими авторами с жидкостями различной степени очистки и газонасыщения показали, что влияние растворенного газа не оказывает существенного влияния на характеристики двухфазного потока (расход, количество центров парообразования) [5–7], то наиболее вероятным является механизм парообразования, связанный с влиянием гидродинамических факторов, образование пузырей в центре вихрей, генерируемых турбулентным потоком жидкости (согласно гипотезе Дина) [8].

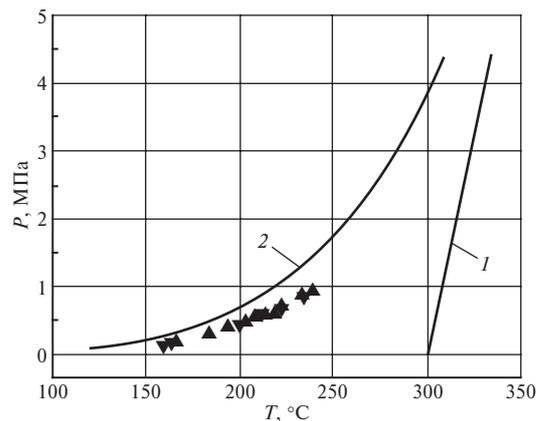


Рис. 3. Предельные перегревы: 1 – граница предельных перегревов; 2 – кривая насыщения; точки – эксперимент автора

Расчет температуры жидкой фазы при различных условиях истечения представлен на рис. 4–5. При увеличении начальных параметров (P_0) на входе в сопло происходит рост температуры жидкости. В то же время, как следует из рис. 4, с увеличением длины канала происходит снижение $T_{ж}$.

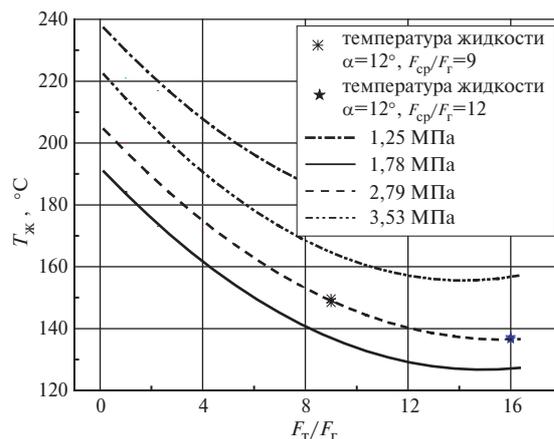


Рис.4. Температура жидкости по длине сопла: *, * – температуры, измеренные тепловизором

Также существенное влияние на температуру жидкой фазы оказывает угол раствора расширяющейся части сопла. При его уменьшении происходит снижение температуры по всей длине канала (рис. 5). Это обусловлено тем, что в протяженных каналах происходит более полное испарение жид-

кости в пределах канала, что, в свою очередь, приводит к ее охлаждению.

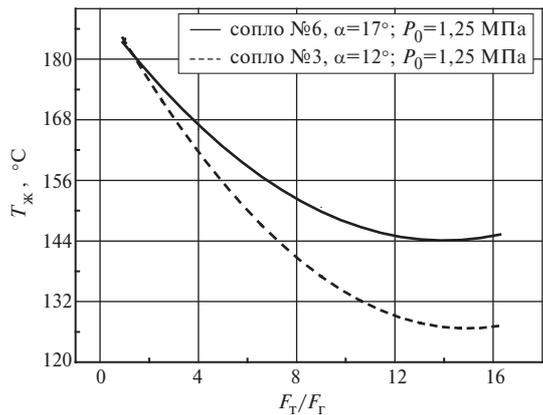
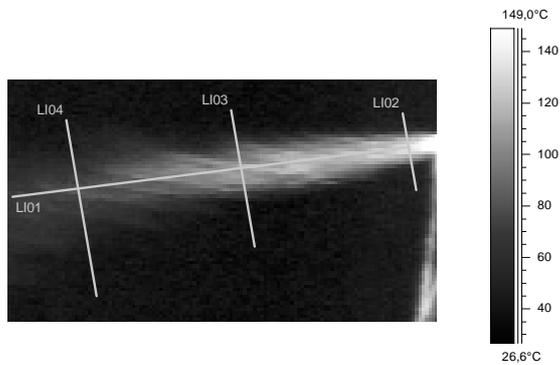
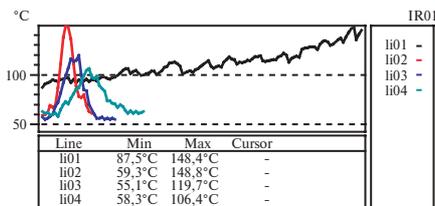


Рис. 5. Зависимость температуры жидкости от угла раствора сопла

Значение начального перегрева жидкости, как следует из рис. 6–9, зависит прежде всего от параметров потока на входе в канал и геометрии каналов [9].



Сопло Лавая: $\alpha=12^\circ$, $F_{cp}/F_T=9$



Профили температуры за срезом сопла Лавая
Рис. 6. Термограммы потока за срезом сопел Лавая

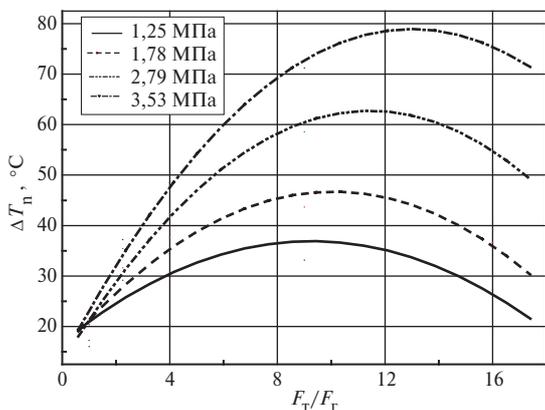


Рис. 7. Перегревы жидкости по длине сопла

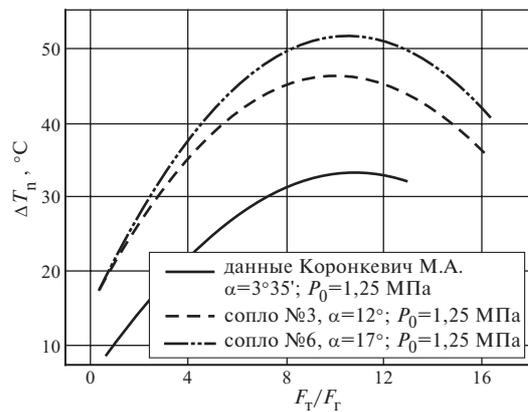
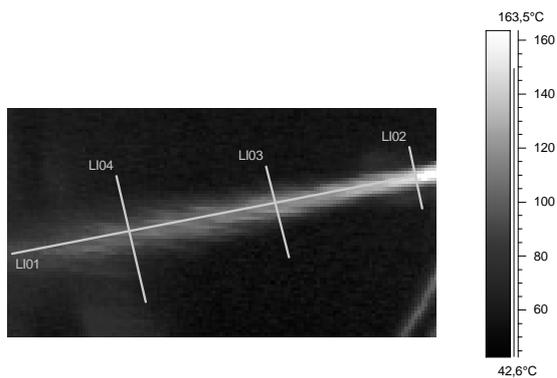
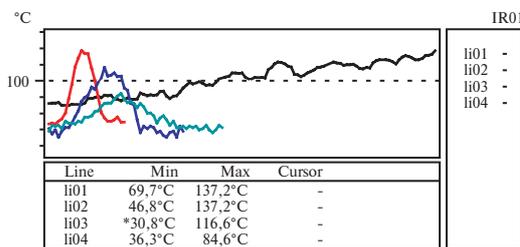


Рис. 8. Зависимость перегрева жидкости по длине сопла от угла раствора сопла



Сопло Лавая: $\alpha=12^\circ$, $F_{cp}/F_T=16$



Профили температуры за срезом сопла Лавая
Рис. 9. Термограммы потока за срезом сопел Лавая:
 $P_0=1,78$ МПа, $T_0=201$ °С, $P_{np}=0,1$ МПа

Увеличение давления в потоке на входе в сопло приводит к увеличению перегрева по длине канала для каждого из исследованных сопел (рис. 7). Тенденция к уменьшению перегрева как в сечении закипания, так и в общем по длине канала наблюдается при прочих равных условиях с уменьшением угла раствора расширяющейся части сопла Лавая (рис. 8). Это обусловлено, как уже говорилось ранее, тем, что с уменьшением угла раствора при неизменной степени расширения канала растет и время пребывания потока в тракте сопла, что приводит к более полному испарению жидкой фазы, а следовательно, и снижению метастабильности процесса. И если увеличивать длину канал, а следовательно, и время пребывания потока в нем, то при определенной протяженности сопла произойдет срабатывание перегрева и поток в области среза будет иметь параметры, соответствующие равновесным (температуры и давления жидкой и паровой фаз равны).

Качественная и количественная информация о характеристиках потока, полученная в результате визуальных наблюдений, фоторегистрации процесса, измерений с помощью термоэлектрических датчиков, численных исследований дополняется и хорошо согласуется с данными термографического исследования, представленными на рис. 6 и 9.

Сравнение температур на срезе сопла, полученных в результате термографического исследования, с расчетными данными, представлено на рис. 4. Расхождение температур не превышало 2 °С. Таким образом, предложенная методика с удовлетворительной точностью описывает процессы, происходящие при течении вскипающей воды в соплах Лавая.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе проведенных расчетов получена количественная информация о паросодержании, скорости и перегревах, имевших место при течении вскипающей воды в соплах Лавая. Представленные данные позволяют прогнозировать характеристики двухфазных потоков при различных режимах работы энергоустановок.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

G – удельный расход, кг/с;
 R – импульс тяги, Н;
 L – длина диффузора сопла, м;
 $F_{\text{ср}}$ – площадь среза сопла, м²;
 $F_{\text{г}}$ – площадь горла сопла, м²;
 $F_{\text{т}}$ – текущая площадь, м²;
 α – угол раствора диффузора сопла, град;
 P_0 – начальное давление, МПа;
 $P_{\text{ср}}$ – давление на срезе сопла, МПа;
 $P_{\text{пр}}$ – противодавление, МПа;
 P_1 – давление в текущем сечении, МПа;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;
 s – энтропия;
 W – скорость, м/с;
 φ – паросодержание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гортышов Ю.Ф., Лопатин А.А., Тонконог В.Г.** Результаты комплексного исследования характеристик двухфазного потока // Труды XV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева. Калуга, 23–27 мая 2005. Т. 1. С. 185–188.
2. **Теория и техника** теплофизического эксперимента. – 2-е изд., перераб. и доп./ Ю.Ф. Гортышов, Ф.Н. Дресвянников, Н.С. Идиатуллин и др.: Под ред. В.К. Щукина. М.: Энергоиздат, 1993. 448 с.
3. **Абдюшев Н.З., Мухачев Г.А., Тонконог В.Г.** Исследование параметров двухфазного потока при истечении недогретой воды. // Труды КАИ. Казань. 1974. Вып. 178. С. 65–69.
4. **Тонконог В.Г.** Термическая неравновесность процесса истечения вскипающих жидкостей // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 т. Т.5: Двухфазные течения. Дисперсные потоки и пористые среды. М.: Изд. МЭИ, 1998. С. 121–124.
5. **Шмидт Л.И., Консетов В.В., Проскуряков В.А.** Образование пузырей при дросселировании пересыщенных жидкостей // Инж.-физ. журн. 1971. Т. 20. С. 261 – 267.
6. **Куров А.А.** Исследование истечения и дробления азотонасыщенной жидкости // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛПИ, 1972.
7. **Виноградов В.Е., Сеницын Е.Н.** Истечение газонасыщенной воды через короткие сопла // Теплофизика высоких температур. 1991. № 1. Т. 29. С. 174–177.
8. **Дин Р.** Образование пузырей // Вопросы физики кипения. М.: Мир, 1964. С. 13– 27.
9. **Лопатин А.А., Тонконог В.Г.** Исследование характеристик двухфазных струй // Труды Третьей российской национальной конференции по теплообмену. В 8 т. Т. 5: Двухфазные течения. Дисперсные потоки и пористые среды. М.: Изд-во МЭИ, 2002. С. 88–90.