

## ТЕРМИЧЕСКАЯ НЕРАВНОВЕСНОСТЬ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА

Лопатин А.А., Осипова В.И.

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

Течение рабочих жидкостей по трактам различных энергоустановок и технических устройств зачастую сопровождается их частичным испарением с образованием двухфазного потока. Как правило, такие явления протекают неравновесным путем, а жидкость в момент зарождения и развития новой фазы может находиться в метастабильном (перегретом) состоянии.

Исследованию гидро- и термодинамики двухфазных потоков посвящено достаточно много научных работ. Такой интерес обусловлен широким практическим применением данной тематики. В качестве примера можно привести:

- Системы испарительного охлаждения
- Аэрокосмические комплексы.
- Тепловые двигатели.
- Нефтеперерабатывающая промышленность.
- Системы локализации и ликвидации техногенных катастроф.

Примеры, приведенные из различных областей техники, свидетельствуют об актуальности исследований течения жидкостей с фазовыми превращениями. Перечень вопросов, подлежащих рассмотрению, здесь чрезвычайно обширен и включает следующие направления:

- определение термической неравновесности двухфазного потока при различных условиях течения;
- получение критериальных уравнений для расчета удельного расхода и импульса тяги в широком диапазоне начальных параметров и геометрических характеристик каналов;
- исследование режимов течения и структуры гетерофазных потоков, устойчивости движения;
- разработка методов и средств диагностики гетерофазных потоков.
- исследование условий и механизма зарождения паровой фазы в капельной жидкости;

На начальном этапе проводимой работы будет более подробно рассмотрен первый из вышеперечисленных вопросов.

С целью определения факторов, влияющих на термическую неравновесность двухфазного потока проведены экспериментальные исследования по адиабатному истечению насыщенной воды из каналов переменного сечения. Начальные параметры в опытах варьировались в диапазоне от 0,6 до 4,0 МПа. Рабочие участки представляли собой сопла Лавалья с углом раствора расширяющейся части  $12^{\circ}$  и  $17^{\circ}$ , относительная длина каналов вирировалась от 4 до 16.

В работе предложен комплексный подход к определению термической неравновесности двухфазного потока, смысл которого заключается в объединении экспериментального и тепловизионного метода исследования с расчетом по косвенной методике [1]. Тепловизионное исследование позволяет получить температурное поле за срезом сопла, а экспериментальный и расчетный методы параметры потока по тракту канала и на его срезе, что в итоге дает достаточно полную как количественную, так и качественную картину течения вскипающей жидкости в осесимметричных каналах переменного сечения.

## 1. Косвенная методика определения параметров потока.

Сущность данного метода заключается в том, что параметр, прямое измерение которого сопряжено с определенными трудностями (нежелательность внесения возмущений в поток и иницирование фазовых переходов), выражается из уравнений, описывающих явление, через другие величины, измерение которых более доступно [1-3].

Проведя анализ имеющейся по данной тематике литературы [1-3], был предложен подход для определения локальных характеристик потока в сопле Лавала.

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

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

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.

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

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:

$$\begin{aligned} GW + F(P - P_1) &= \int_{F_{\text{нар}}} P_1 dF + \int_{F_{\text{вн}}} P dF \\ \rho W F &= \text{const} \\ i + \frac{W^2}{2} &= \text{const} \\ s &= \text{const} \end{aligned} \quad (3)$$

Система уравнений (3) незамкнута. В зависимости от вида замыкающих условий метод косвенного определения параметров потока может быть ориентирован на решение различных задач. Например, в [3] приводятся результаты определения скорости и объемного паросодержания потока при известных из опытов расходе  $G$  и

распределению статического давления  $P = P(L)$  в тракте канала. А в работе [1] при заданном значении расхода через сопло Лавалья, паросодержании и статического давления по длине канала автором определяется скорость, плотность и энтальпия парожидкостной среды.

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:

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

Приведем уравнения (2) к виду, удобному для численного анализа. На основании принятых допущений получим:

$$s = xs'' + (1 - x)s_{ж} \quad (5)$$

$$i = xi'' + (1 - x)i_{ж} \quad (6)$$

С учетом выражений (5), (6) и принимая во внимание очевидное соотношение между объемным и массовым паросодержанием:

$$\rho = \varphi \cdot \rho'' + (1 - \varphi)\rho_{ж} = \frac{1}{x \cdot v'' + (1 - x) \cdot v_{ж}} \quad (7)$$

$$\rho_{п} = \rho'(T_{п}), \rho_{ж} = \rho''(T_{ж}) \quad (8)$$

$$x = \varphi \rho_{п} / \rho_{дф} \quad (9)$$

Разрешим систему уравнений (3) относительно скорости потока  $W$ , паросодержания и температуры жидкой фазы.

Методика обработки опытных данных была следующей. Весь поток в тракте сопла разделялся по режиму течения на две области. Первая область - от сечения входа до сечения, в котором начинается процесс парообразования (в данном случае минимальное сечение сопла Лавалья) - область гидравлического потока. Вторая область - от сечения начала парообразования до сечения среза сопла - область двухфазного потока.

Для первой области, где имел место гидравлический режим течения, параметры потока определялись из уравнения Бернулли.

Для второй области, где имело место течение парожидкостной среды, параметры потока определялись из уравнений получаемых при решении системы (3) при заданных опытных значениях (4).

Расчет начинался с сечения закипания, т.е. горла. Операция интегрирования при вычислении реакции сопла заменялась суммированием сил, действующих на элементы сопла. Тракт сопла разбивался на несколько элементарных участков в зависимости от длины сопла. В результате вычислений находились скорость потока и паросодержание жидкости. При этом предполагалось, что калорические свойства жидкости из однофазной области можно экстраполировать в метастабильную область состояний. Справедливость этого предположения обоснована в [7]. Температура жидкой фазы находилась по энтальпии жидкости с помощью таблиц [8]. Перегрев жидкой фазы в парожидкостном потоке в произвольном сечении с координатой  $L$  определялся как

$$\Delta T_L = T(i_L) - T_s(P_L) \quad (10)$$

По изложенной выше методике проводилась обработка результатов экспериментов с целью определения температуры жидкой фазы в потоке, перегрева жидкости, при котором в потоке начиналось зарождение паровой фазы, скорости потока по длине канала и паросодержание.

## 2. Результаты расчетных исследований.

С момента зарождения паровой фазы (рис.1) происходит резкое увеличение объемного паросодержания и при значении  $F_T/F_r=3$   $\phi$  достигает значений 0,9. При таких режимах вероятна инверсия структуры потока (переход от пузырькового режима течения к дисперсному - капли жидкости распределены в паре).

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%.

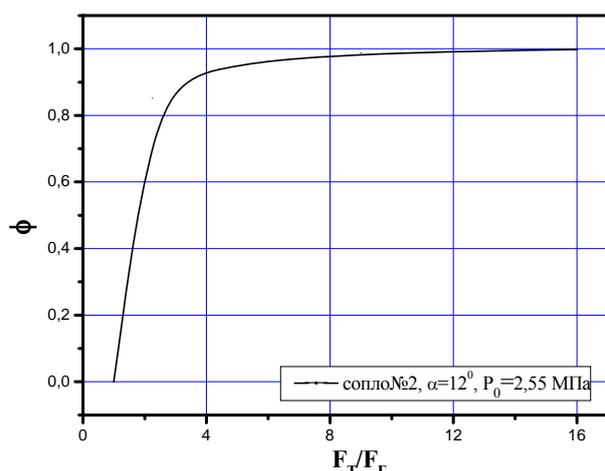


Рис. 1. Паросодержание по длине канала.

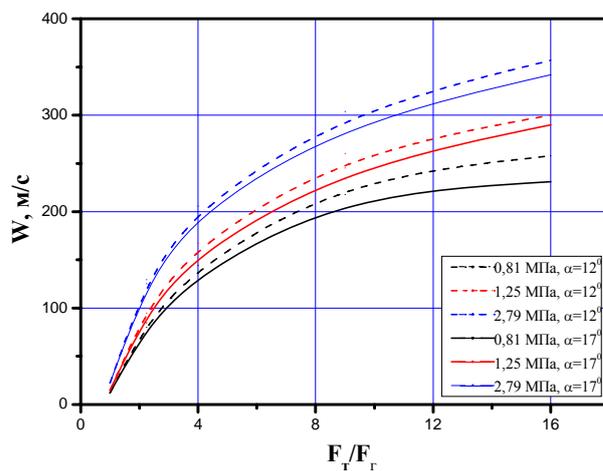


Рис. 2. Скорость потока по длине канала.

Проведенные расчеты показывают, что перегревы, имевшие место в опытах существенно меньше значений предельных перегревов, соответствующих границе метастабильных состояний (рис.3). Таким образом можно утверждать, что при оговоренных начальных 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) [4-6], то наиболее вероятным является механизм парообразования, связанный с влиянием гидродинамических факторов, образование пузырей в центре вихревых структур, генерируемых турбулентным потоком жидкости (согласно гипотезе Дина) [7].

Расчет температуры жидкой фазы для различных начальных параметров представлен на рис.4. Как следует из графика, с увеличением длины расширяющейся части сопла происходит уменьшение перегрева. Увеличение относительной длины канала с 4 до 16 приводит к снижению температуры жидкой фазы более чем на 34%.

Так же 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 жидкости в пределах канала, что в свою очередь приводит к ее охлаждению в целом.

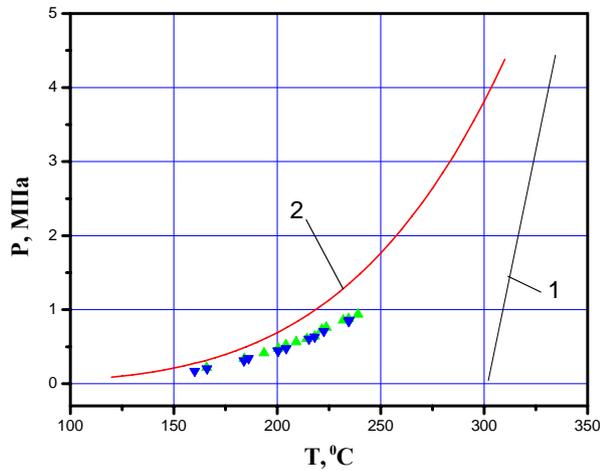


Рис.3. Предельные перегревы  
1-граница предельных перегревов;  
2-кривая насыщения; ▼,▲ - эксперимент

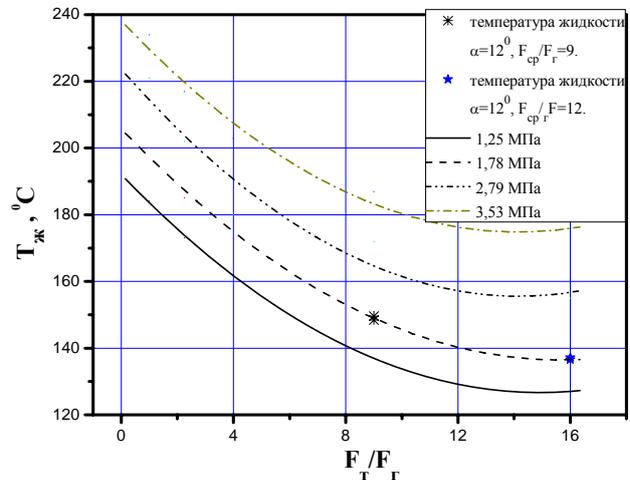


Рис.4. Температура жидкости по длине сопла  
★, \* - температуры, полученные с помощью термоэлектрического зонда.

Увеличение давления в потоке на входе в сопло приводит к увеличению перегрева как на срезе (рис.6), так и 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 Лавала (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.

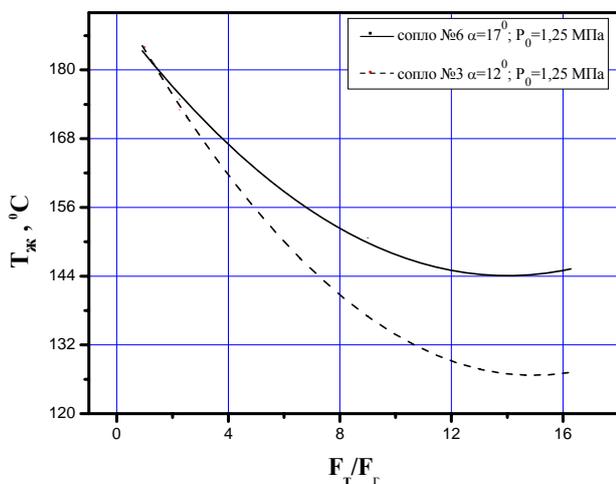


Рис.5. Зависимость температуры жидкости от угла раствора сопла.

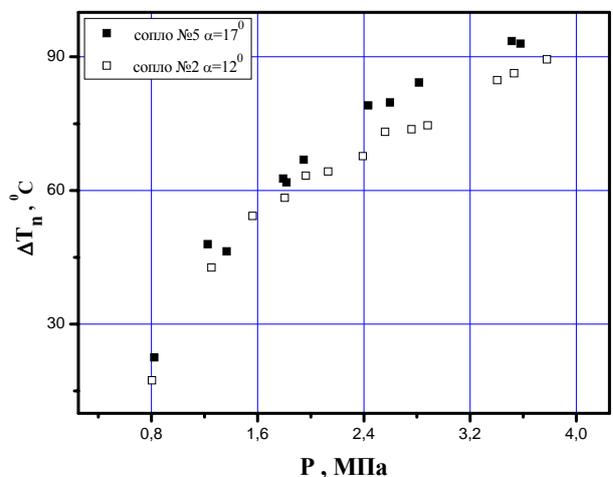


Рис.6. Зависимость перегрева жидкости на срезе сопла от начального давления.

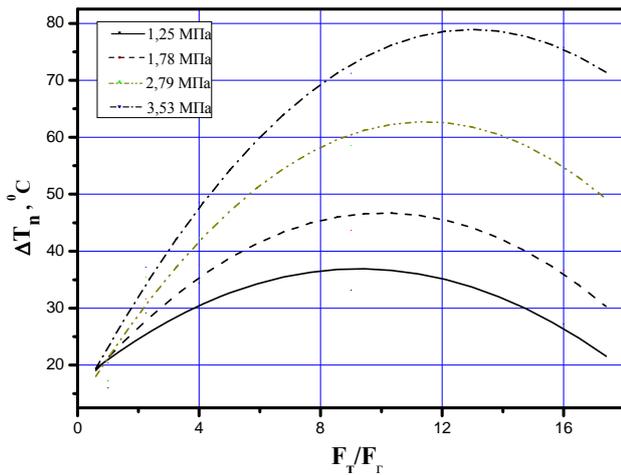


Рис.7. Перегревы жидкости по длине сопла.

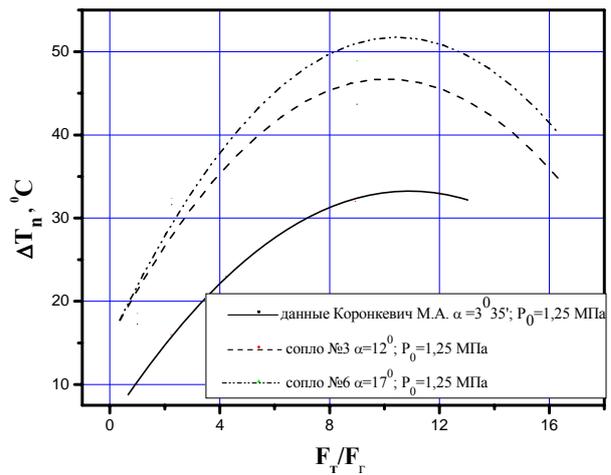


Рис.8. Зависимость перегрева жидкости по длине сопла от угла раствора сопла.

Таким образом, варьируя как начальными параметрами, так и геометрией канала можно добиться желаемых характеристик потока на срезе. Например, увеличивая относительную длину диффузора при неизменных начальных параметрах и угле раствора можно добиться приближения параметров потока на срезе к равновесным. Тот же эффект можно получить уменьшением угла раствора расширяющейся части сопла.

### 3. Результаты термографического исследования.

Количественная информация о термической неравновесности двухфазного потока, полученная с помощью численных исследований и измерений термоэлектрическим зондом хорошо согласуется с данными термографического исследования. Как следует из термограмм, представленных на рис.9 и 10 поток за срезом канала характеризуется существенной термической неравновесностью как в осевом, так и в поперечном сечении струи  $T \gg T_s(P_0)$ .

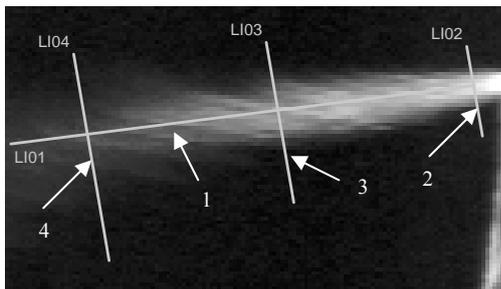


Рис.9. Термограмма. Сопло  $\alpha=12^\circ$ ,  $F_{cp}/F_r=9$

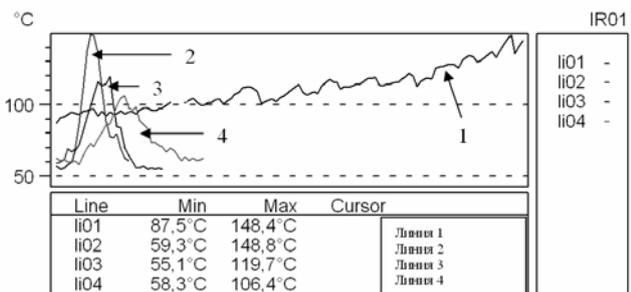


Рис.10. Профили температуры за срезом сопла Лавалья.

Сравнение температур на срезе сопла, полученных в результате термографического исследования с расчетными данными и результатами замеров с помощью термоэлектрического зонда, так же представлено на рис.4. Расхождение температур не превышало  $2^\circ\text{C}$ . Таким образом, предложенная методика с

удовлетворительной точностью описывает процессы, происходящие при течении вскипающей воды в соплах Лавалья.

### **Литература**

- [1] Тонконог В.Г. Термическая неравновесность процесса истечения вскипающих жидкостей. // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т.5. Двухфазные течения. Дисперсные потоки и пористые среды. М.: Изд. МЭИ, 1998. С. 121-124.
- [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, вып. 178. Казань. 1974, с. 65-69.
- [4] Шмидт Л.И., Консетов В.В., Проскураков В.А. Образование пузырей при дросселировании пересыщенных жидкостей. // Инж.-физ. журн., 1971, т.20, с. 261 - 267.
- [5] Куров А.А. Исследование истечения и дробления азотонасыщенной жидкости. // Автореферат канд. диссертации, Л., ЛПИ, 1972.
- [6] Виноградов В.Е., Синицын Е.Н. Истечение газонасыщенной воды через короткие сопла. // Теплофизика высоких температур, 1991, №1, Т29, с.174-177.
- [7] Дин Р. Образование пузырей. // В кн.: Вопросы физики кипения. М. Изд. Мир. 1964, с. 13- 27.
- [8] Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. - М.: Энергия, 1975. - 80 с.
- [9] Скрипов В.П. и др. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии. - М.: Атомиздат, 1980.- 208 с.