

О.О. Мильман¹, А.С. Голдин², А.К. Карышев³, В.В. Помазков¹, О.Н. Ширяев²

Калужский государственный педагогический университет им.К.Э. Циолковского, Россия (1)

ОАО «Калужский турбинный завод», Россия (2)

Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия (3)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВСКИПАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ В РАСШИРЯЮЩИХСЯ КАНАЛАХ

АННОТАЦИЯ

Обобщены результаты исследований течения в соплах Лавая, работающих на вскипающей воде. Показано, что изменения угла раскрытия расширяющейся части с 12 до 30 градусов практически не влияет на эффективность сопел, дальнейшее увеличение угла снижает их эффективность. Увеличение степени расширения повышает КПД сопел при уменьшении противодавления, длина сопел в исследованном диапазоне режимов влияет значительно меньше. Исследованы различные способы управления парожидкостным потоком: сепарация влаги, соударение струй жидкости с различными углами взаимодействия. Даны рекомендации по применению результатов продувок.

1. ВВЕДЕНИЕ

Течение вскипающей жидкости в каналах переменного сечения тесно связано с проблемами разрыва трубопроводов перегретой воды при истечении из расширяющихся сопел типа Лавая.

Оно описано в ряде публикаций [1,2], но требует дополнительных исследований применительно к реактивным гидропаровым турбинам.

Цель нашей работы – оценка интенсивности процессов массообмена в канале, определение роли кинетики этих процессов, влияния конструктивных факторов на коэффициент скольжения фаз и эффективность сопел.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ ВСКИПАЮЩЕЙ ВОДЫ В КАНАЛАХ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

2.1. Характеристика течения вскипающей жидкости

Характеристики сопел Лавая, работающих на вскипающей воде, исследованы в широком диапазоне начальных давлений от 1,8 до 5 МПа и температур воды от 70 до 138 °С.

На первом этапе проведены испытания сопел различной конфигурации (рис. 1), геометрические размеры которых сведены в таблицу.

Таблица 1. Геометрические размеры сопел испытанных вариантов

Номер сопла	Диаметр горла $D_{вх}$, мм	Диаметр выхода $D_{вых}$, мм	Половина угла раскрытия $\gamma/2$, град	Длина конической части L , мм	Степень раскрытия $f = \frac{D_{вых}^2}{D_{вх}^2}$
1	5	67	14,3; 10,0	144,0	179,6
2	5	67	10,0	144,0	179,6
3	5	74	11,5	144,0	219,0
4	5	67	11,5	126,8	179,6
5	5	74	13,0	126,8	219,0
6	5	67	13,0	111,3	179,6
7	4,3	57,6	7,5	202,0	179,6
8	5	67	6,0	295,0	179,6
9	5	88,8	14,3	164,0	315,4

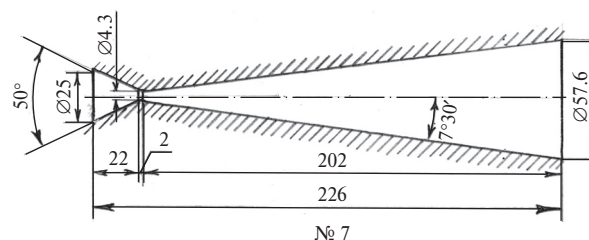
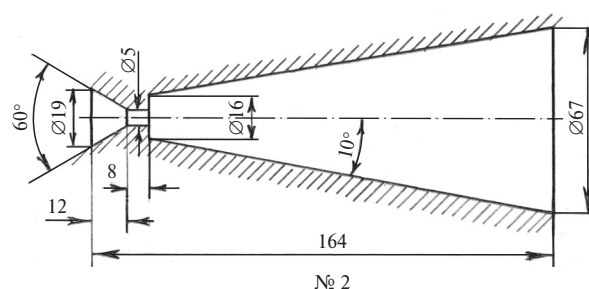
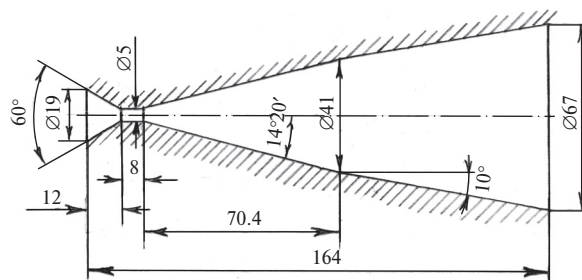


Рис. 1.1. Конструкции исследованных сопел Лавая

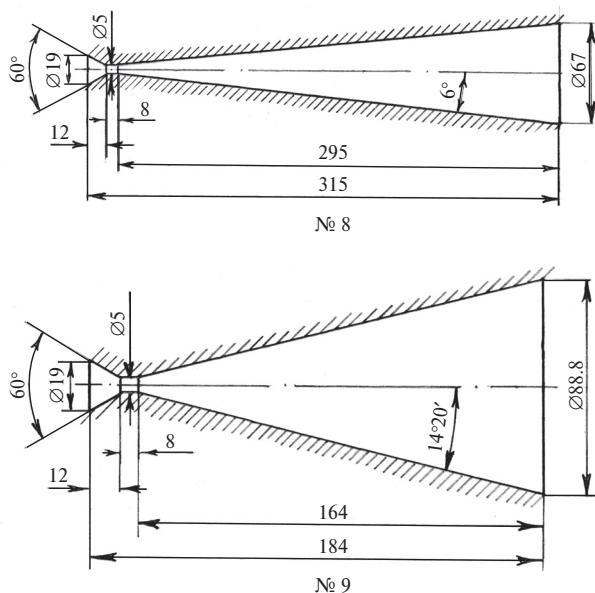


Рис. 1.2. Конструкции исследованных сопел Лавала

На рис. 2 представлено распределение давлений по длине проточной части сопла №1 при различных противодавлениях за соплом. Из этого рисунка следует, что вскипание воды в струе, выходящей из горла, начинается в конце цилиндрической или в начале расширяющейся части сопла и начальный участок расширяющейся части обтекает с отрывом потока от стенок сопла.

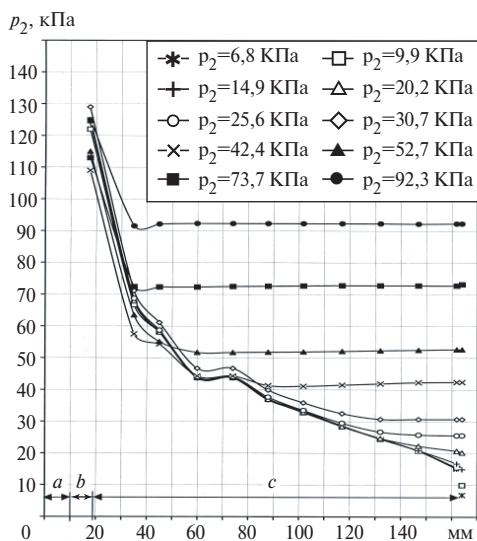


Рис. 2. Влияние противодавления на распределение давлений вдоль сопла № 1, $p_0 = 3,1$ МПа, $T_0 = 100$ °С: a – суживающаяся часть; b – цилиндрическое горло; c – расширяющаяся часть сопла

2.2. Влияние противодавления и угла раскрытия конической части на работу сопел

Эффективность различных сопел иллюстрирует рис.3, из рассмотрения которого следуют два важных вывода:

- большое относительное сечение выхода (сопло №9) дает заметное преимущество в области низких противодавлений, когда объемные расходы пара велики;

- приведенные опыты не выявили положительного влияния протяженности расширяющейся части сопла на его эффективность, поэтому нет оснований считать, что определяющим фактором в эффективности сопел при наших параметрах рабочей воды является кинетика процесса вскипания.

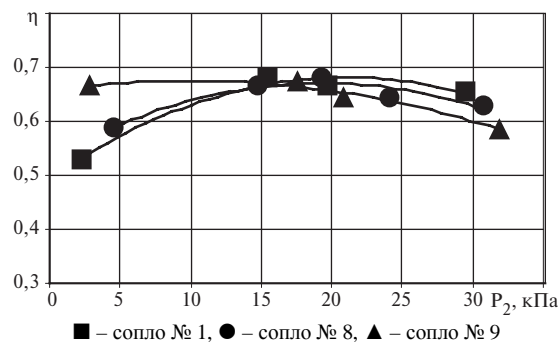


Рис. 3. Влияние противодавления на коэффициент тяги сопел № 1, 8, 9 при различных начальных температурах

Влияние угла раскрытия расширяющейся части исследовалось на трех соплах Лавала, они имели степень расширения 179,6 и углы раскрытия соответственно $28^\circ 40'$; 15° и 12° . Испытания проводились при давлении воды перед соплом $p_0 = 1,8 \div 5,0$ МПа.

Анализ полученных данных не выявил сколь угодно заметного влияния угла раскрытия расширяющейся части на эффективность сопел Лавала, имеющих одинаковую степень расширения: в исследованном диапазоне изменение угла раскрытия от 12 до 30° не приводит к изменению эффективности сопла Лавала при работе на расчетном режиме истечения. Для определения предельного допустимого угла раскрытия расширяющейся части испытывались два сопла Лавала со степенью расширения 315,4, а углами раскрытия соответственно $28^\circ 40'$ и 40° , испытания проводились при давлении воды перед соплом $p_0 = 1,8 \div 5,0$ МПа. На всех режимах эффективность сопла с углом раскрытия 40° ниже, чем сопла с углом $28^\circ 40'$. При этом все основные показатели работы обоих сопел: p_a , степень сухости и коэффициент скольжения – совпадают. Тем не менее коэффициент скорости и эффективность работы сорокаградусного сопла меньше. По всей видимости, рост угла раскрытия более тридцати градусов приводит к отрывным течениям и увеличивает потери кинетической энергии в сечениях сопла, близких к выходному.

2.3. Характер распределения импульсов фаз

На следующем этапе обработаны результаты испытаний шести различных сопел Лавала с углами раскрытия от 12 до 30° и степенью расширения выходной части от 179,6 до 315,4 в диапазоне изменения начальной температуры от 60 до 140 градусов Цельсия и давления от 1,8 до 5 МПа.

Важным результатом такого анализа оказалось следующее обстоятельство (см. рис.4):

- а) при росте T_0 от 60 до 90°C доля импульса жидкой фазы уменьшается, а паровой возрастает;

б) при дальнейшем росте температуры воды от 90 до 140 °С (в практически важном диапазоне) соотношение импульсов жидкой и паровой фаз остается постоянным, при этом доля жидкой фазы в общем импульсе составляет 73÷75%, а паровой – 25÷27%.

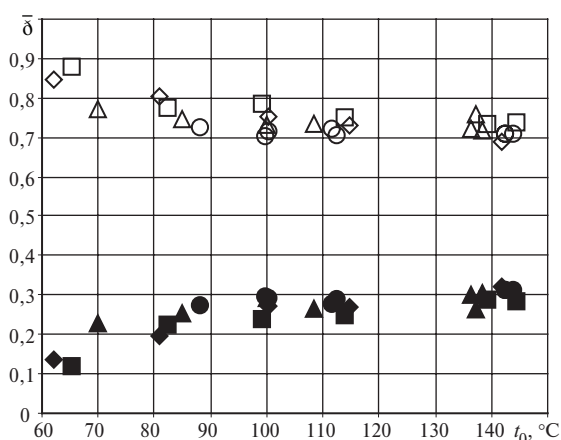


Рис. 4. Зависимость относительных импульсов жидкой и паровой фаз в выходном сечении сопла от температуры T_0 рабочей воды перед соплом при расчетном режиме истечения

Этот результат получен впервые, он является важным фактором при рассмотрении способов управления влажнопаровым потоком.

2.4. Взаимодействие движущихся потоков

Следующим этапом было изготовлено и испытано специальное сопло, в котором вода с давлением 1,8–5,0 МПа подавалась через 4 отверстия диаметром 2,5 мм (эквивалентно одному отверстию диаметром 5 мм). Причем струи направлялись в общую точку под углом 35 ° к оси сопла, (см. рис. 5, размер $A = 17$ мм). В результате взаимодействия высокоскоростных струй на выходе из сопла была получена мелкодисперсная смесь, что зафиксировано визуально, тогда как истечение из центрального отверстия 5 мм на том же расстоянии давало осесимметричную струю с незначительным распадом.

Результаты испытаний сопла Лавалья с четырьмя отверстиями выявили уменьшение коэффициента скорости с 0,7 до 0,6 при одновременном увеличении скольжения с 0,3÷0,4 до ~0,6, что свидетельствует о сближении скоростей фаз.

Несколько лучшие показатели получены на соплах с четырьмя параллельными струями (см. рис. 6). Здесь коэффициент тяги заметно возрос по сравнению с вариантом пересекающихся струй, но не превзошел осесимметричную струю сопла типа 1 и 5.

Следующим этапом стало испытание сопла со струями, пересекающимися под углом 18° (см. рис. 5, размер $A = 45$ мм), ранее было 35°.

Смысл такого подхода: сохранение (не уменьшение) импульса жидкой фазы при одновременном увеличении дисперсности её. Здесь впервые получен значительный рост эффективности сопел. В результате продувок впервые получен коэффициент

скорости 0,808 при $p_0 = 4,9$ МПа и температуре 137°С.

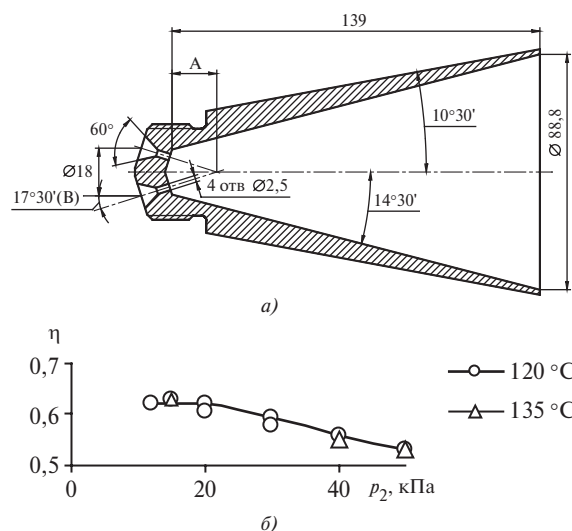


Рис. 5. Характеристики сопла с пересекающимися струями ($p_0=5,0$ МПа): а – геометрические размеры; б – коэффициент тяги

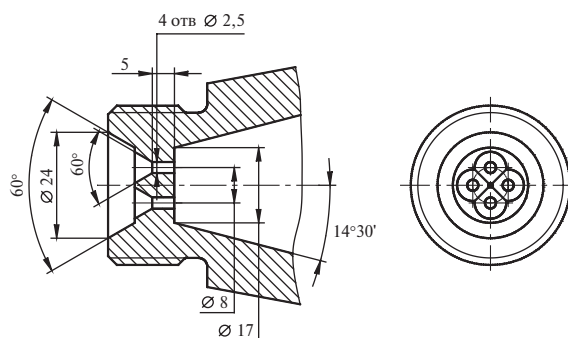


Рис. 6.1. Характеристики сопла с параллельными струями (геометрические размеры)

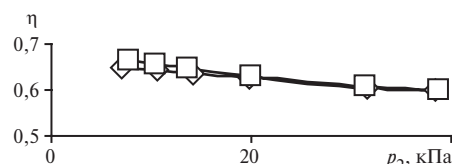


Рис. 6.2. Характеристики сопла с параллельными струями (коэффициент тяги)

Важно также отметить, что применение системы параллельных и пересекающихся струй заметно увеличивает коэффициент скольжения фаз с 0,2÷0,3 для осесимметричных сопел до 0,5÷0,6 для многоструйных. Этот фактор оказывает большое влияние на потери с выходной скоростью в ступени гидропаровой турбины.

В самом деле из-за рассогласованности скоростей паровой и жидкой фаз традиционные методы оценки оптимального отношения (U/C_0) становятся непригодными, так как среда на выходе из сопла имеет две фазы с существенно разными скоростями. Этот факт необходимо учитывать в расчетах, он требует проведения отдельного анализа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментов по исследованию характеристик сопел Лавала, работающих на вскипающей воде, установлены следующие факты:

- эффективность сопел слабо зависит от их длины и угла раскрытия расширяющейся части в диапазоне 12–30°, дальнейшее увеличение угла приводит к снижению эффективности сопел;

- степень расширения сопел оказывает значительное влияние на КПД, особенно заметное при низком давлении за соплом;

- в диапазоне температур рабочей воды 90÷150 °С жидкая фаза обладает значительной и постоянной долей (около 75%) в суммарном импульсе среды на выходе из сопел. Попытки воздействовать на жидкую фазу в форме сепарации на стенке или закрутки отрицательно влияют на эффективность сопел;

- положительное влияние на КПД сопел и величину скольжения фаз оказывает взаимодействие нескольких струй внутри сопла под небольшим углом; это определяется ростом дисперсной жидкой фазы при незначительной потере ее импульса. Соответствующие рекомендации выданы конструкторам и расчетчикам гидропаровых турбин.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$D_{\text{вх}}, D_{\text{вых}}$ – диаметры расширяющегося канала на входе и выходе;

γ – угол раскрытия канала;

L – длина канала;

$f = \frac{D_{\text{вых}}^2}{D_{\text{вх}}^2}$ – относительное сечение выхода;

p, τ – начальные и текущие значения давления и температуры;

i – импульс;

η – коэффициент тяги;

p_a – давление на среде сопла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Циклаури Г.В., Данилин В.С., Селезнев Л.И. Адиабатные двухфазные течения. М.: Атомиздат, 1973.
2. Мильман О.О., Дахнович А.А., Голдин А.С., Федоров В.А. Экспериментальные исследования течения перегретой воды в соплах гидропаровой турбины // Труды регионального конкурса научных проектов в области естественных наук. Калуга: Изд-во Эйдос, 2003. Вып. 4. С. 166–172.