

О.О. Мильман<sup>1</sup>, А.С. Голдин<sup>2</sup>, А.К. Карышев<sup>3</sup>, В.В. Помазков<sup>1</sup>, О.Н. Ширяев<sup>2</sup>

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.

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

### 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.

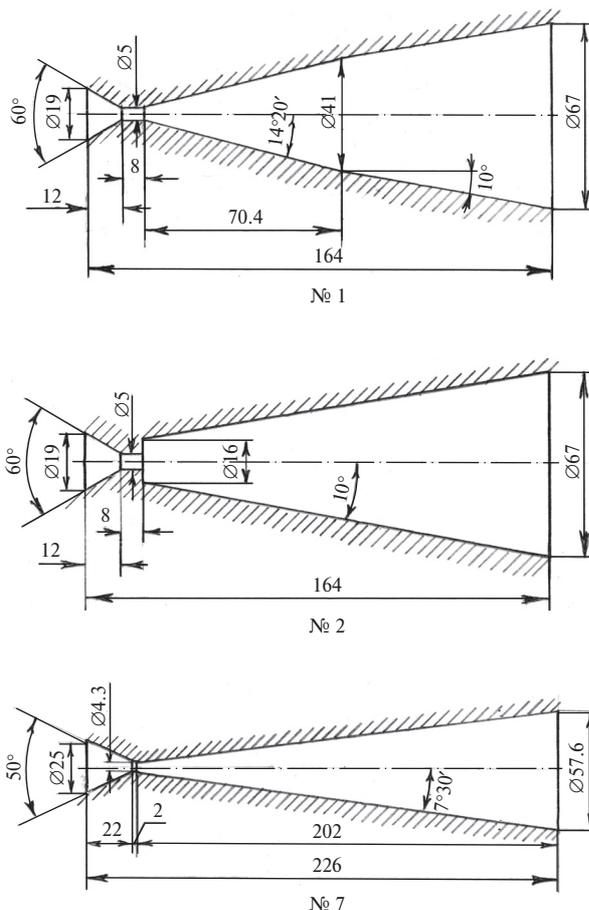


Рис. 1.1. Конструкции исследованных сопел Лавая

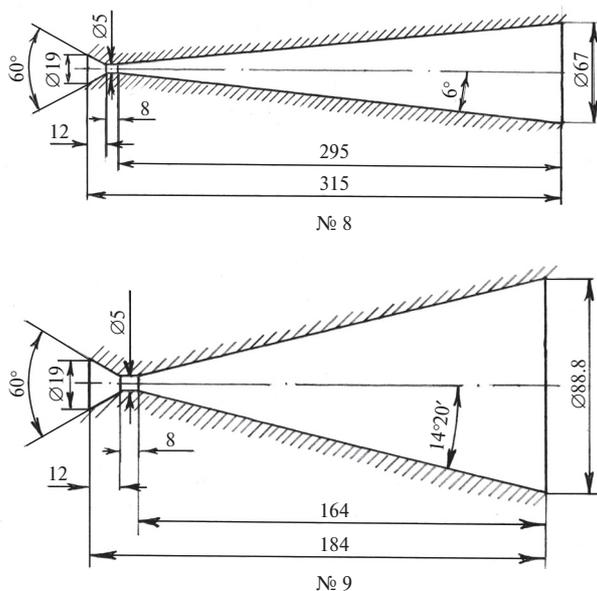


Рис. 1.2. Конструкции исследованных сопел Лавала

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.

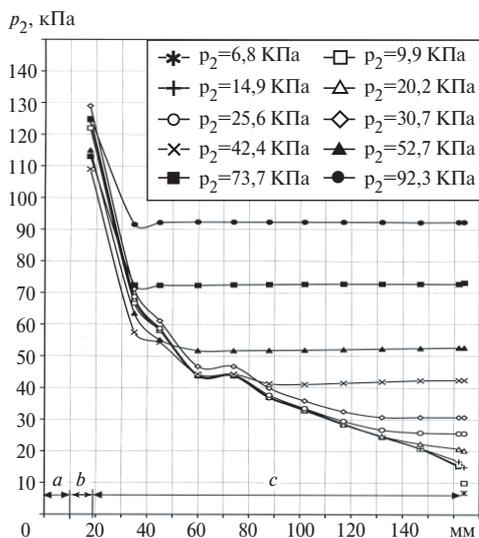


Рис. 2. Влияние противодавления на распределение давлений вдоль сопла № 1,  $p_0 = 3,1$  МПа,  $T_0 = 100$  °С:  $a$  – суживающаяся часть;  $b$  – цилиндрическое горло;  $c$  – расширяющаяся часть сопла

## 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.

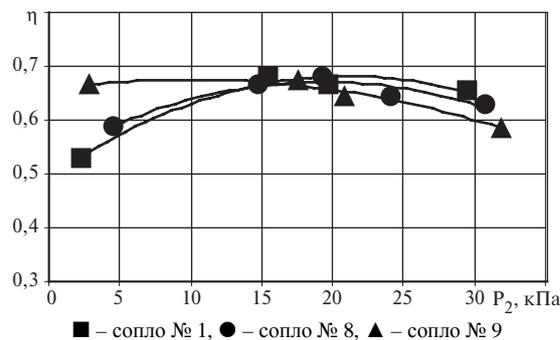


Рис. 3. Влияние противодавления на коэффициент тяги сопел № 1, 8, 9 при различных начальных температурах

Влияние угла раскрытия расширяющейся части исследовалось на трех соплах Лавала, они имели степень расширения 179,6 и углы раскрытия соответственно  $28^\circ 40'$ ;  $15^\circ$  и  $12^\circ$ . 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  $30^\circ$  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  $40^\circ$ , испытания проводились при давлении воды перед соплом  $p_0 = 1,8 \div 5,0$  МПа. На всех режимах эффективность сопла с углом раскрытия  $40^\circ$  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  $30^\circ$  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  $90^\circ\text{C}$  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%.

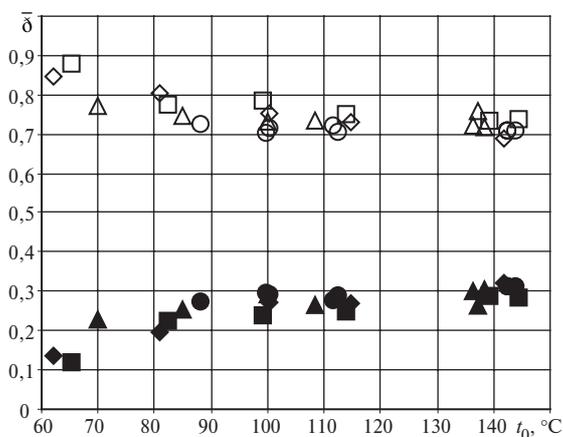


Рис. 4. Зависимость относительных импульсов жидкой и паровой фаз в выходном сечении сопла от температуры  $T_0$  рабочей воды перед соплом при расчетном режиме истечения

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.

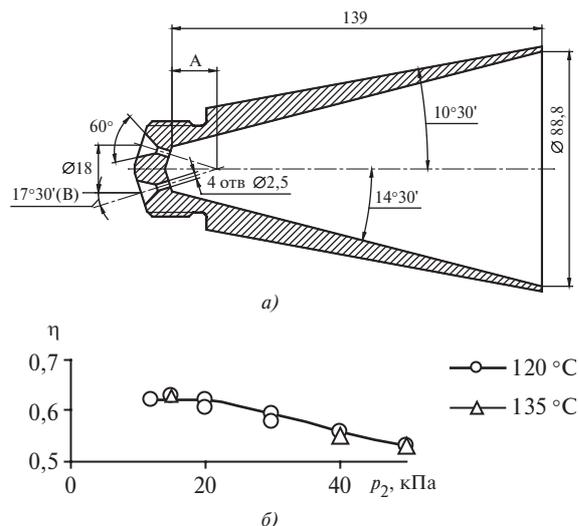


Рис. 5. Характеристики сопла с пересекающимися струями ( $p_0=5,0$ МПа): а – геометрические размеры; б – коэффициент тяги

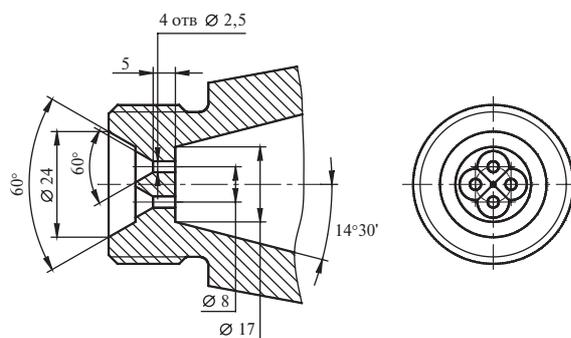


Рис. 6.1. Характеристики сопла с параллельными струями (геометрические размеры)

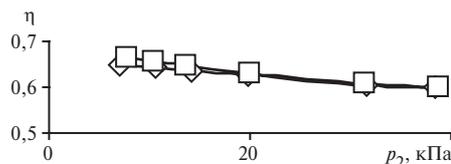


Рис. 6.2. Характеристики сопла с параллельными струями (коэффициент тяги)

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;

$\gamma$  – угол раскрытия канала;

$L$  – длина канала;

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

$p, \tau$  – начальные и текущие значения давления и температуры;

$i$  – импульс;

$\eta$  – 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.