



**Н.Т. НИЯЗОВ** Институт физики НАН КР, Бишкек, Кыргызская Республика  
niazovnt@mail.ru

**N.T. NIAZOV** Institute of Physics of the National Academy of Sciences of the KR Bishkek,  
Kyrgyz Republic

**Н.К. ДЖАМАНКЫЗОВ** Институт физики НАН КР, Бишкек, Кыргызская Республика  
niazovnt@mail.ru

**N.K. DZHAMANKYZOV** Institute of Physics of the National Academy of Sciences of the KR,  
Bishkek, Kyrgyz Republic

**А.А. АСАНОВ** КГУСТА им. Н. Исанова, Бишкек, Кыргызская Республика  
niazovnt@mail.ru

**A.A. ASANOV** KSUCTA n. a. N. Isanov, Bishkek, Kyrgyz Republic

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СОПЛЕ ЛАВАЛЯ ДЛЯ ПАРОЖИДКОСТНОЙ СТРУИ

### STUDY OF PROCESSES IN LAVAL NOZZLE FOR STEAM-LIQUID JET

*Бул макалада Лавальдын түтүкчөсүндө каралган суроолорду изилдөө, агымда болгон бурчтукту оптималдаштырылуу аныкталган. Эки фазалуу агымды изилдей турган сынамык стенддин аныктамасы каралган.*

**Өзөк сөздөр:** *Лаваль түтүкчө, эки фазалуу поток.*

*В статье рассматриваются вопросы исследования процессов в сопле Лавалья, определения оптимальных углов раскрытия струи. Дано описание экспериментального стенда для изучения двухфазного потока.*

**Ключевые слова:** *сопло Лавалья, двухфазный поток.*

*The article deals with the study of processes in the Laval nozzle, the definition of optimal angles of jet opening. A description of the experimental stand for the study of a two-phase flow is given.*

**Key words:** *Laval nozzle, two-phase flow.*

Непрерывный рост стоимости добычи нефти и нефтесодержащих углеродных составов, глобального воздействия на окружающую среду, катастрофические выбросы сопутствующих газов в атмосферу дают повод для беспокойства и требуют увеличения доли вырабатываемого электричества за счет нетрадиционных и возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ). Есть много способов по использованию ВИЭ для генерации электрической энергии. Одним из разновидностей способов является использование бросовой горячей воды источников низкопотенциальной теплоты. При этом температура используемой воды составляет от 90 до 150°C.

Использовать такую температуру воды для паротурбинного генератора в классическом понимании не оправдывает себя [1]. Чтобы реализовать рабочую систему, подобную паротурбинному генератору, надо создать другой режим и конструктивные особенности. Этот режим называется пароструйный режим, иногда называют гидропаровой цикл [2]. Одним из способов обеспечения данного режима возможно по принципу Сегнерова колеса [3]. Сегнерово колесо с соплами Лавалья дает возможность осуществить гидропаровой цикл. Данная конструкция требует более тщательного подбора сопла и самого колеса. Сегнерово

колесо в основном применяется при использовании однокомпонентного рабочего тела. Чтобы более эффективно использовать конструкцию Сегнера колеса и сопла Лавалья необходимо добиться получения вскипающей жидкости на выходе сопла. При получении вскипающей жидкости на выходе сопла возникает двухфазный поток. Дальнейшая задача – это использование двухфазного потока для генерации электричества.

Цель данной работы заключается в исследовании двухфазного потока и конструкции сопла Лавалья различных форм и размеров.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Создание экспериментальной установки.
2. Исследование течений вскипающей воды из сопел Лавалья различной формы, определение оптимальных геометрических размеров и угла сопла Лавалья. В дальнейшем создание установки для генерации электроэнергии с использованием пароводяной струи. Разработка конструкции генератора путем правильного выбора частоты вращения рабочего колеса, параметров рабочего тела и получения соответствующих характеристик парогенератора.

Эффективность сопла Лавалья определяется формулой [4]

$$R = F1(G, W, n\_g) + F2(\Delta p, n\_g), \quad (1)$$

где  $F1(G, W, n\_g)$  - динамическая составляющая реакции струи пароводяного потока,  $F2(\Delta p, n\_g)$  – статическая составляющая реакции струи пароводяного потока,  $G$  – удельный массовый расход,  $\Delta p$  – перепад статического давления пароводяного потока по длине диффузорной части сопла,  $n\_g$  – геометрические размеры сопла.

Формула (1) показывает зависимость эффективности от геометрических размеров сопла Лавалья.

### Описание экспериментальной установки

В экспериментальной установке использовано следующее оборудование:

- водяной насос центробежного типа, приводимый в движение электромотором;
- сопло Лавалья - отрезок водопроводной трубы с вентилем и со специальным соплом для потока жидкости, приваренный к емкости для воды;
- емкость для воды, установленная вертикально (50-литровая железная бочка со встроенным нагревателем воды с подшипниками);
- однофазный электронный счетчик электрической энергии, класс точности 1.0;
- манометр 10 МПа для измерения напора жидкости на емкости для перегретой воды;
- манометр 10 МПа для измерения напора пара на выходе из сопла Лавалья;
- электронный термометр со шкалой 0-110 градусов по Цельсию, ГОСТ 2823-73 ТТ;
- электронный динамометр со шкалой 0-50 кгс;
- другие элементы, обеспечивающие работу установки: гибкие резиновые трубопроводы, станина, объединяющая на общей сварной платформе узлы.

Экспериментальная установка представляет собой станину, на которой установлена емкость для воды с нагревателем воды. На верхней части емкости для воды установлены манометр, показывающий давление внутри и защитный клапан для аварийного выпуска. Холодная вода подается по отдельному трубопроводу. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 1.

На нижней части станины установлен нагнетательный насос. За насосом Г-образная труба, и на конце трубы прикреплено сопло Лавалья.

Вода в емкости нагревается до кипения, температура воды контролируется электронным термометром. Давление воды на емкости контролируется манометром. С выхода емкости по трубопроводу вода поступает в сопло Лавалья через водяной насос центробежного типа, приводимый в движение электромотором. Перед соплом Лавалья установлены вентиль и манометр.

Расходуемая электрической мотором насоса электроэнергия и расходуемая электроэнергия для нагрева воды измеряется счетчиком. Запуск и выключение мотора, нагревателя воды и выпуск пара

производится вручную. Для испытуемого устройства необходимо обеспечить напор горячей воды 3,0-6,0 атмосфер. Использованный насос создавал давление жидкости на входе сопла 3,5-5,55 атм. Электрическая мощность, потребляемая насосом, составляла 0.5 кВт, а мощность нагревателя - 4 кВт.

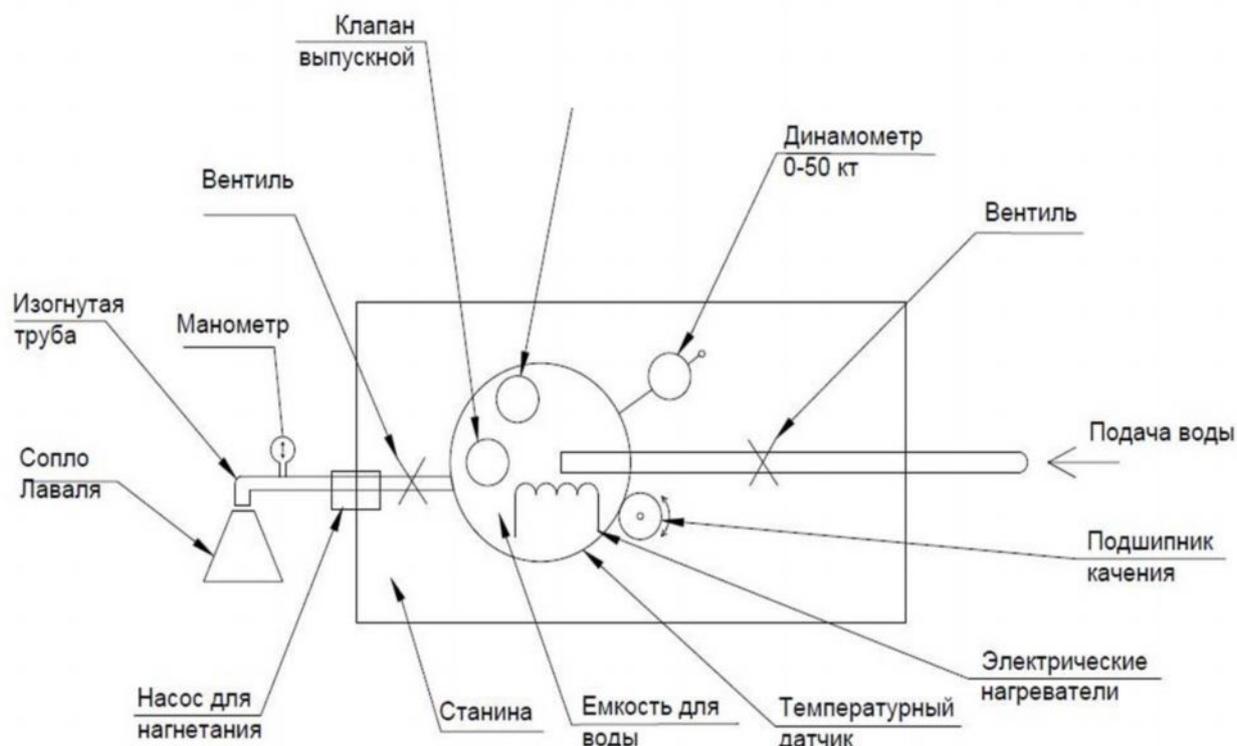
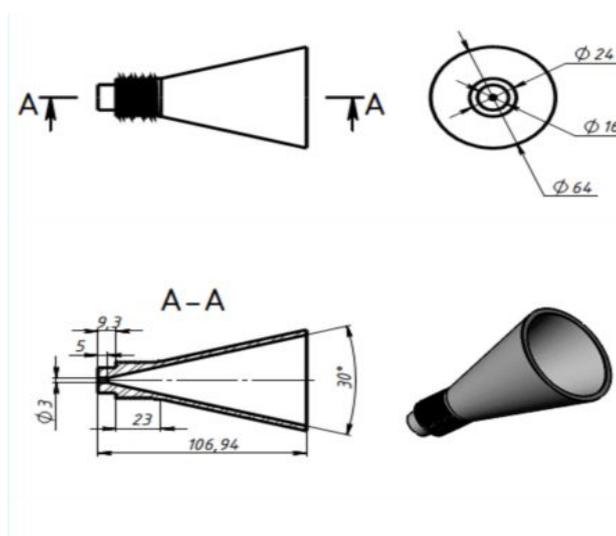
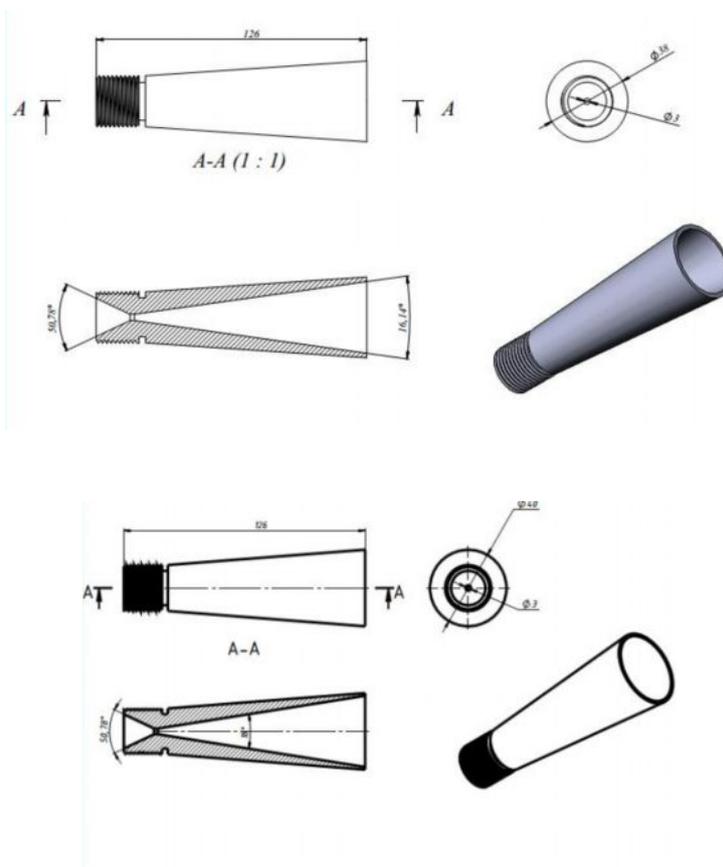


Рис. 1. Схема установки для испытания сопла Лавалья

Термодатчик установлен на нижней части с наружной стороны и показывал фактическое состояние воды. Максимальная температура воды в емкости достигала величин около 90 градусов при начальной температуре 12-14 градусов, за 0,5 часа времени и количестве нагреваемой воды 30-50 литров. В качестве образцов изготовлены три вида сопел Лавалья с различными геометрическими размерами (Рис. 2).



а) Сопло 1



б) Сопло 2

в) Сопло 3

Рис. 2. Сопло Лавая с различными геометрическими размерами

Механизм процесса вскипания. Учитывая данные в работе [4], использована зависимость

$$R_s = F[R / (p dg^2) a] \quad (2)$$

где  $R_s$  – комплекс, характеризующий реактивную тягу сопла Лавая;  $p$  – перепад давления в сопле Лавая.

По результатам предварительных испытаний, пробных расчетов и анализа системы представляется следующая картина физических процессов в установке.

Под действием создаваемого напора нагретая вода в емкости подается через насос в сопло, при этом создаются большие градиенты скорости и вследствие прохождения через отверстие сопла осуществляется превращение горячей воды в пар высокого давления. При прохождении жидкости через сопло создается мощная паровая струя. Установка позволяет получать рабочее тело перед соплом Лавая с параметрами  $t=90$  °С,  $p=2,3 - 3,7$  МПа и расходом до 0,5 кг/сек.

Геометрические характеристики исследованного сопла Лавая представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Геометрические характеристики сопел

№	Диаметр горла (мм)	Длина цилиндрической части (мм)	Длина расширяющейся части (мм)	Угол раствора (град.)	Длина сопла (мм)
1.	5	0	101.94	30	106.94
2.	3	6	111	16.14	126
3.	3	5	120	18	126



Исследование структуры потока в соплах Лавалья производилось в интервале температур  $t_0 = 90^\circ\text{C}$ , давления  $p_0 = 2.2 - 3,4$  МПа.

В результате проведенных опытов установлено, что при большом недогреве воды до состояния насыщения перед соплом при температуре  $30-40^\circ\text{C}$  центральную часть потока занимает неиспарившаяся вода. Длина выброса воды от установки до 1 м.

На всех соплах наблюдается одиночная струя жидкости, имеющая температуру выше температуры насыщения при давлении окружающей среды. Регистрируемая величина перегрева воды на срезе сопла составляла  $7-9^\circ\text{C}$ .

Уменьшение недогрева ( $T = 20-25^\circ\text{C}$ ) ведет к разрушению одиночной струи и постепенному заполнению выходного сечения парокапельной смесью.

Проведенное исследование показало, что при увеличении температуры воды в емкости до  $70^\circ\text{C}$  начинает возникать постепенный переход паро-капельного режима истечения.

Результаты визуальных наблюдений процесса течения вскипающей жидкости внутри сопла Лавалья и выброс парокапельной жидкости на расстояние приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Выброс пароводяной струи

Температура воды в емкости ( $^\circ\text{C}$ )	Давление внутри емкости (МПа)	Длина выброса струи (м)
8	0,21	0,2
25	0,22	0,35
90	2,25	6
90	3,21	7
125	4,24	10

Полученные результаты испытания на экспериментальной установке адиабатного вскипания жидкости в сопле Лавалья позволяют сделать следующие выводы:

1. Интенсивное вскипание жидкости в условиях эксперимента начинается с  $70^\circ\text{C}$  у начала расширяющейся части сопла на стенках канала, что свидетельствует о гетерогенном характере парообразования.

2. Стабильное вскипание жидкости в расширяющейся части сопла Лавалья достигается в условиях эксперимента при температуре  $90^\circ\text{C}$  и давлении внутри емкости не менее 2 МПа. При перегреве воды внутри емкости до  $125^\circ\text{C}$  давление повышается до 4.24 МПа и происходит более интенсивное вскипание, на выходе из сопла формируется развитый паро-капельный поток. Длина выброса струи составляет 10 метров.

3. Угол раскрытия струи на выходе из сопла составляет не более  $11^\circ$  при угле раскрытия сопла  $16^\circ$ , что свидетельствует о наличии отрывных явлений в сопле.

4. Определены оптимальные геометрические размеры сопла Лавалья, они соответствуют соплу №2.

Полученные данные по исследованию сопел Лавалья №2 легли в основу разработки опытного образца гидropаровой турбины.

### Список литературы

1. Кирилов И.И. Теория турбомашин [Текст] / И.И. Кирилов. – Л.: Машиностроение, 1974. - 320 с.



2. Бариллович В.А. О тепловой эффективности геотермальных электростанций [Текст] / В.А.Бариллович, Ю.А. Смирнов, В.И. Стариков // Теплоэнергетика. – 1985. - № 11. - С.54-56.

3. Зысин В.А. Вскипающие адиабатные потоки [Текст] / В.А. Зысин, Г.А. Баранов, В.А. Бариллович, Т.Н. Парфенова. - М.: Атомиздат, 1976.

4. Научные труды SWorld [Текст] Том1, выпуск 49, стр. 64-69.