

Радиусные сопла для бескавитационного истечения воды при высоких перепадах давления

Д. В. КРАТИРОВ¹, Н. И. МИХЕЕВ^{1,2}, В. М. МОЛОЧНИКОВ^{1,2},
И. И. САУШИН², А. Р. ТУХВАТУЛЛИН³, В. А. ФАФУРИН³

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

² Казанский научный центр РАН, Казань, Россия

³ Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии, Казань, Россия,
e-mail: vmolochnikov@mail.ru

Проанализированы условия, при которых радиусные сопла могут быть использованы для измерения или регулирования расхода воды при высоких перепадах давления. С использованием модели URANS проведено численное моделирование течения воды в радиусных соплах. Получена зависимость, устанавливающая связь минимального статического давления на контуре радиусного сопла с его геометрией и значением перепада давления на сопле, на основе которой могут быть оценены условия возникновения кавитации.

Ключевые слова: радиусные сопла, кавитация, численное моделирование, капельная жидкость, перепад давления, статическое давление, давление насыщенных паров.

The conditions have been analyzed at which nozzles with radius inlet contour can be used for measurement and control of water flow rate at large pressure drops. URANS simulation of water flow in nozzles with radius inlet contour has been performed. Relation between the minimal static pressure at the contour of nozzle with radius inlet shape with its geometry and pressure drop across the nozzle has been derived. The relation can be used to estimate conditions for cavitation onset.

Key words: nozzles with radius inlet contour, cavitation, numerical simulation, dropping liquid, pressure drop, static pressure, equilibrium vapor pressure.

Среди многообразия средств измерений расхода и количества жидкостей и газов, используемых в узлах учёта расхода, значительную долю занимают сужающие устройства, в том числе стандартные сопла ИСА 1932 (далее – сопла ИСА) [1–3]. В [3] приведены методика выполнения измерений с помощью сопел ИСА, технические требования к изготовлению сопел, в том числе определены правила построения контура сопла, который формируется двумя радиусными кривыми.

При измерении расхода капельных жидкостей бескавитационное течение жидкости через сужающие устройства (диафрагмы, сопла ИСА, сопла Вентури) обеспечивается при выполнении условия [4]:

$$p_2/p_1 \geq CL,$$

где p_1 , p_2 – абсолютные давления в местах отбора перед сужающим устройством и за ним, соответственно; CL – минимальное значение отношения давлений.

Согласно [4], величина CL зависит от степени сужения сопла, относительной растворимости газа (воздуха) в жидкости и от отношения давления насыщенных паров к абсолютному давлению перед соплом. Методика определения величины CL подробно изложена в [4]. Помимо основного назначения сужающих устройств – измерения расхода – они могут быть использованы для регулировки (задания) расхода жидкости. В расходомерной установке РУ (в Госреестре СИ № 20888–01) расход жидкости, поступающей в мерный бак через поверяемое средство, задаётся с помощью соответствующего сопла и регулировки

давления перед ним. Установка комплектуется набором из десяти сопел. Наибольшее давление в системе может достигать 0,86 МПа. В поверочной установке СПВ-6–80 (в Госреестре СИ № 17200–98) требуемый расход задаётся по перепаду давления на сопле Вентури и поддерживается изменением скорости вращения насоса с помощью частотного регулирования двигателя. Однако в ряде случаев необходимо измерять или регулировать расход капельной жидкости при недопустимом для сопел ИСА отношении давлений p_2/p_1 . Например, использование сопел ИСА в расходном блоке усовершенствованного варианта Государственного первичного эталона единицы объёмного расхода жидкости ГЭТ 64–74 для установки заданного дискретного значения расхода через измерительную магистраль может привести к кавитационным режимам истечения из сопла. В усовершенствованном ГЭТ 64–74 давление жидкости после сопел близко к атмосферному. Точная регулировка расхода через магистраль производится изменением избыточного давления жидкости перед соплами, значение которого может достигать 1 МПа. В этой ситуации соответствующее отношение давлений может быть существенно ниже величины CL .

В настоящей работе предлагается построение простого (выполненного с помощью одной радиусной кривой) контура сопла, обеспечивающего бескавитационный режим истечения при больших перепадах давления на сопле. На основе численного моделирования исследовано течение капельной жидкости в таких соплах. Определены условия бескавитационного истечения. Сформулированы рекомендации по выбору радиуса контура сопла.

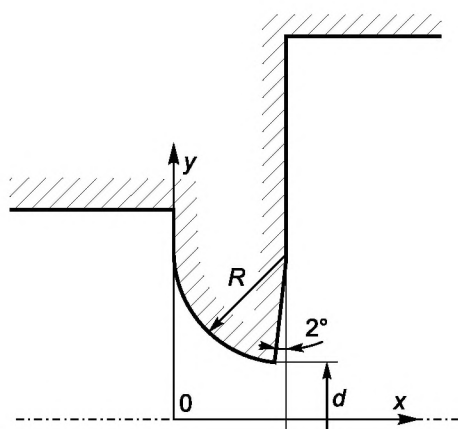


Рис. 1. Схема радиусного сопла

Методика проведения исследований. В качестве объекта исследований рассматриваются радиусные сопла, контур которых описывается дугой окружности с радиусом R , а цилиндрический участок, в отличие от сопел ИСА [3], отсутствует (рис.1). Такой выбор объясняется следующим. Большая кривизна радиуса контура сопла, а также разрыв производной функции, описывающей этот контур, в окрестности соединения радиуса с цилиндрической частью сопла, можно рассматривать в качестве факторов, вызывающих возникновение кавитационного режима истечения из сопла ИСА при нарушении условия $p_2/p_1 \geq CL$. В классе сопел, не имеющих разрыва производной, наиболее технологичными и простыми в изготовлении являются сопла, контур которых описан одним радиусом.

Выполнено численное моделирование течения каплярной жидкости через сопло с диаметром проходного (минимального) сечения d . Задачу решали в осесимметричной постановке. Расчётная область состояла из предвключённого участка круглой трубы диаметром $10d$ и длиной $100d$, непосредственно сопла и поствключённого участка трубы, который имел диаметр $30d$ и длину $300d$. В качестве граничных условий на входной границе расчётной области задавали абсолютное давление p_1^* , а в выходном сечении поствключённого участка – статическое давление, равное атмосферному. Расчётные сетки генерировались в приложении ANSYS Meshing 16 и корректировались в процессе расчёта посредством решателя ANSYS Fluent 16. В математической постановке задачи использованы уравнения

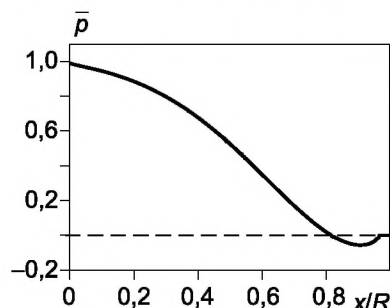


Рис. 2. Распределения локального безразмерного перепада статического давления $\bar{p}$ вдоль контура радиусного сопла для $R/d = 0,85$ при $p_1^* = 0,5 \dots 1,1$ МПа

URANS и уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости. В расчётах применён стандартный полунявный несопряжённый метод pressure-based SIMPLE. Система уравнений URANS замыкалась моделью турбулентности $k-\varepsilon$ Standard со стандартными значениями констант. В качестве сплошной среды использовали воду при температуре 300 К. В расчётах варьировали абсолютное давление во входном сечении сопла $p_1^* = 0,5; 0,8; 1,1$ МПа и радиус контура сопла $R = 0,85d; 1,0d; 1,5d; 2d; 2,5d; 3,0d$.

Сходимость итерационного процесса определяли по значению невязки дифференциальных уравнений для скорости и турбулентных характеристик и нормированной разности средневзвешенных значений параметров течения между двумя последовательными итерациями. Условие завершения итерационного процесса на текущем шаге по времени – достижение всеми относительными невязками значения менее 10^{-4} . Дополнительным критерием сходимости итерационного процесса на текущем временном шаге являлось установление давления на стенке сопла в области разрежения.

Результаты и обсуждение. По результатам моделирования течения в сопле было установлено, что в некотором диапазоне изменения радиуса сопла на его контуре появляются области, в которых статическое давление p ниже, чем давление в выходном сечении сопла p_2 . При этом минимальное значение статического давления $p_{\min}$ наблюдается на стенке сопла, в непосредственной близости от которой кривизна линий тока наибольшая. Распределения локального безразмерного перепада статического давления

$$\bar{p} = (p - p_2)/(p_1^* - p_2)$$

вдоль контура радиусного сопла для $R/d = 0,85$ ($d = 28$ мм) при варьировании p_1^* представляют единую зависимость (рис. 2). Таким образом, при одной и той же координате x/R

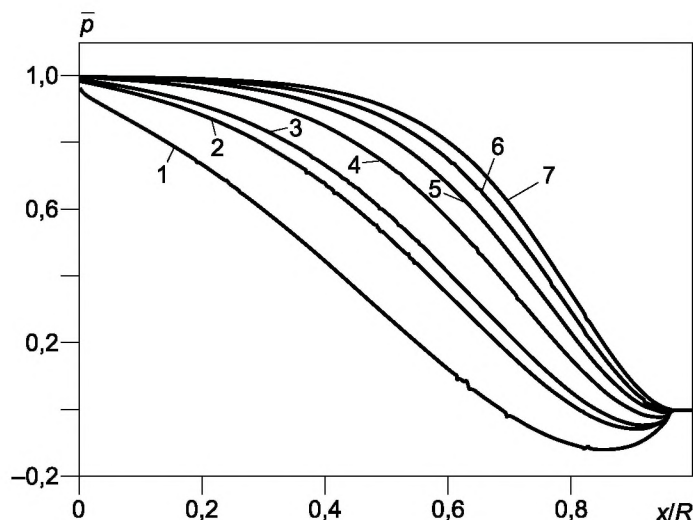


Рис. 3. Распределение статического давления $\bar{p}$ вдоль контура сопла в зависимости от радиуса сопла: 1 – 7 – $R/d = 0,5; 0,85; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0$, соответственно

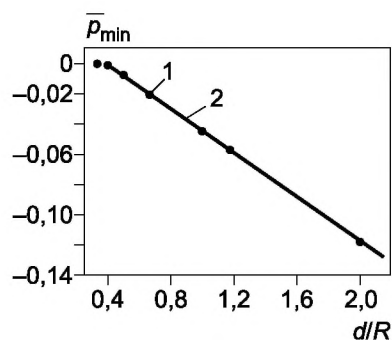


Рис. 4. Зависимость минимального значения $\bar{p}_{\min}$ относительного статического давления на контуре сопла от его радиуса:
1 – результаты численного моделирования; 2 – аппроксимирующая зависимость (1)

значения безразмерного статического давления на стенке радиусного сопла одинаковы и не зависят от перепада давления на сопле.

С увеличением радиуса сопла характер распределения давления p вдоль контура сопла изменяется: область минимального давления смещается к выходному сечению сопла, а при $R/d \geq 2,5$ совпадает с этим сечением (рис. 3). При этом абсолютное значение минимального статического давления $p - p_2$ на контуре сопла уменьшается. Для $R/d = 0,5$ и $p_2 = 0,1$ МПа давление $p_{\min}$ на контуре сопла становится нулевым уже при $p_1^* = 0,93$ МПа. Решение для $p_1^* = 1,1$ МПа (кривая 1 на рис. 3) получено, поскольку при численном исследовании жидкость рассматривается как сплошная среда. Такая постановка задачи не предполагает возможность моделирования явления кавитации, которое возникает, когда давление в некоторой точке потока становится равным давлению насыщенных паров жидкости при заданной температуре.

На рис. 4 показаны результаты расчёта

$$\bar{p}_{\min} = (p_{\min} - p_2) / (p_1^* - p_2) = f(d/R),$$

которые при $p_{\text{отн}} < 0$ ($d/R > 0,4$) удовлетворительно аппроксимируются линейной зависимостью

$$\bar{p}_{\min} = -0,073(d/R) + 0,029. \quad (1)$$

Используя зависимость (1), для заданного p_1^* можно определить наименьшее теоретическое значение радиуса

сопла $R_{\min}$, которое соответствует равенству минимального абсолютного давления жидкости на контуре сопла давлению насыщенных паров жидкости p_i при заданной температуре. При $R > R_{\min}$ должен обеспечиваться бескавитационный режим работы сопла. Для воды при температуре 300 К давление насыщенных паров $p_i = 3,567$ кПа. При $p_1^* = 1,1$ МПа и $p_2 = 0,1$ МПа наименьшее допустимое значение относительного радиуса сопла составляет $R/d = 0,58$. Полученное значение радиуса соответствует заложенной в расчёты идеализированной модели жидкости: вода считается дистиллированной, растворённый в ней воздух отсутствует. Поэтому на практике радиус необходимо задавать с некоторым запасом по отношению к значению, определённому по зависимости (1).

В расходном блоке усовершенствованного варианта ГЭТ 64–74 используются радиусные сопла с относительным радиусом $R/d = 0,85$. Это позволяет, в отличие от варианта с соплами ИСА, обеспечить бескавитационный режим истечения во всем диапазоне изменения избыточного давления перед соплами, максимальное значение которого составляет 1,0 МПа.

Заключение. Выполнены численные исследования течения воды в радиусных соплах при высоких перепадах давления на сопле. Получена зависимость минимального статического давления на контуре радиусного сопла от его геометрических характеристик и перепада давления на сопле. Эта зависимость может быть использована для оценки условий бескавитационного истечения воды из радиусных сопел.

Л и т е р а т у р а

1. Кремлёвский П. П. Расходомеры и счётчики количества веществ: Справочник: Кн.1. СПб.: Политехника, 2002.
2. Кремлёвский П. П. Расходомеры и счётчики количества веществ: Справочник: Кн.2. СПб.: Политехника, 2004.
3. ГОСТ 8.586.3–2005 (ИСО 5167-3:2003). Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч.3. Сопла и сопла Вентури. Технические требования.
4. РД 50-213–80. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами.

Дата принятия: 04.04.2017.