

УДК 621.22

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРЕВОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ДРОССЕЛЯ ДЛЯ СИСТЕМ ПОДГОТОВКИ ПРОБ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

© 2015 А. Г. Гимадиев¹, А. В. Уткин²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

²ООО Научно-производственное предприятие «Гималаи», г. Самара

Приведены теоретические и экспериментальные исследования характеристик вихревого гидравлического дросселя (диода) для систем подготовки проб теплоносителя (пара, воды). Выполнено численное моделирование течения в канале вихревого дросселя с помощью программного пакета Ansys CFX при прямом и обратном подключениях. Получены картины течений, поля распределений параметров потока в проточной части дросселя и его расходно-перепадные характеристики. Расчётные характеристики дросселя отличаются не более чем на 10 % относительно экспериментальных данных. На основе серии расчётов выбраны геометрические параметры дросселя, обеспечивающие надёжную работу системы подготовки пробы теплоносителя (СПП).

Гидравлический вихревой дроссель; система подготовки пробы; численное моделирование; Ansys CFX; выбор параметров; эксперимент.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-4-110-117

Введение

Одной из важных задач, нередко возникающих при эксплуатации пневмогидравлических систем, является необходимость дросселирования потока жидкости с высокого давления при малом её расходе. К такой системе относится оборудование для подготовки пробы теплоносителя, применяемое практически на всех тепловых электростанциях. Важность задачи обусловлена необходимостью обеспечения длительной (непрерывной) эксплуатации СПП в условиях снижения давления пара (воды) с 25 до 0,2 МПа при расходе $(0,2...2) \cdot 10^{-3}$ м³/мин без изменения характеристики дросселирующего элемента [1]. Стандартное исполнение устройств дросселирования осуществляется с помощью набора дроссельных шайб с отверстием менее 1 мм. При недостаточной чистоте теплоносителя такие устройства склонны к засорению, облитерации и требуют дополнительных регламентных работ для их очистки. В связи с этим возникает необходимость в разработке дросселирующего устройства, устойчивого к загрязнению потока и эро-

зионному износу. Анализ применяемых в промышленности гидравлических дросселей показал, что указанным выше требованиям удовлетворяют в большей степени вихревые дроссели или так называемые гидравлические диоды [2].

Принципиально гидравлические диоды делятся на два типа: резисторные (рис. 1, а) и дефлекторные или вихревые (рис. 1, б). Направление, при котором гидравлический диод обладает наименьшим сопротивлением, называют прямым, а противоположное направление – обратным. В резисторных диодах гидравлическое сопротивление при обратном направлении обусловлено деформацией потока жидкости, а в дефлекторных – за счёт отклонения струи, её турбулизации или закрутки в вихревой камере [3]. Учитывая то, что в дефлекторном гидравлическом диоде потеря энергии потока жидкости происходит как в вихревой камере, так и в самом дросселирующем отверстии, можно обеспечить большее его проходное сечение при одном и том же гидравлическом сопротивлении, что благоприятно влияет на его устойчивость к загрязнению.

В дальнейшем было принято решение об исследовании характеристик вихревого дросселя как наиболее перспек-

тивного для обеспечения высокого гидравлического сопротивления при равной площади проходного сечения.

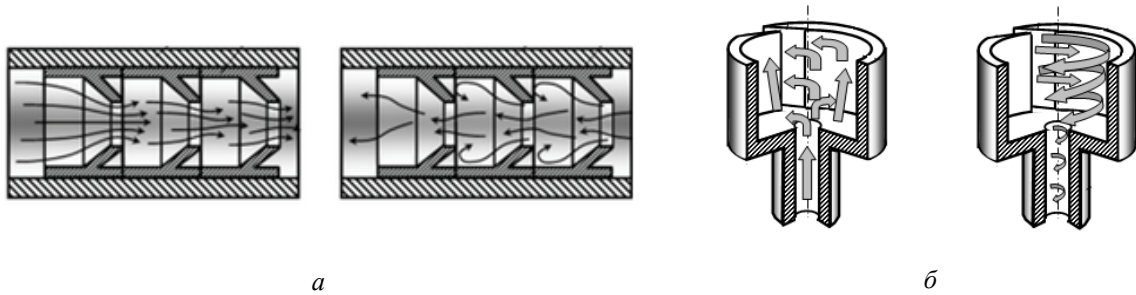


Рис. 1. Схемы гидравлических диодов (а – резисторного; б – дефлекторного) при потоках жидкости в прямом (на схемах слева) и обратном (на схемах справа) направлениях

Теоретическое и экспериментальное исследование характеристик вихревого дросселя

Объектом исследований явились характеристики вихревого гидравлического дросселя (рис. 2), входящего в состав фильтро-дроселирующего устройства (ФДУ) СПП [4]. При прямом подключе-

нии жидкость проходит через конфузрный канал 1, дросселирующее отверстие и выходит из вихревой камеры 2 без закрутки через тангенциальные отверстия 3. Сопротивление при прямом подключении небольшое и связано в основном с гидравлическим сопротивлением дросселирующего отверстия.

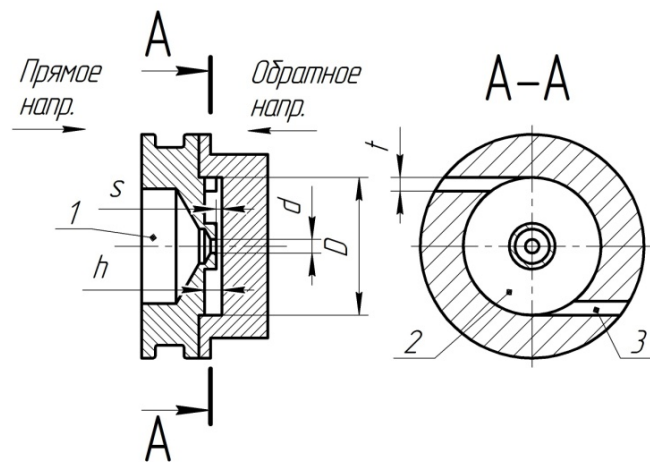


Рис. 2. Конструктивная схема вихревого дросселя:
1 – конфузрный канал, 2 – вихревая камера, 3 – тангенциальное отверстие

При обратном подключении жидкость, протекая через тангенциальные отверстия 3, закручивается в вихревой камере 2 и далее дросселируется через отверстие. При таком подключении диода общее гидравлическое сопротивление складывается из сопротивления дросселирующего отверстия и сопротивления вихревой камеры, возникающего при закрутке потока.

Теоретическое исследование характеристик вихревого дросселя проводилось при следующих его параметрах: $a = D / h$ – степень расширения вихревой камеры; $s = 0,5$ мм – высота отверстия над стенкой камеры; $d = 1,2$ мм – диаметр дросселирующего отверстия; $t = 1,2$ мм – ширина проточки тангенциального отверстия.

Численное моделирование течения жидкости в канале дросселя осуществлялось в программной среде Ansys CFX в стационарной постановке [5, 6]. Использовалась тетраэдрическая сетка с призматическим пограничным слоем. Минимальный размер элемента, равный 0,3 мм, выбран как оптимальный в плане точности и времени расчёта из рассмотрения сеток с размерами 0,2 мм, 0,25 мм и 0,3 мм. Качество элементов сетки оценивалось с помощью параметра скошенности Skewness, максимальное значение которого оказалось меньше 0,88. Протяжённость выходной зоны была увеличена для устранения влияния завихрения на сходимость решения.

Граничные условия задавались в виде массового расхода на входе и статического давления на выходе. В качестве

жидкости использовалась вода плотностью $\rho = 997 \text{ кг/м}^3$. Использовалась $k-\epsilon$ модель турбулентности с интенсивностью 5 %. Применялась модель кавитации с давлением насыщенных паров, равным 1288 Па. Применялась схема адвекции High Resolution с первым порядком сходимости и физическим временным шагом. Условием завершения расчёта являлось достижение значений среднеквадратичных невязок величины 10^{-5} , а также выхода значений Imbalance (разность расходов на входе и выходе) на нулевое значение. Результаты моделирования течения в канале дросселя при условном перепаде давления в 4,5 МПа для прямого и обратного подключений представлены на рис. 3–7.

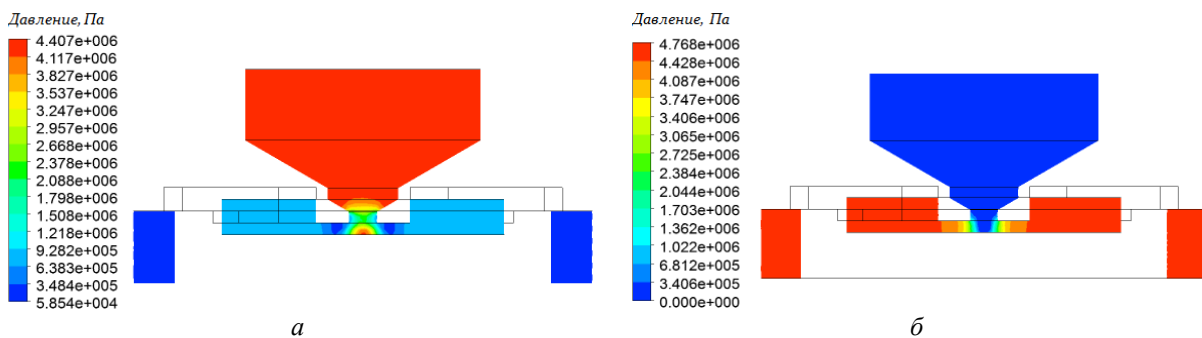


Рис. 3. Поля распределения давления жидкости при прямом (а) и обратном (б) подключениях вихревого дросселя

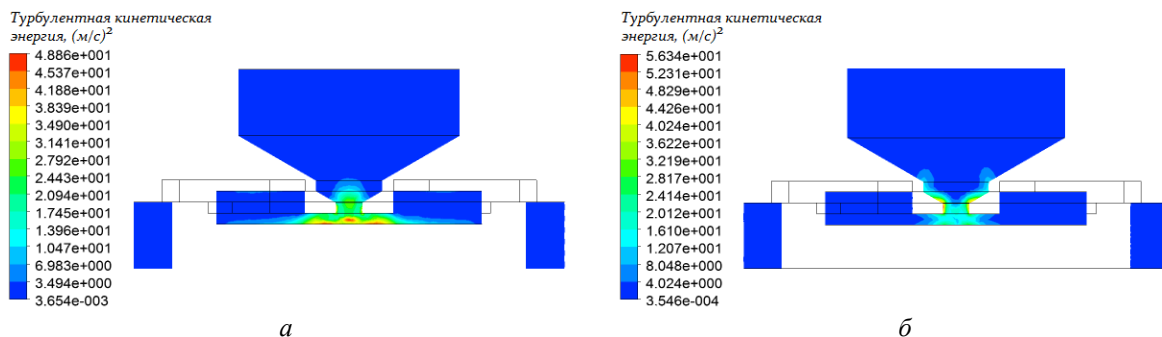


Рис. 4. Поля распределений турбулентной кинетической энергии жидкости при прямом (а) и обратном (б) подключениях вихревого дросселя

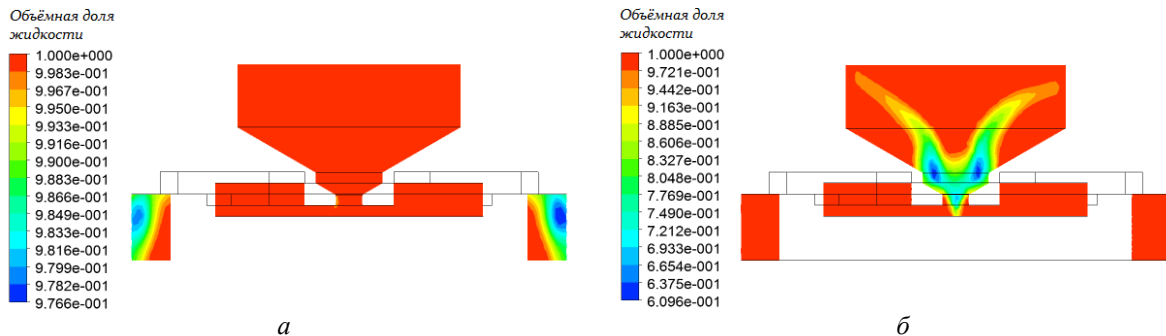


Рис. 5. Поля распределений объёмных долей жидкости при прямом (а) и обратном (б) подключениях вихревого дросселя

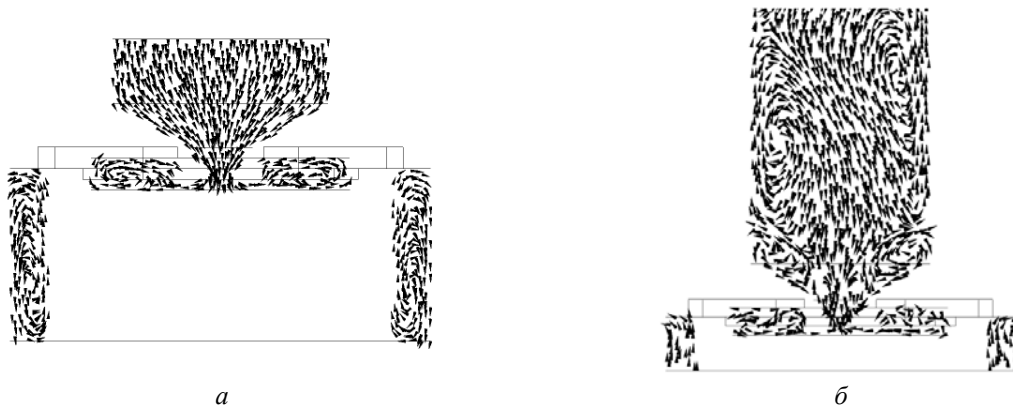


Рис. 6. Векторы скорости при прямом (а) и обратном (б) подключениях вихревого дросселя

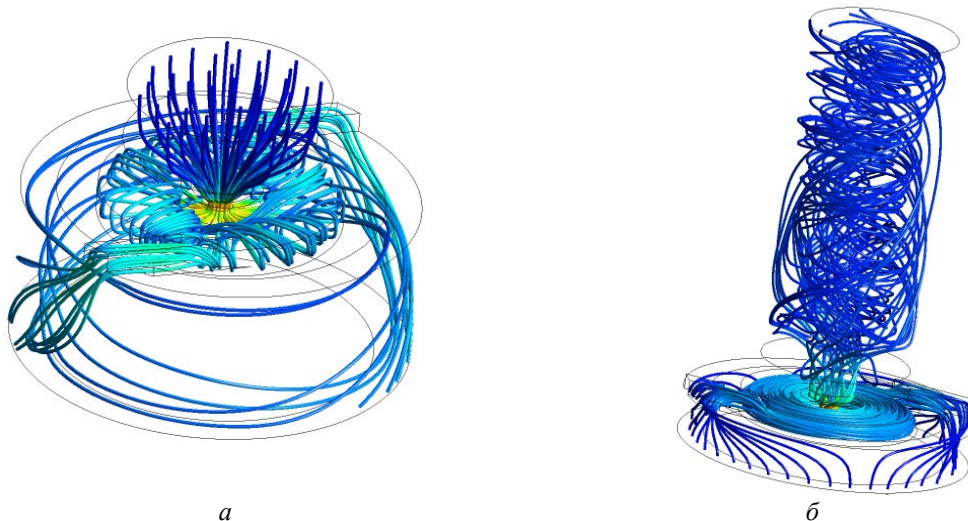


Рис. 7. Линии тока при прямом (а) и обратном (б) подключениях вихревого дросселя

Из анализа распределения давления (рис. 3) можно сделать вывод, что при прямом подключении основная потеря давления происходит в дросселирующем отверстии, а при обратном подключении добавляются потери на вихреобразование. При обратном подключении, после прохождения жидкостью дросселирующего

отверстия, в центре потока возникает давление ниже атмосферного, в результате чего происходит явление кавитации, что подтверждается работой [7]. По распределению турбулентной кинетической энергии (рис. 4) видно, что в области с повышенной кинетической энергией происхо-

дит зарождение кавитации в виде образований фракций пара (рис. 5).

Распределение вектора скорости в проточной части (рис. 6, 7) имеет сложный характер. На выходе из дросселирующего отверстия при обратном подключении поток жидкости имеет высокую скорость и при этом сильно закручен. Линии тока показывают, что при обратном подключении происходит закрутка потока в вихревой камере, а после прохождения дросселирующего отверстия возникает зона вихрей и обратных токов.

В процессе эксперимента измерялись перепад давления на вихревом дросселе датчиком перепада давления ПЛХ-412/100 с аппаратурой 4АНЧ-22 и расход жидкости - косвенным методом (по перепаду давления на мерной диафрагме с диаметром отверстия 1,5 мм). В результате экспериментальных исследований построена расходно-перепадная характеристика вихревого дросселя в прямом и обратном направлениях (рис. 8). Коэффициент диодности k равен отношению чисел Эйлера при обратном и прямом подклю-

чениях (при одинаковых расходах воды) [8]:

$$k = \frac{Eu_{обр}}{Eu_{пр}} = 5,3,$$

$$Eu = \frac{\Delta p}{0,5\rho v^2},$$

где Δp – падение давления жидкости на дросселе; v – скорость потока жидкости в дросселирующем отверстии; ρ – плотность жидкости.

Сравнение экспериментальных данных с результатами расчёта в программе Ansys CFX (рис. 8) показывает их хорошую сходимость. Максимальная погрешность определения расхода при одном и том же перепаде давления оказалась равной 10 % при условии максимальной погрешности эксперимента 3 %. Используемую методику расчёта можно применять при дальнейшей оптимизации гидравлического диода.

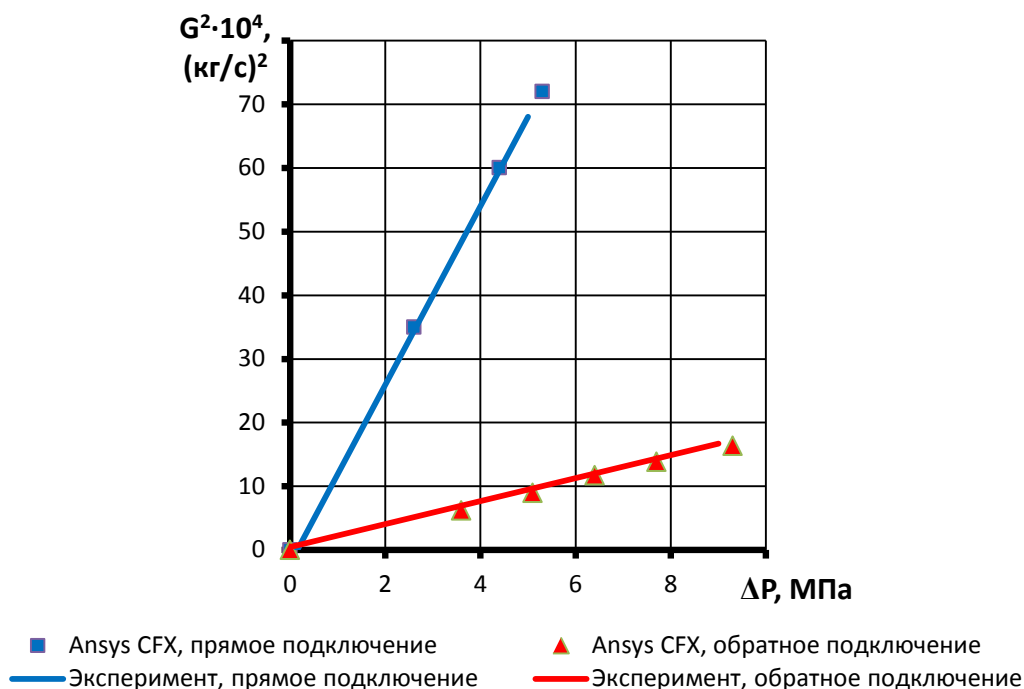


Рис. 8. Расходно-перепадная характеристика вихревого дросселя

Влияние геометрических параметров на характеристики вихревого дросселя

Из проведённых выше исследований ясно, что наибольшее гидравлическое сопротивление реализуется при обратном подключении вихревого дросселя. Поэтому при выборе параметров дросселя рассматривался только такой вариант расчёта его расходно-перепадной характеристики в программном пакете Ansys CFX.

По вышеизложенной методике был проведён ряд расчётов дросселя с комби-

нациями параметров: $d = 1,2; 1,5$ мм; $a = 8$; $s = 0,5$ мм; $t = 1,2$ мм; $n = 1; 2$ [9].

Результаты расчётов (рис. 9) позволяют утверждать, что при уменьшении количества тангенциальных входов с двух до одного гидравлическое сопротивление резко возрастает. Такой эффект может быть использован для уменьшения числа применяемых дросселей в ФДУ с трёх до двух. Напротив, при увеличении диаметра дросселирующего отверстия с 1,2 мм до 1,5 мм гидравлическое сопротивление падает.

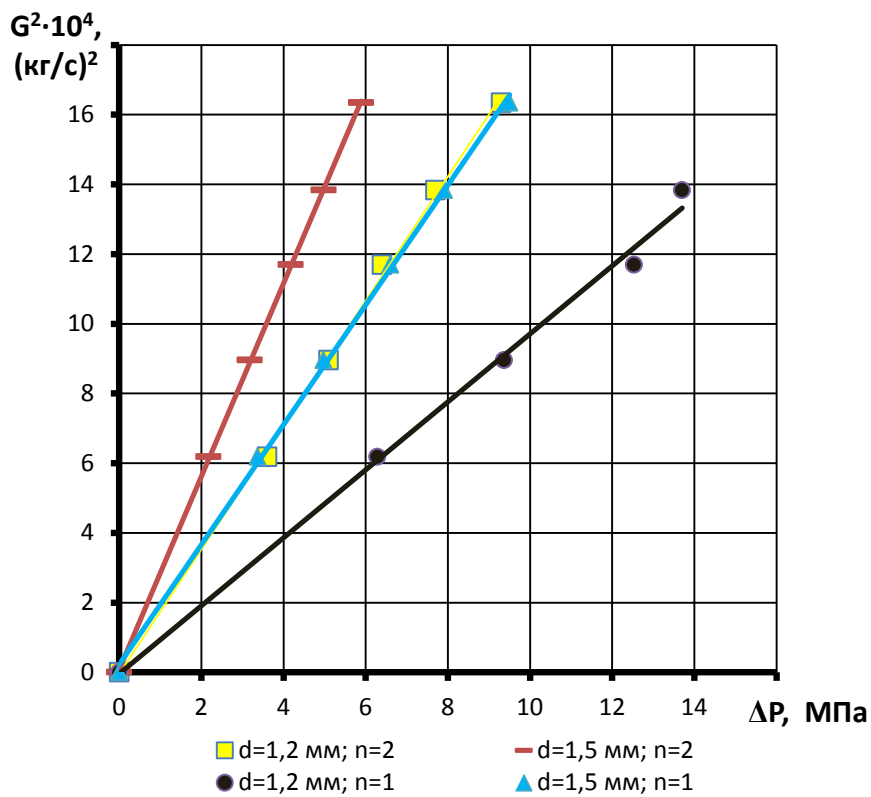


Рис. 9. Теоретические расходно-перепадные характеристики вихревого дросселя при обратном подключении и различных конструктивных параметрах (линии – аппроксимации по методу наименьших квадратов)

На основе представленных характеристик для повышения надёжности работы СПП были выбраны следующие приемлемые параметры для усовершенствованного вихревого дросселя: $d = 1,5$ мм, $s = 0,5$ мм, $a = 8$, $t = 1,5$ мм, $n = 1$. Сравнение расходно-перепадных характеристик вихревых дросселей, один из которых находится в эксплуатации в составе СПП,

а другой имеет выбранные выше параметры, показало, что при одинаковом перепаде давления реализуются одинаковые расходы. При этом площадь дросселирующего отверстия у усовершенствованного дросселя на 56 % больше, что обеспечивает высокие показатели устойчивости к загрязнению.

Заключение

Разработана методика расчёта расходно-перепадных характеристик вихревого гидравлического дросселя для СПП на основе моделирования в программном пакете Ansys CFX.

На основе экспериментально подтверждённых исследований характеристик вихревого дросселя применительно к СПП рекомендовано обратное его подключение, при котором реализуется мак-

симальное гидравлическое сопротивление при относительно большей площади проходного сечения дросселирующего отверстия.

На основе расчётов осуществлён выбор параметров вихревого дросселя, при которых площадь дросселирующего отверстия увеличилась на 56 % относительно дросселя, применяемого в ФДУ эксплуатирующейся СПП.

Библиографический список

1. РД 24.031.121-2007. Оснащение паровых стационарных котлов устройствами для отбора проб пара и воды. СПб: Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова, 2007. 10 с.
2. Ястребова Е.В. Струйные диоды (обзор) // Автоматика и телемеханика. 1971. № 3. С. 101–106.
3. Носов Е.Ю., Краморов А.Г. Экспериментальное исследование характера стационарного потока жидкости через гидродиоды // Омский научный вестник. 2007. № 3(60). С. 50-52.
4. Гимадиев А.А., Гимадиев М.А., Ермошкин А.З. Фильтро-дросселирующее устройство: патент РФ на полезную модель № 36888; опубл. 27.03.2004.
5. Kulkarni A.A., Ranade V.V. CFD simulations of flow in vortex diodes // American Institute of Chemical Engineers. 2008. V. 54, no. 5. P. 1139-1152. doi: 10.1002/aic.11439
6. Yin J., Jiao L., Wang L.Q. Large eddy simulation of unsteady flow in vortex diode // Nuclear Engineering and Design. 2010. V. 240, Iss. 5. P. 970–974. doi: 10.1016/j.nucengdes.2010.01.010
7. Jiao L., Zhang P.P., Chen C.N., Yin J.L., Wang L.Q. Experimental study on the cavitation of vortex diode based on CFD // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2012. V. 15, Iss. 6. P. 062058. doi: 10.1088/1755-1315/15/6/062058
8. Burnett R., Caso D., Tang J. Fluidic Diode Development and Optimization. http://fhr.nuc.berkeley.edu/wp-content/uploads/2014/10/10-001_Fluidic_Diode.pdf
9. Kulkarni A.A., Ranade V. V., Rajeev R., Koganti S.B. Pressure drop across vortex diodes: Experiments and design guidelines // Chemical Engineering Science. 2009. V. 64. P. 1285-1292. doi: 10.1016/j.ces.2008.10.060

Информация об авторах

Гимадиев Асгат Гатъятович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: gimadiev_ag@mail.ru. Область научных интересов: динамика пневмогидравличе-

ских систем управления и контроля энергетических установок.

Уткин Алексей Валерьевич, инженер-конструктор, ООО Научно-производственное предприятие «Гималаи», г. Самара. E-mail: utkin-alexey1@yandex.ru. Область научных интересов: мехатронные системы управления.

STUDY OF CHARACTERISTICS OF THE VORTEX THROTTLING VALVE FOR THE SYSTEM OF WATER SAMPLE CONDITIONING

© 2015 A. G. Gimadiev¹, A. V. Utkin²

¹Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

²Research and Production Enterprise «Gimalai» Ltd., Samara, Russian Federation

Theoretical and experimental studies of characteristics of the vortex throttling valve (diode) for steam and water sample conditioning systems are discussed in the paper. Numerical simulation of forward and reverse flows in the vortex throttle channel is carried out with the help of the Ansys CFX software. Flow visualization, flow parameter field distribution, flow rate vs. pressure drop characteristics are obtained. The design characteristics of the throttling valve are consistent with the experimental results with an accuracy of 10%. Geometric parameters of the throttling valve are selected on the basis of a series of calculations to ensure reliable operation of the sample conditioning system.

Vortex throttling valve; sample conditioning system; numerical modeling; Ansys CFX; experiment.

References

1. GD 24.031.121-2007. Equipment of stationary steam boilers devices for sampling of steam and water. St. Petersburg: Polzunov Research and Development Association on Research and Design of Power Equipment Publ., 2007. 10 p. (In Russ.)
2. Yastrebova E.V. Fluid diodes (review). *Automation and Remote Control*. 1971. No. 3. P. 101-106. (In Russ.)
3. Nosov E.Y., Kramorov A.G. Experimental nature study of stationary flow of liquid through hydro diodes. *Omskiy nauchnyy vestnik*. 2007. No. 3(60). P. 50-52. (In Russ.)
4. Gimadiev A.A., Gimadiev M.A., Ermoshkin A.Z. *Fil'tro-drosseliruyushchee ustroystvo* [Filtering and pressure reducing device]. Patent RF, no. 36888, 2004. (Publ. 27.03.2004)
5. Kulkarni A.A., Ranade V.V. CFD simulations of flow in vortex diodes. *American Institute of Chemical Engineers*. 2008. V. 54, no. 5. P. 1139-1152. doi: 10.1002/aic.11439
6. Yin J., Jiao L., Wang L.Q. Large eddy simulation of unsteady flow in vortex diode. *Nuclear Engineering and Design*. 2010. V. 240, Iss. 5. P. 970-974. doi: 10.1016/j.nucengdes.2010.01.010
7. Jiao L., Zhang P.P., Chen C.N., Yin J.L., Wang L.Q. Experimental study on the cavitation of vortex diode based on CFD. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2012. V. 15, Iss. 6. P. 062058. doi: 10.1088/1755-1315/15/6/062058
8. Burnett R., Caso D., Tang J. Fluidic Diode Development and Optimization. Available at: http://fhr.nuc.berkeley.edu/wp-content/uploads/2014/10/10-001_Fluidic_Diode.pdf
9. Kulkarni A.A., Ranade V. V., Rajeev R., Koganti S.B. Pressure drop across vortex diodes: Experiments and design guidelines. *Chemical Engineering Science*. 2009. V. 64, Iss. 6. P. 1285-1292. doi: 10.1016/j.ces.2008.10.060

About the authors

Gimadiev Asgat Gatyatovich, Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Automatic Systems of Power Plants, Samara State Aerospace University, Russian Federation. E-mail: gimadiev_ag@mail.ru. Area of Research: dynamics

of pneumatic-hydraulic control systems and control of power plants.

Utkin Aleksey Valeryevich, design engineer, Research and Production Enterprise «Gimalai» Ltd. E-mail: utkin-aleksey1@yandex.ru. Area of Research: mechatronic control systems.