

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАТНОГО КЛАПАНА СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ НА МАСШТАБНОЙ МОДЕЛИ

Д.Е. Балувев, Д.В. Гусев, С.И. Мешков, О.Л. Никаноров,

С.Л. Осипов, С.А. Рогожкин, С.В. Рухлин, С.Ф. Шепелев

*Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова, ОАО
«ОКБМ Африкантов». 603074, г. Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15*



Представлены результаты экспериментальных исследований функциональных характеристик обратного клапана, применяемого в системе безопасности реактора с жидкометаллическим теплоносителем на масштабной модели. Обратный клапан предложенной конструкции с запирающим элементом в виде полого шара имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с наиболее распространенными клапанами с запирающим элементом в виде тарельчатой захлопки, заключающихся в независимости работы клапана от функционирования других систем безопасности и в отсутствии трущихся пар. Необходимость проведения экспериментальных исследований обусловлена новизной предложенной конструкции обратного клапана и отсутствием верифицированных методик расчетного обоснования функциональности обратных клапанов подобного типа. Представлены методика расчетного обоснования гидродинамических параметров предложенной конструкции обратного клапана и критерии подобия, описывающие его гидродинамические характеристики, численные значения которых были получены в ходе расчетов с использованием гидродинамического коммерческого кода ANSYS-CFX. Описана экспериментальная модель обратного клапана с двумя альтернативными видами запирающего элемента – в виде полого шара в опорной чаше и в виде полусферы на направляющем стержне, проходящем через опорную втулку на оси клапана. Дано краткое описание испытательного стенда. Гидродинамические характеристики модели клапана, полученные в ходе экспериментальных исследований, представлены на графиках в виде зависимостей от некоторых конструктивных и эксплуатационных параметров модели.

Ключевые слова: реактор с жидкометаллическим теплоносителем, система безопасности, обратный клапан, гидродинамическая сила, критерии подобия, модель обратного клапана, стенд для испытаний

ВВЕДЕНИЕ

При разработке перспективных проектов ЯЭУ с жидкометаллическим теплоносителем (ЖМТ) [1] большое внимание уделяется конструированию и расчетному обоснованию систем безопасности [2].

© Д.Е. Балувев, Д.В. Гусев, С.И. Мешков, О.Л. Никаноров, С.Л. Осипов,
С.А. Рогожкин, С.В. Рухлин, С.Ф. Шепелев, 2015

Одним из элементов системы безопасности реактора с ЖМТ является обратный клапан (ОК) (рис. 1), перекрывающий течение теплоносителя в системе в режимах нормальной эксплуатации реактора и открывающий течение теплоносителя в режимах, требующих подключения системы безопасности. Прототипом для конструкции, представленной на рисунке, послужил обратный клапан реактора с жидкометаллическим теплоносителем, приведенный в [3].

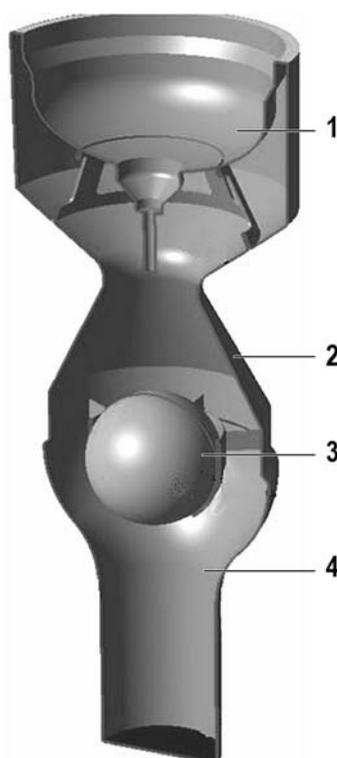


Рис. 1. Обратный клапан (в разрезе): 1 – днище теплообменника; 2 – проточная часть клапана; 3 – запирающий элемент; 4 – подводящий трубопровод

Существенным преимуществом конструкции ОК по сравнению с наиболее распространенными клапанами с запирающим элементом в виде тарельчатой захлопки является, с одной стороны, независимость работы клапана от работоспособности других, важных для безопасности, систем реактора, а с другой – отсутствие в составе клапана взаимосвязанных конструктивных элементов и трущихся пар. Запирающий элемент перемещается в полости клапана исключительно за счет воздействия на него теплоносителя.

В настоящее время отсутствуют отработанные конструкции ОК подобного типа и верифицированные методики их расчета.

В связи с этим был разработан комплекс экспериментальных исследований, на первом этапе которого необходимо было получить гидродинамические характеристики обратного клапана на масштабной модели. Эти исследования были выполнены на экспериментальном стенде, расположенном в ОАО «ОКБМ Африкантов».

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основная сложность расчетного обоснования конструкции обратного клапана заключается в определении расхода теплоносителя, при котором ОК закрывается. Эта функциональная характеристика работоспособности конструкции ОК в целом может быть определена из уравнения баланса сил, действующих на запирающий элемент клапана:

$$m \frac{dw_m}{d\tau} = F_y + (m_o - m)g, \quad (1)$$

где m_o , m – массы запирающего элемента и вытесненного им теплоносителя соответственно, кг; w_m – скорость перемещения запирающего элемента, м/с; τ – время, с; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; F_y – гидродинамическая сила, Н, действующая на запирающий элемент со стороны теплоносителя,

$$F_y = \int_S (p + \tau_w) dS, \quad (2)$$

где p – давление теплоносителя на поверхности запирающего элемента, Па; $\tau_w = \mu_o dw_o/d\tau$ – касательное напряжение на поверхности запирающего элемента, Н/м²; w_o – скорость теплоносителя, м/с; S – поверхность запирающего элемента, м²; μ_o – коэффициент динамической вязкости теплоносителя, Па·с.

В [4] при рассмотрении перемещения запирающего элемента обратного клапана под действием гидродинамической силы, действующей на него со стороны теплоносителя, постулируется как доказанный факт, следующий из опытов, что начав двигаться в направлении движения теплоносителя, запирающий элемент уже не останавливается до тех пор, пока не перекроет течение среды через клапан.

С учетом этого для определения расхода, при котором ОК закрывается, уравнение (1) можно рассматривать в стационарной постановке, определяя силу, создаваемую на поверхности запирающего элемента потоком обтекающего его теплоносителя, при которой запирающий элемент приходит в движение:

$$F_y = (m_o - m)g. \quad (3)$$

Для выбора масштаба модели обратного клапана с учетом возможностей имеющейся экспериментальной базы система, состоящая из уравнений (2) и (3), была проанализирована на предмет выбора критериев подобия с помощью метода анализа размерностей [5, 6].

В результате были получены следующие четыре критерия:

- Рейнольдса $Re = w_o \cdot l / \nu_o$;
- Эйлера $Eu = \Delta p / (\rho \cdot w_o^2)$;
- Фруда $Fr = w_o^2 / (g \cdot l)$;
- плавучести $Bu = m_o / m$,

где l – характерный размер, в качестве которого был принят радиус наружной поверхности запирающего элемента ОК.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ И СТЕНД

В результате расчетного анализа натурной конструкции ОК с помощью CFD-кода ANSYS-CFX [7] (при использовании модели турбулентности SST) были получены значения расхода жидкометаллического теплоносителя, необходимого для закрытия обратного клапана, и перепада давления на ОК при работе системы безопасности реактора. На основании рассчитанных гидродинамических параметров работы ОК, значения критериев подобия получились следующими: $Re = 2,1 \cdot 10^6$; $Eu = 0,323$; $Fr = 0,458$; $Bu = 1,61$.

С учетом результатов экспериментов и полученных значений критериев подобия для испытаний была создана модель, выполненная в масштабе 1:5 по отношению к размерам натурной конструкции обратного клапана. При испытаниях исследовались гидродинамические характеристики модели с запирающим элементом в виде полого шара (герметичного и заполненного водой), в исходном состоянии располагающегося в опор-

ной чаше (рис. 2а) или на тонкостенных ребрах (рис. 2б), а также полушария, соединенного с направляющим стержнем (рис. 2в).

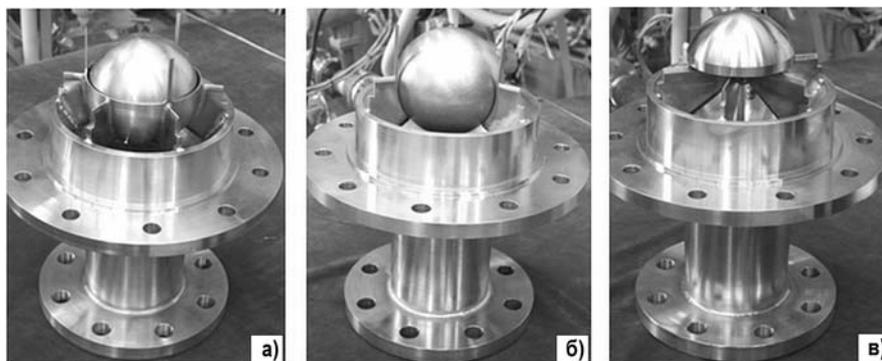


Рис. 2. Запирающий элемент модели обратного клапана: а) – полый шар в опорной чаше; б) – полый шар на опорных ребрах; в) – полушарие, соединенное с направляющим стержнем

В ходе предварительных испытаний конструкция модели с запирающим элементом в виде полушария, соединенного с направляющим стержнем, была отвергнута на основании сравнительного анализа получаемых гидродинамических характеристик модели и исходя из конструктивных соображений. Конструкция модели с запирающим элементом в виде полый сферы, в исходном положении располагающейся на тонкостенных ребрах, оказалась неработоспособной.

Поэтому в качестве «базового» варианта конструкции была принята модель с запирающим элементом в виде полого шара, в исходном положении располагающегося в опорной чаше, с зазором между ее поверхностью и поверхностью запирающего элемента. Величина зазора была выбрана из конструктивных соображений.

При исследовании зависимости гидродинамических параметров модели от положения запирающего элемента в опорной чаше шар перемещали с помощью регулировочных винтов так, что зазор в направлении движения воды увеличивался, а в экваториальной плоскости шара оставался неизменным. В предельном положении запирающего элемента в опорной чаше его экваториальная плоскость совпадала с кромкой опорной чаши.

Для получения зависимости расхода ЖМТ на закрытие модели от массы запирающего элемента полый шар заполнялся водой на 50 и 100 %.

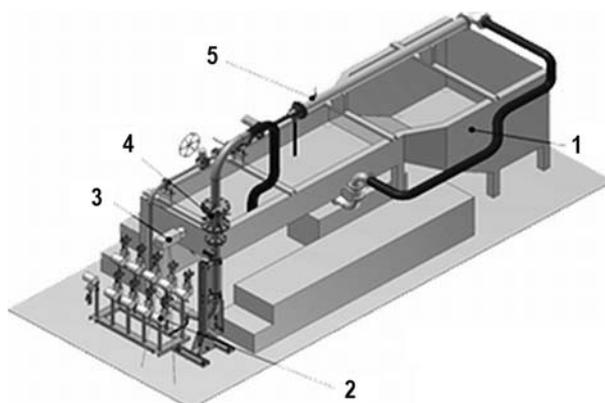


Рис. 3. Стенд для испытаний: 1 – гидролоток; 2 – контрольно-измерительные приборы; 3 – высокоскоростная камера; 4 – модель; 5 – трубопровод

Для исследования гидродинамических характеристик модели ОК был сконструирован стенд (рис. 3), включающий в себя модель, циркуляционный насос, гидроло-

ток, соединительные трубопроводы, приборы для измерения расхода воды через модель и перепадов давления на запирающем элементе модели.

Модель обратного клапана испытывалась при значениях расхода воды от 0 до 50 м³/ч и температуре воды 33°С. Экспериментальная погрешность для расходов менее 3 м³/ч составляла ±0,023 м³/ч, а при расходах более 40 м³/ч – ±0,310 м³/ч. Скорость запирающего элемента в момент закрытия клапана определялась косвенным путем по записям высокоскоростной видеокамеры. Погрешность определения скорости не превышала 0,1 м/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

График на рис. 4 иллюстрирует зависимость расхода ЖМТ на закрытие модели ОК от величины зазора в направлении движения воды между запирающим элементом и опорной чашей.

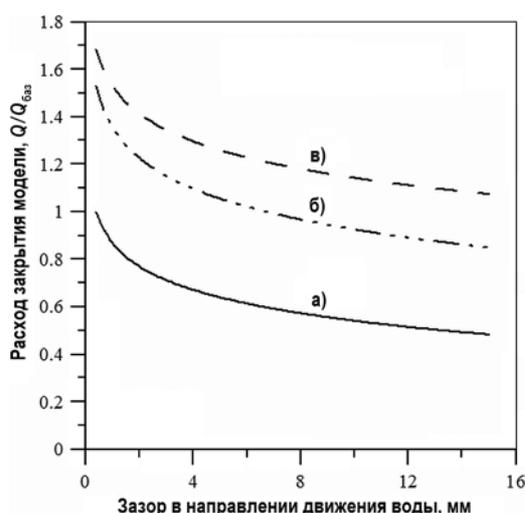


Рис. 4. Зависимость расхода закрытия модели от величины зазора между запирающим элементом и опорной чашей в направлении движения воды: а) – шар герметичный; б) – шар, заполненный водой на 50%; в) – шар, заполненный водой на 100%

Здесь и далее в качестве основы для сравнения приняты параметры «базового» варианта конструкции модели обратного клапана: величина зазора между шаром и опорной чашей в экваториальной плоскости шара $\delta_{баз} = 0,4$ мм; расход закрытия модели $Q_{баз} = 27,1$ м³/ч; скорость шарового запирающего элемента в момент закрытия модели $v_{баз} = 0,8$ м/с.

Как видно из графика, при увеличении зазора между шаровым запирающим элементом и опорной чашей расход закрытия модели уменьшается на 30 – 40 % в зависимости от степени заполнения шара водой. При заполнении шарового запирающего элемента водой до 100 % расход закрытия модели увеличивается в два раза по сравнению с герметичным запирающим элементом.

Для запирающего элемента в виде полушария, соединенного с направляющим стержнем, расход закрытия модели обратного клапана в экспериментах составил $0,97Q_{баз}$.

Экспериментальные и расчетные исследования показали, что для закрытия модели без опорной чаши требуется расход, в несколько раз превышающий базовый.

Как показал анализ, выполненный с помощью кода ANSYS-CFX, опорная чаша формирует на всей поверхности лобовой части шарового запирающего элемента область повышенного давления, которая создает на шаре перепад давления, требуемый для закрытия клапана.

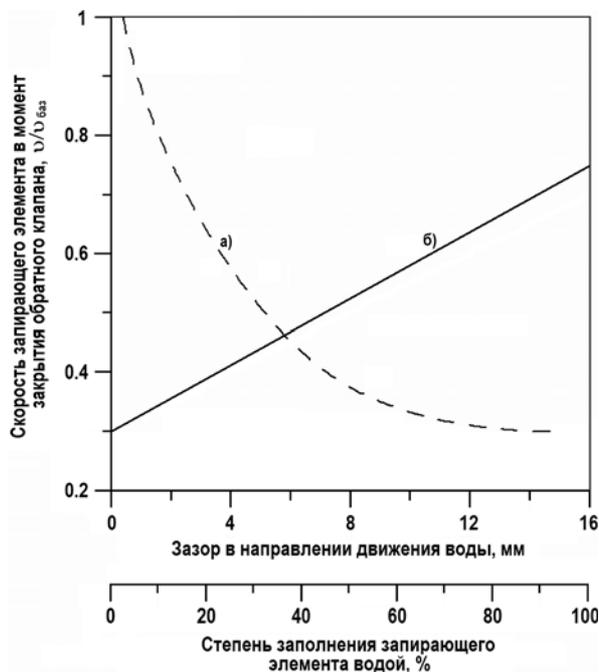


Рис. 5. Зависимости скорости запирающего элемента в момент закрытия модели ОК: а) — от величины зазора между запирающим элементом и опорной чашей в направлении движения воды; б) — от степени заполнения запирающего элемента водой

На рисунке 5а представлен график зависимости скорости запирающего элемента в момент закрытия модели обратного клапана от величины зазора в направлении движения воды между запирающим элементом и опорной чашей. Эта характеристика обратного клапана важна для обоснования его прочности.

Как видно из рисунка, с увеличением зазора в направлении движения воды между запирающим элементом и опорной чашей скорость запирающего элемента в момент закрытия модели ОК снижается почти в три раза.

В то же время с увеличением степени заполнения запирающего элемента водой от 0 до 100 % (рис. 2б) скорость запирающего элемента в момент закрытия модели ОК увеличивается в 2,5 раза.

Для запирающего элемента в виде полушария, соединенного с направляющим стержнем, скорость запирающего элемента в момент закрытия модели обратного клапана в экспериментах составила $0,75v_{баз}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- принятая конструкция обратного клапана (полая сфера) является работоспособной только при наличии опорной чаши, в которой располагается запирающий элемент;
- величина зазора между запирающим элементом и опорной чашей существенно влияет на расход теплоносителя, при котором ОК закрывается, и на скорость запирающего элемента в момент закрытия ОК;
- при заполнении запирающего элемента теплоносителем расход, при котором ОК закрывается, увеличивается примерно в два раза.

Таким образом, в ходе проведенных исследований функциональных характеристик ОК с шаровым запирающим элементом была подтверждена способность данной конструкции выполнять функции, предъявляемые к обратным клапанам системы безопасности, и получены данные о гидродинамических характеристиках обратных клапанов по-

добного типа, позволившие верифицировать расчетную методику, применяемую при проектировании.

Литература

1. Зарюгин Д.Г., Поплавский В.М., Рачков В.И., Сорокин А.П., Швецов Ю.Е., Рогожкин С.А., Шепелев С.Ф. Расчетно-экспериментальное обоснование проектной системы аварийного отвода тепла БН-1200 // Атомная энергия. – 2014. – Т. 116. – Вып. 4. – С. 222–228.
2. Fast reactor database // IAEA-TECDOC-866, Vienna, 1996.
3. Fast breeder reactors: experience and trends. Proceedings of an international symposium on fast breeder reactors: experience and future trends organized by the International Atomic Energy Agency and held in Lyons, 22-26 July 1985. Vol. 2. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1986.
4. Ионатис Р.Р., Новиков А.И. Исследование гидродинамического аварийного устройства. В сб. «Гидроавтоматика», – М.: Наука, 1965.
5. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. – М.: Высшая школа, 1963.
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974.
7. Wieser W., Esch T., Menter F., Smirnov P. Heat transfer predictions using advanced two-equation turbulence models, CFX Validation report, ANSYS Inc., 2008.

Поступила в редакцию 04.07.2014 г.

Авторы

Балуев Дмитрий Евгеньевич, ведущий инженер-конструктор

E-mail: nikanorov@okbm.nnov.ru

Гусев Дмитрий Владимирович, заместитель начальника отдела

E-mail: ctp@okbm.nnov.ru

Мешков Сергей Иванович, начальник бюро

E-mail: meshkovsr@okbm.nnov.ru

Никаноров Олег Леонидович, начальник бюро

E-mail: nikanorov@okbm.nnov.ru

Осипов Сергей Леонидович, начальник отдела

E-mail: osipovsl@okbm.nnov.ru

Рогожкин Сергей Александрович, заместитель начальника отдела

E-mail: beerbraer@okbm.nnov.ru

Рухлин Сергей Вячеславович, начальник бюро

E-mail: ctp@okbm.nnov.ru

Шепелев Сергей Федорович, главный конструктор проекта БН-1200

E-mail: shepelev@okbm.nnov.ru

UDC 621.039.533

STUDY OF FUNCTIONAL CHARACTERISTICS FOR SAFETY SYSTEM CHECK VALVE USING SCALED MODEL

Baluyev D.E., Gusev D.V., Meshkov S.I., Nikanorov O.L., Osipov S.L.,

Rogozhkin S.A., Rukhlin S.V., Shepelev S.F.

Afrikantov OKB Mechanical Engineering, JSC «Afrikantov OKBM».

15, Burnakovskij proezd, Nizhnij Novgorod, 603074 Russia

ABSTRACT

The paper provides results of experimental scale model studies on functional characteristics of a check valve used in the safety system of a liquid-metal-cooled reactor. The proposed check valve design with a hollow ball as a blocking element has a number of substantial advantages compared with the most widely spread valves with

disc-type flaps used as blocking elements. The advantages are valve operation independent of functioning of other safety systems and absence of friction pairs. The need to conduct experimental studies is determined both by the novelty of the proposed check valve design and by absence of verified computational validation methods for functioning of this type of valves. In this connection, the paper presents a computational validation method for fluid-dynamic parameters of the proposed check valve design and similitude parameters describing fluid-dynamic characteristics of the check valve – numeric values of the similitude parameters were obtained in the course of calculations made by the ANSYS-CFX commercial fluid-dynamic code. The paper describes the experimental model of the check valve with two alternative options of the blocking element – one in the form of a hollow ball in a support bowl; and another one, in the form of a semi-sphere on a guide rod going through the support sleeve on the valve spindle. Provided is a brief description of the test facility. Check valve model fluid-dynamic characteristics obtained in the course of experimental studies are shown in diagrams as functions of some design and operation parameters of the model.

Key words: liquid metal cooled reactor, safety system, check valve, hydro-dynamic force, similarity criteria, check valve model, test facility.

REFERENCES

1. Zaryugin D.G., Poplavskij V.M., Rachkov V.I., Sorokin A.P., Shvetsov Y.E., Rogozhkin S.A., Shepelev S.F. Experiment-calculated justification of design system of emergency heat removal BN-1200 // *Atomic Energy*. 2014, v. 116, iss. 4., pp. 222–228 (in Russian).
2. Fast reactor database. IAEA-TECDOC-866, Vienna, 1996.
3. Fast breeder reactors: experience and trends. Proceedings of an international symposium on fast breeder reactors: experience and future trends organized by the International Atomic Energy Agency and held in Lyons, 22-26 July 1985, v.2, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1986.
4. Ionatis R.R. Novikov A.I. Issledovanie gidrodinamicheskogo avariinogo ustroystva. V sb. «Gidroavtomatika». Moscow, Nauka Publ., 1965 (in Russian).
5. Gukhman A.A. Introduction in the theory of similarity. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1963 (in Russian).
6. Shlikhting H. The theory of a boundary layer. Moscow, Nauka Publ., 1974 (in Russian).
7. Vieser W., Esch T., Menter F., Smirnov P. Heat transfer predictions using advanced two-equation turbulence models, CFX Validation report, ANSYS Inc., 2008.

Authors

Baluyev Dmitry Evgenievich, Lead Design Engineer
E-mail: nikanorov@okbm.nnov.ru

Gusev Dmitry Vladimirovich, Deputy Head of Department
E-mail: ctp@okbm.nnov.ru

Meshkov Sergey Ivanovich, Head of Design Group
E-mail: meshkovsr@okbm.nnov.ru

Nikanorov Oleg Leonidovich, Head of Design Group
E-mail: nikanorov@okbm.nnov.ru

Osipov Sergey Leonidovich, Head of Department
E-mail: osipovsl@okbm.nnov.ru

Rogozhkin Sergey Alexandrovich, Deputy Head of Department
E-mail: beerbraer@okbm.nnov.ru

Rukhlin Sergey Vyacheslavovich, Head of Design Group
E-mail: ctp@okbm.nnov.ru

Shepelev Sergey Fedorovich, Chief Designer of project of BN-1200
E-mail: shepelev@okbm.nnov.ru