

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.039.533

Д.Е. Балувев, О.Л. Никаноров, С.А. Рогожкин, С.Ф. Шепелев

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАТНОГО КЛАПАНА С ШАРОВЫМ ЗАПИРАЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова

Обратный клапан представленной конструкции предназначен для применения в системе безопасности перспективного реактора с жидкометаллическим теплоносителем. На основании сопоставления результатов экспериментальных и расчетных исследований моделей обратного клапана с шаровым запирающим элементом выполнена верификация методики расчета гидродинамических характеристик. Экспериментальные исследования моделей обратного клапана проводились на водяных стендах. Расчетные исследования проводились по методике, базирующейся на использовании CFD-кодов ANSYS-CFX и Flow Vision. В результате расчетных и экспериментальных исследований были получены гидродинамические характеристики обратного клапана, выполнено их сопоставление. Получены данные о расходе закрытия клапана, о протечках через закрытый клапан и перепадах давления на обратном клапане в разных режимах. Проанализированы данные и величины отклонений расчетных значений гидродинамических параметров, полученных экспериментальным и расчетным путем. Сделан вывод о выполнении требований, предъявляемых к конструкции обратного клапана. Даны рекомендации по выбору элементов конструкции обратного клапана для использования в проекте.

*Ключевые слова:* реактор с жидкометаллическим теплоносителем, система безопасности, обратный клапан, модель обратного клапана, CFD-код, стенд для испытаний.

### Введение

Стремление обеспечить эффективный теплоотвод от тепловыделяющих сборок перспективного реактора с жидкометаллическим теплоносителем в режимах нарушения его нормальной эксплуатации обуславливает необходимость создания надежного тракта циркуляции теплоносителя, соединяющего активную зону с теплообменником системы безопасности. Ключевым элементом в таком тракте должен быть обратный клапан, предотвращающий циркуляцию теплоносителя по тракту в режимах нормальной эксплуатации, но не препятствующий подводу охлажденного теплоносителя к сборкам при нарушениях нормальной эксплуатации, требующих подключения системы безопасности. Конструкция такого обратного клапана требует расчетного и экспериментального обоснования.

### Постановка задачи исследований

Необходимость исследования гидродинамических характеристик принятой конструкции обратного клапана обусловлена требованиями надежности и безотказности, которые предъявляются к данному элементу системы безопасности. Вместе с тем, существует ряд конкретных технических критериев, связанных с функционированием всей системы безопасности в составе реактора, выполнение которых должно обеспечиваться при работе клапана: он должен закрываться при наименьшем возможном расходе теплоносителя в тракте циркуляции, но в то же время обладать наименьшим возможным гидравлическим сопротивлением

при работе системы безопасности. Очевидно, что наиболее важными гидродинамическими характеристиками клапана являются расход закрытия и гидравлическое сопротивление при работе системы безопасности.

При конструировании обратного клапана, отвечающего всем вышеназванным требованиям и критериям, была разработана расчетная методика, позволяющая получать значения данных гидродинамических характеристик при любом изменении размеров принятой конструкции клапана. Основой данной методики является использование современных CFD-кодов, позволяющих рассчитывать значения сил и давлений в определяющих сечениях рассматриваемой конструкции клапана. Однако, ни один из применяемых при конструировании кодов не верифицирован ввиду отсутствия экспериментальных данных. Этот аспект, в дополнение к изложенному выше, делает необходимым проведение экспериментальных исследований гидродинамики принятой конструкции обратного клапана.

Таким образом, задачей исследований принятой конструкции обратного клапана является подтверждение его функциональной пригодности для работы в составе системы безопасности, с учетом предъявляемых к нему требований и критериев работы, а также получение экспериментальных данных для верификации применяемых при конструировании клапана CFD-кодов.

### Экспериментальные исследования гидродинамики клапана

Для исследования гидродинамики обратного клапана был разработан комплекс экспериментальных исследований, состоящих из нескольких этапов [1]. Исследования выполнялись на водяных стендах, расположенных на территории АО «ОКБМ Африкантов».

На первом этапе исследования выполнялись на упрощенной модели уменьшенного масштаба (рис. 1) с несколькими типами запирающего элемента [2, 3].

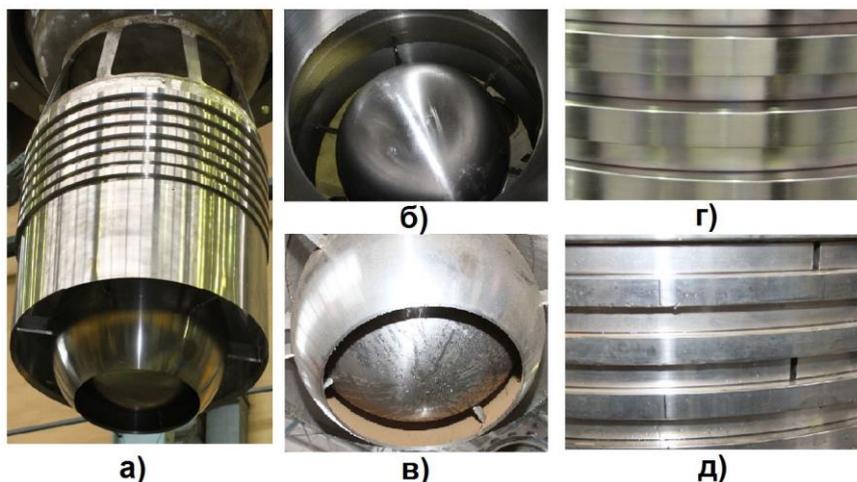


Рис. 1. Упрощенная модель обратного клапана уменьшенного масштаба

Модель обратного клапана испытывалась при значениях расходов воды от 0 до 50 м<sup>3</sup>/ч и температуре воды, равной 33 °С. Погрешность определения расхода воды в экспериментах составляла  $\pm 0,023$  м<sup>3</sup>/ч для расходов воды, не превышающих 3 м<sup>3</sup>/ч, и  $\pm 0,310$  м<sup>3</sup>/ч для расходов воды, составляющих более 40 м<sup>3</sup>/ч.

В ходе данных исследований была подтверждена функциональная пригодность принятой конструкции клапана для работы в составе системы безопасности и выбрана базовая конструкция клапана с запирающим элементом в виде полого шара в опорной чаше.

На втором этапе исследования выполнялись на полномасштабной модели (рис. 2), полностью геометрически подобной натурному обратному клапану системы безопасности проектируемого реактора [3, 4].



**Рис. 2. Полномасштабная модель обратного клапана:**

а – общий вид; б, в – запирающий элемент (вид сверху и снизу, соответственно);  
г, д – лабиринтные уплотнения  
(с неразрезными и разрезными уплотнительными кольцами, соответственно)

Модель обратного клапана испытывалась при значениях расходов воды от 200 до 2500 м<sup>3</sup>/ч. Рабочей средой при испытаниях являлась вода при  $t$  от 22 до 40 °С.

Погрешности определения гидродинамических параметров в данных исследования составляли:

- расход воды: от  $\pm 5,2$  м<sup>3</sup>/ч в диапазоне от 90 до 250 м<sup>3</sup>/ч, до  $\pm 81,8$  м<sup>3</sup>/ч в диапазоне от 1300 до 2100 м<sup>3</sup>/ч;
- перепад давления на запирающем элементе:  $\pm 1,15$  Па при подаче воды на запирающий элемент,  $\pm 7,2$  Па при подаче воды под запирающий элемент;
- протечка через лабиринтное уплотнение: от  $\pm 0,0018$  л/с в диапазоне от 0,042 до 0,139 л/с, до  $\pm 0,073$  л/с в диапазоне от 5,83 до 13,9 л/с.

В ходе исследований были получены данные о расходе закрытия клапана, о гидравлическом сопротивлении открытого клапана, а также о протечках теплоносителя через закрытый клапан при перепаде давления на нем, соответствующем перепаду давления на натурном клапане системы безопасности при нормальной эксплуатации реактора. Испытания выполнялись для модели с герметичным и негерметичным (заполненным теплоносителем) запирающим элементом.

### Расчеты гидродинамических характеристик клапана

Методика расчета расхода закрытия клапана заключается в сравнении гидродинамической силы, действующей на запирающий элемент клапана при обтекании его потоком теплоносителя, с весом запирающего элемента:

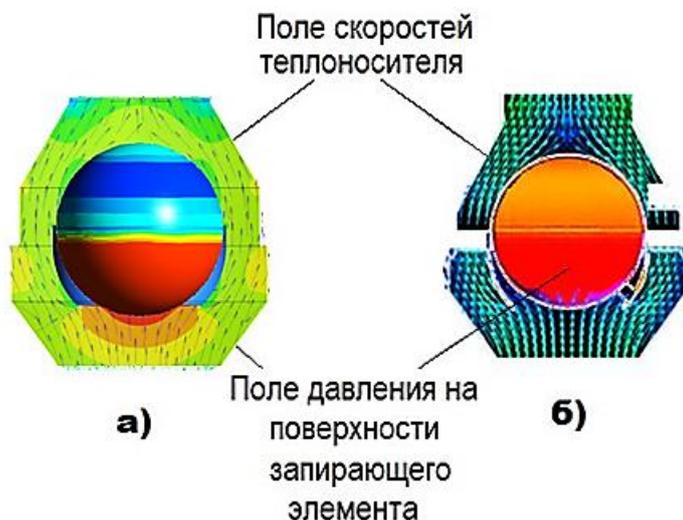
$$F_y > (m_o - m)g \quad (1)$$

где  $m_o$ ,  $m$  – массы запирающего элемента и вытесненного им теплоносителя, соответственно, кг;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения;  $F_y$  – гидродинамическая сила, определяемая по зависимости:

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

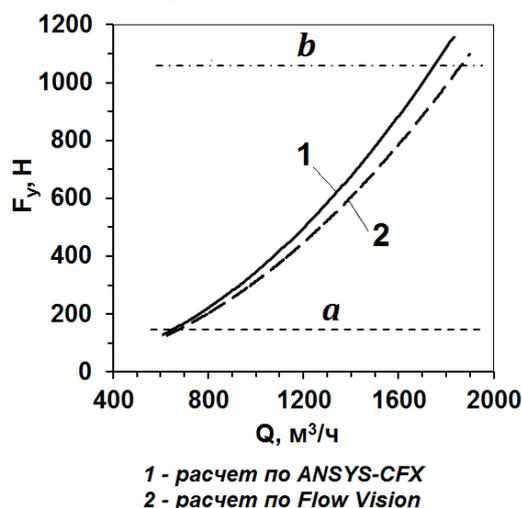
где  $p$  – давление теплоносителя на поверхности запирающего элемента, Па;  $\tau_w$  – касательное напряжение на поверхности запирающего элемента, Н/м<sup>2</sup>;  $S$  – поверхность запирающего элемента, м<sup>2</sup>.

Определение силы  $F_y$  производится при анализе результатов CFD-расчета, в ходе которого вычисляются значения интеграла давления и касательных напряжений на поверхности запирающего элемента, обтекаемого потоком теплоносителя, входящие в правую часть уравнения (2) в зависимости от расхода теплоносителя на входе в обратный клапан (рис. 3). Минимально возможное значение расхода теплоносителя, при котором выполняется неравенство (1), считается расходом закрытия обратного клапана.



**Рис. 3.** Поля скоростей и давлений теплоносителя в полости обратного клапана и на поверхности запирающего элемента, соответственно:  
а – расчет по ANSYS-CFX; б – расчет по Flow Vision

На рис. 4 представлены результаты расчетов расхода закрытия полномасштабной модели обратного клапана для двух значений массы запирающего элемента, соответствующих его герметичному и негерметичному (заполненному теплоносителем) состоянию, выполненных с использованием CFD-кодов ANSYS-CFX и Flow Vision. Расчеты по обоим кодам выполнялись в стационарной постановке при использовании  $k-\epsilon$  модели турбулентности.



**Рис. 4.** Результаты расчетов расхода закрытия полномасштабной модели обратного клапана для двух значений массы запирающего элемента, соответствующих его герметичному (а) и негерметичному (заполненному теплоносителем) (б) состоянию

Значения расхода закрытия, полученные по двум данным кодам, несколько различаются – для модели с герметичным запирающим элементом на 3%, а для модели с негерметичным запирающим элементом – на 6%.

В табл. 1 представлены результаты расчета расхода закрытия обратного клапана в сравнении с результатами экспериментальных исследований.

Таблица 1

Результаты расчета расхода закрытия обратного клапана ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ) в сравнении с результатами экспериментальных исследований

Состояние запирающего элемента	Результаты расчета по кодам		Эксперимент
	ANSYS-CFX	Flow Vision	
Герметичный	653	675	607
Негерметичный (заполненный теплоносителем)	1751	1856	1584

Как видно из табл. 1, результаты расчета расхода закрытия превышают экспериментальные значения на 8-11% для модели с герметичным запирающим элементом и на 11-17% для модели с негерметичным запирающим элементом, что свидетельствует о некотором консерватизме методики определения расхода закрытия с использованием зависимости (1).

Определение перепада давления на открытом обратном клапане при подаче теплоносителя на запирающий элемент, покоящийся в опорной чаше, производится посредством анализа результатов CFD-расчета с помощью зависимости:

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad (3)$$

где  $p_1, p_2$  – среднее по сечению значение статического давления теплоносителя во входном и выходном сечении клапана, расположенных перпендикулярно потоку теплоносителя, соответственно, Па.

На рис. 5 представлены результаты расчетов перепада давления на полномасштабной модели обратного клапана, выполненных с использованием CFD-кодов ANSYS-CFX и Flow Vision, а также результаты экспериментальных исследований.

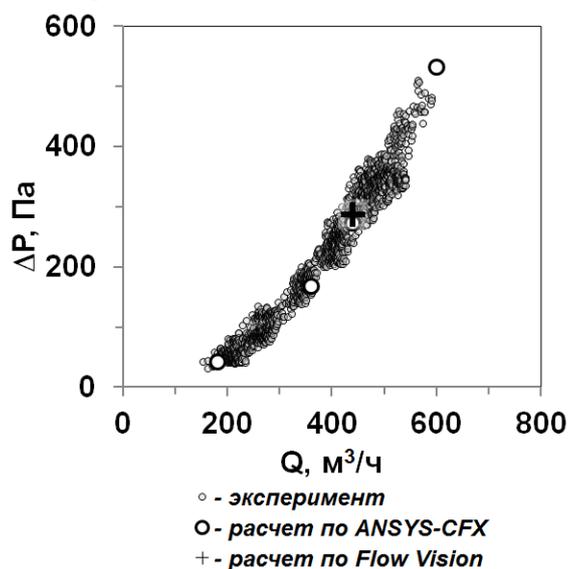


Рис. 5. Результаты расчетов перепада давления на полномасштабной модели обратного клапана в сравнении с результатами экспериментальных исследований

Сравнительный анализ показывает, что отличие результатов расчетов перепада давления на модели по CFD-кодам от результатов экспериментов в исследованном диапазоне значений расходов теплоносителя не превышает 10%.

Определение протечки теплоносителя через лабиринтное уплотнение закрытого обратного клапана ( $\text{кг}/\text{с}$ ) производится по зависимости:

$$G = \frac{F}{\sqrt{\xi}} \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho} \quad (4)$$

где  $F$  – площадь проходного сечения лабиринтного уплотнения, м<sup>2</sup>;  $\Delta p$  – перепад давления на закрытом обратном клапане, Па;  $\rho$  – плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления.

В табл. 2 представлены результаты расчета протечки через лабиринтное уплотнение закрытой полномасштабной обратного клапана при перепаде давления на нем, соответствующем перепаду давления на натурном обратном клапане системы безопасности проектируемого реактора.

Таблица 2

Значения протечек через лабиринтное уплотнение полномасштабной модели, кг/с

Тип уплотнения	Расчет	Эксперимент
С неразрезными кольцами	21,97	14,0
С разрезными кольцами	1,42	2,5

Протечка через лабиринтное уплотнение носит случайный характер и зависит от большого числа независимых факторов, поэтому определение расхода протечки возможно только с некоторой конечной погрешностью, составляющей в данном случае  $\pm 42\%$  для уплотнения с неразрезными кольцами и  $\pm 47\%$  для уплотнения с разрезными кольцами.

Результаты испытаний показали, что вариант уплотнения с разрезными кольцами обеспечивает существенно меньшую величину протечки. В связи с этим для дальнейшего проектирования был принят вариант уплотнения с разрезными кольцами.

### Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- обратный клапан выполняет функции, которые требуются от него как от элемента системы безопасности проектируемого реактора с жидкометаллическим теплоносителем;
- расчетная методика определения таких основных технических характеристик работы клапана, как расход закрытия и перепад давления на открытом клапане, была верифицирована с помощью результатов экспериментальных исследований;
- показано, что при использовании данной методики отклонение расчетных значений гидродинамических характеристики работы проектируемого обратного клапана от значений, полученных в экспериментах, не превышает 17% для расхода закрытия клапана и 10% – для перепада давления на открытом клапане;
- на основании расчетно-экспериментальных исследований для использования в проекте был принят вариант лабиринтного уплотнения с разрезными уплотнительными кольцами.

### Библиографический список

1. **Балуев, Д.Е.** Обоснование комплекса расчетно-экспериментальных исследований обратного клапана / Д.Е. Балуев, Е.В. Гайдукова, О.Л. Никаноров, С.Л. Осипов, С.А. Рогожкин, С.Ф. Шепелев // Проблемы верификации и применения CFD кодов в атомной энергетике. Сборник докладов научно-технического семинара. – Н. Новгород: ОАО «ОКБМ Африкантов», 2012.
2. **Балуев, Д.Е.** Исследование функциональных характеристик обратного клапана системы безопасности на масштабной модели / Д.Е. Балуев, Е.В. Заводаева, О.Л. Никаноров, С.Л. Осипов, С.А. Рогожкин, С.Ф. Шепелев, Д.В. Гусев, С.В. Рухлин // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2015. – № 1. – С. 103-110.

3. **Балуев, Д.Е.** Исследование гидродинамики обратного клапана на моделях и сравнение с результатами расчетов по CFD-кодам / Д.Е. Балуев, О.Л. Никаноров, С.А. Рогожкин, С.Ф. Шепелев, А.А. Аксенов, М.Н. Жестков, М.Л. Сазонова // Инженерные системы-2017: Труды международного форума. – М., 2017. – С. 52-62.
4. **Балуев, Д.Е.** Расчетно-экспериментальный анализ гидродинамики полномасштабной модели обратного клапана / Д.Е. Балуев, О.Л. Никаноров, С.А. Рогожкин, С.Ф. Шепелев // Проблемы верификации и применения CFD кодов в атомной энергетике. Сборник докладов научно-технического семинара. – Н. Новгород, 2016.

*Дата поступления  
в редакцию: 28.01.2019*

**D.E. Baluev, O.L. Nikanorov, S.A. Rogozhkin, S.F. Shepelev**

**THE EXPERIMENTAL AND DESIGN STUDIES EXAMINATIONS  
ON A CHECK VALVE WITH A BALL LOCKING ELEMENT**

JSC OKBM AFRICANTOV, Nizhny Novgorod

**Subject:** Check valve of the given design is intended for application in the safety systems of the perspective reactor with liquid metal cooling. Comparison of the experimental and calculation studies of the check valve with the hollow ball-type locking element enabled verification hydro-dynamic parameters calculation method.

**Methodology:** Experimental studies of the check valve models were performed on water test facilities. Calculation study was carried out based on the methodology applying CFD-codes, ANSYS-CFX and Flow Vision. Calculation and experimental studies resulted in receiving hydro-dynamic characteristics of the check valve and their comparison was performed.

**Results:** Experimental and calculation data on the flow of check valve closing were received as well as information about leakage through the closed valve and pressure drops in various modes.

**Conclusions:** The received data and deviations of hydrodynamic parameters identified experimentally and by calculations were analyzed. It was concluded that requirements originally established for the check valve are fulfilled. Recommendations for selection of the structural elements for the check valve to be used in the project are also given.

*Key words:* liquid metal cooled reactor, safety system, check valve, check valve model, CFD code, test facility.