

УДК 621.039.533

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

ИССЛЕДОВАНИЯ ШАРОВОГО ОБРАТНОГО КЛАПАНА В СОСТАВЕ СТЕНДА

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова

На водяном стенде, расположенном в АО «ОКБМ Африкантов», выполнены испытания полномасштабной модели обратного клапана. Оборудование стенда позволяло моделировать гидродинамические процессы, происходящие при закрытии модели обратного клапана. По результатам испытаний было принято решение доработать проточную часть обратного клапана с целью снижения величины скачка давления при его закрытии. Гидродинамические характеристики обратного клапана модернизированной конструкции рассчитывались с помощью методики, базирующейся на использовании CFD-кода Flow Vision. Методика позволяла моделировать гидродинамические процессы, происходящие в стенде. Изготовлена полномасштабная модель клапана и проведены ее испытания на водяном стенде. Выполненный комплекс расчетно-экспериментальных исследований позволил модернизировать конструкцию обратного клапана, в результате чего был снижен расход закрытия и величина скачка давления. Показано, что расчетная модель на базе CFD-кода Flow Vision корректно описывает гидродинамические процессы, происходящие при срабатывании обратного клапана.

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

Введение

Одним из основных элементов системы безопасности проектируемого реактора с жидкометаллическим теплоносителем является обратный клапан, являющийся элементом теплообменника данной системы, отводящего тепло от активной зоны в аварийных ситуациях, связанных с нарушением нормального теплоотвода. В режимах нормальной эксплуатации обратный клапан должен быть закрыт, а в режимах нарушения нормальной эксплуатации реактора, требующих подключения системы безопасности, клапан должен открываться, обеспечивая возможность подвода теплоносителя, охлажденного в теплообменнике системы безопасности, к сборкам активной зоны.

Исследования проектируемого обратного клапана ведутся в соответствии с комплексом расчетно-экспериментальных исследований [1], включающим в себя несколько последовательных этапов, предусматривающих отработку конструкции клапана на моделях и анализ полученных данных о характеристиках его работы.

К настоящему времени были выполнены два этапа исследований, в ходе которых была выбрана и исследована базовая конструкция обратного клапана.

Постановка задачи исследований

Из технических требований к разработке конструкции обратного клапана следует, что основными гидродинамическими параметрами, характеризующими его работу, являются величина расхода закрытия и гидравлическое сопротивление при подаче теплоносителя на запирающий элемент. Однако испытания полномасштабной модели обратного клапана базовой конструкции [2, 3] показали, что кроме этих двух основных гидродинамических характеристик еще одной гидродинамической характеристикой клапана, влияющей на работу реактора, является величина скачка давления в трубопроводе при его закрытии. Для исследованной базовой конструкции клапана величина скачка давления оказалась недопустимо высокой.

Согласно теории Жуковского [4], величина скачка давления, возникающего в подводящем трубопроводе при закрытии обратного клапана, прямо пропорциональна величине расхода закрытия клапана (1):

$$\Delta P = a \cdot \rho \cdot \frac{Q}{A} \quad (1)$$

где a – скорость распространения возмущений в трубопроводе, м/с; ρ – плотность теплоносителя, кг/м³; Q – расход закрытия клапана, м³/с; A – площадь проходного сечения подводящего трубопровода, м².

Для снижения скачка давления ΔP было принято решение изменить конструкцию клапана относительно базовой конструкции, исследованной ранее [2]. В результате модернизации были внесены изменения в конструкцию проточной части, направленные на снижение величины расхода закрытия клапана Q . Анализ показал, что уменьшения величины расхода закрытия можно добиться увеличением гидродинамической силы, действующей на запирающий элемент, а также уменьшением его массы таким образом, чтобы выполнялось условие (2):

$$\int_S (p + \tau_w) \cdot dS > (m_o - m)g \quad (2)$$

где p – давление теплоносителя на поверхности запирающего элемента, Па; τ_w – касательное напряжение на поверхности запирающего элемента, Н/м²; S – поверхность запирающего элемента, м²; m_o , m – массы запирающего элемента и вытесненного им теплоносителя соответственно, кг; $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения.

Модель обратного клапана модернизированной конструкции представлена на рис. 1.

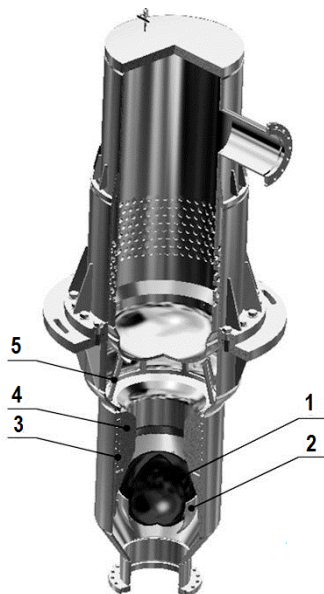


Рис. 1. Модель обратного клапана:

1 – запирающий элемент (тонкостенная сфера); 2 – опора; 3 – лабиринтное уплотнение;
4 – седло; 5 – входная решетка теплообменника

Ключевым элементом данной конструкции клапана является опора, формирующая на запирающем элементе распределение давления, при котором гидродинамическая сила, действующая на него со стороны потока, оказывается больше веса запирающего элемента в теплоносителе.

Модель обратного клапана модернизированной конструкции была исследована на водяном стенде, расположенном в АО «ОКБМ Африкантов».

Методика экспериментальных исследований

Модернизированная модель обратного клапана испытывалась на стенде, общий вид которого представлен на рис. 2.

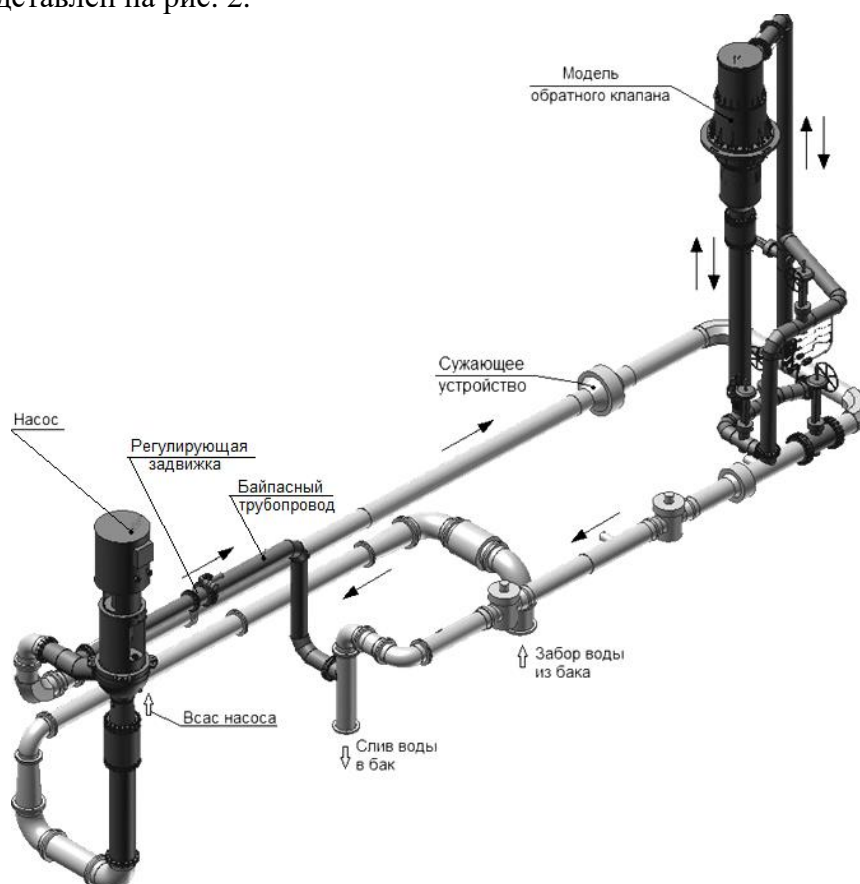


Рис. 2. Испытательный стенд

Стенд состоит из двух параллельных трасс, на одной из которых расположена испытываемая модель, а на другой (байпасный трубопровод) – задвижка, регулирующая подачу воды в трассу расположения клапана. С точки зрения гидравлики, байпасный трубопровод с регулирующей задвижкой моделирует гидравлическое сопротивление активной зоны проектируемого реактора, а трасса расположения обратного клапана моделирует гидравлику системы безопасности. Обе трассы замыкаются на бак кавитационный со свободным уровнем воды, который предназначен для предотвращения кавитации в стенде за счет создания избыточного давления в газовой полости.

Рабочей средой при испытаниях являлась вода при температурах от 22 до 27 °С. Модель испытывалась при значениях расходов воды от 200 до 2500 м³/ч. Регулирование расхода воды в стенде осуществлялось задвижкой на байпасном трубопроводе, а также с помощью изменения частоты вращения вала насоса.

Погрешности определения гидродинамических параметров в данных исследования составляли:

- расход воды: от $\pm 5,2$ м³/ч в диапазоне от 90 до 250 м³/ч, до $\pm 81,8$ м³/ч в диапазоне от 1300 до 2100 м³/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;
- давление воды в стенде: $\pm 0,2\%$ от верхнего предела измерений, составлявшего при испытаниях для разных датчиков от 0,5 до 1,0 МПа.

В ходе испытаний исследовалось распределение расхода воды в стенде, перепады давления на модели обратного клапана при подводе воды под запорный элемент и на него (для исследования гидравлического сопротивления клапана как элемента системы безопасности реактора), а также распределение давления в стенде.

Для исследования давления в контрольных точках стенда были использованы высокоскоростные датчики, позволяющие отслеживать давление с частотой до 10 кГц.

Результаты экспериментальных исследований

Основные результаты испытаний модели обратного клапана в сравнении с результатами, полученными для базовой конструкции, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний модели обратного клапана

Гидродинамическая характеристика	Конструкция модели обратного клапана	
	Базовая	Модернизированная
Расход закрытия, м ³ /ч	613	196
Величина скачка давления при расходе закрытия, кПа	951	334
Гидравлическое сопротивление, Па	277	375

Как видно из таблицы, величина расхода закрытия модели обратного клапана модернизированной конструкции оказалась намного ниже аналогичной величины расхода закрытия конструкции клапана, испытанной ранее – почти в три раза. Величина скачка давления при закрытии клапана уменьшилась при этом также почти в три раза. Значение величины гидравлического сопротивления открытого клапана модернизированной конструкции при подаче теплоносителя на запирающий элемент по сравнению с ранее исследованной конструкцией клапана увеличилось чуть более, чем на треть.

На рис. 3 представлены данные об изменении давления над и под клапаном в процессе его закрытия.

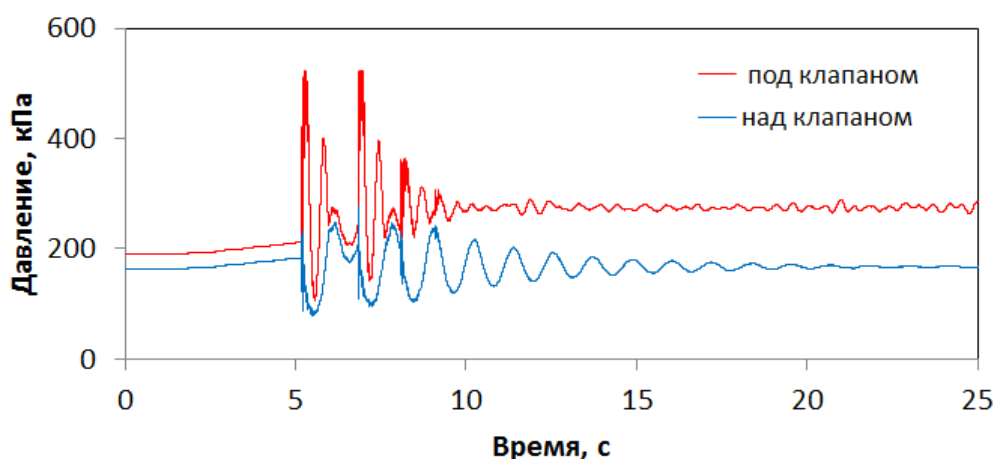


Рис. 3. Распределение давления в стенде при закрытии модели

Анализ полученных данных показал, что наибольший скачок давления, обусловленный закрытием модели обратного клапана, возникает в двух точках: непосредственно в районе расположения клапана и на входе в бак кавитационный. Также наблюдается снижение величины скачка давления, возникающего при закрытии обратного клапана, пропорцио-

нально расстоянию от рассматриваемого участка до источника возмущения. В ходе исследований было обнаружено: при недостаточном перепаде давления на запирающем элементе клапан, раз закрывшись, открывается, и этот процесс закрытия-открытия повторяется.

Для удержания обратного клапана исследуемой конструкции в закрытом состоянии перепад давления на запирающем элементе должен удовлетворять условию:

$$\Delta p \geq \frac{(m_o - m)g}{S_o} \quad (3)$$

где Δp – перепад полного давления на запирающем элементе закрытого клапана, Па;
 S_o – площадь поперечного сечения проточной части клапана, перекрываемая запирающим элементом, прижатым к седлу, м².

Очевидно, что величина перепада давления Δp равна величине перепада давления на байпасном трубопроводе. Таким образом, в ходе экспериментальных исследований была выявлена еще одна важная гидродинамическая характеристика, характеризующая работоспособность обратного клапана – требуемый для удержания клапана в закрытом состоянии перепад давления байпасе обратного клапана.

Расчетные исследования

Для анализа полученных результатов и с целью верификации расчетных методик, применяемых при проектировании обратного клапана, с использованием CFD-кода отечественной разработки Flow Vision были выполнены расчетные исследования модели клапана в составе стенда.

На рис. 4 представлены результаты расчета гидродинамической силы, действующей на запирающий модели обратного клапана при подаче воды под него. Расчет выполнялся в стационарной постановке при использовании k-ε модели турбулентности.

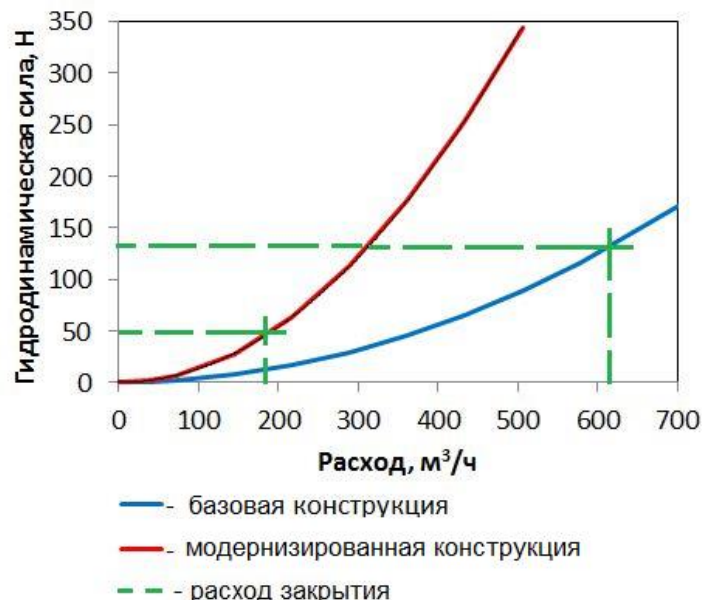


Рис. 4. Результаты расчетов гидродинамической силы, действующей на запирающий элемент

Из рис.4 видно, что модернизация конструкции модели привела к резкому возрастанию гидродинамической силы, действующей на запирающий элемент со стороны потока воды.

На рис. 5 представлены результаты расчета давлений и скоростей воды в испытательном стенде при исследовании закрытия модели. Расчет выполнялся в нестационарной постановке при использовании k-ε модели турбулентности.

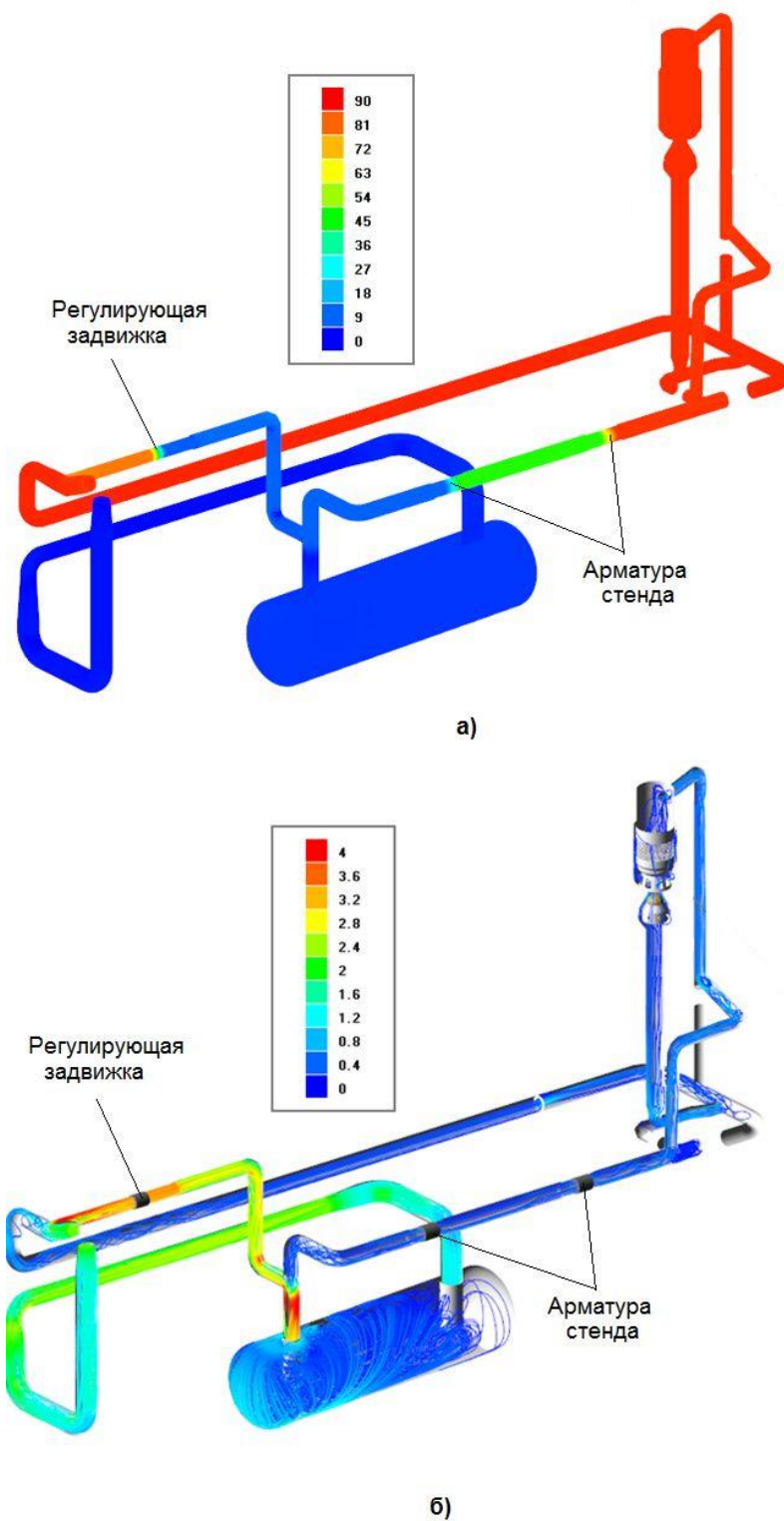


Рис. 5. Распределение давления (а) и скоростей (б) в стенде (до закрытия модели)

Сравнение величин гидродинамических характеристик клапана, полученных расчетным путем, с результатами испытаний, показало, что расчетная величина расхода закрытия модели обратного клапана отличается от экспериментально определенной величины не более, чем на 3 %.

В то же время величина максимального скачка давления в стенде при закрытии модели обратного клапана отличается от экспериментально определенной величины не более, чем на 18 %, что может быть связано с тем, что примененная расчетная модель не учитывает

в полном объеме все динамические эффекты, происходящие в стенде, в частности, влияние работы циркуляционного насоса, а также упругие свойства стенок трубопроводов (толщина стенок труб не моделировалась). Скорость звука в теплоносителе по результатам испытаний была оценена величиной в пределах от 1 000 до 1 100 м/с, что свидетельствует о незначительном содержании в воде газа [5], наличие которого могло бы существенно исказить результаты исследований.

Сопоставление данных о распределении давлений в стенде, полученных расчетным путем, с экспериментальными данными, показало, что в рамках принятых предположений расчетная модель обратного клапана в составе стенда для испытаний корректно описывает основные гидродинамические процессы, происходящие при закрытии клапана.

Заключение

В ходе испытаний полномасштабной модели обратного клапана базовой конструкции, проектируемого ядерного реактора с жидкометаллическим теплоносителем, были отмечены скачки давления, возникающие при закрытии клапана, величина которых оказалась неприемлемой.

В связи с тем, что величина скачка давления при резком закрытии клапана прямо пропорциональна величине расхода среды, циркулирующей через него, для уменьшения величины скачков давления была выполнена модернизация его конструкции, направленная на снижение величины расхода закрытия.

Гидродинамические характеристики обратного клапана модернизированной конструкции были рассчитаны с использованием CFD-кода Flow Vision. После этого была изготовлена полномасштабная модель клапана и проведены её испытания на водяном стенде.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- расчетная модель обратного клапана в составе стенда для испытаний позволяет с высокой степенью точности определять гидродинамические характеристики обратного клапана и корректно описывает основные гидродинамические процессы, происходящие в гидравлическом контуре расположения обратного клапана при его закрытии;
- модернизация конструкции обратного клапана по сравнению с конструкцией, которая испытывалась на предыдущем этапе исследований, позволила существенно снизить величину расхода закрытия и скачка давления, возникающего при закрытии клапана;
- обратный клапан модернизированной конструкции выполняет функции, которые требуются от него, как от элемента системы безопасности проектируемого реактора с жидкометаллическим теплоносителем.

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 // Научно-технический семинар «Проблемы верификации и применения CFD кодов в атомной энергетике», сборник тезисов, ОАО «ОКБМ Африкантов», 2012.
2. **Балуев, Д.Е.** Расчетно-экспериментальный анализ гидродинамики полномасштабной модели обратного клапана / Д.Е. Балуев, О.Л. Никаноров, С.А. Рогожкин, С.Ф. Шепелев // Научно-технический семинар «Проблемы верификации и применения CFD кодов в атомной энергетике», сборник тезисов, АО «ОКБМ Африкантов», 2016.
3. **Балуев, Д.Е.** Экспериментальные и расчетные исследования обратного клапана с шаровым запирающим элементом / Д.Е. Балуев, О.Л. Никаноров, С.А. Рогожкин, С.Ф. Шепелев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2019. – №1(124). – С. 67-63.

4. Указания по защите водоводов от гидравлического удара. – М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961.
5. **Переверзев, С.Ю** Учет влияния нерастворенного воздуха на переходные процессы в напорных трубопроводах // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. – 2016. – №1. – С.59-61.

*Дата поступления
в редакцию: 04.02.2020*

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

**STUDIES OF A CHECK VALVE WITH A BALL LOCKING ELEMENT
AS A PART OF THE TEST FACILITY**

Federal State Unitary Enterprise I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering

Subject: The subjective of this study is the analysis of results of check valve model with the ball locking element investigations.

Methodology: Experimental studies of the check valve model were performed on water test facilities located at the JSC «Afrikantov OKBM» territory. Calculation study was carried out based on the methodology applying CFD-codes Flow Vision.

Results: Experimental and calculation data on the hydrodynamic characteristics of check valve were received during the studies as a part of test facility.

Conclusions: In the results of the data comparison received experimentally and by calculations it was concluded that requirements originally established for the construction of the check valve are fulfilled and calculations methods based on the Flow Vision codes are available to be used for design engineering in check valve construction.

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