

## Разработка и моделирование поворотных затворов для трубопроводных систем

*И.Г. Меликов, В.Р. Лысенко, А.Х. Лампежеев*

*Институт конструкторско-технологической информатики РАН*

**Аннотация:** Немаловажными в трубопроводных системах являются трубопроводные арматуры, к которым относятся поворотные обратные затворы (далее ПОЗ). Основная функция данного конструктивного элемента - предотвращение аварийных ситуаций в трубопроводных системах. Принцип работы основан на закрытии запорного устройства в случае изменения направления потока транспортируемой среды. Это обеспечивает надежное управление потоком и предотвращение обратного потока среды в трубопроводе. ПОЗ обеспечивают надежность, герметичность и безопасную эксплуатацию систем, а также долговечность с учетом требований безопасности. В статье рассматривается проектирование и расчёт поворотных обратных затворов. Целью разработки такого модельного ряда является создание долговечной и надёжной конструкции, которая сможет обеспечить во время всего срока службы безопасную эксплуатацию на производстве с различными параметрами рабочей среды. Для подтверждения параметров надёжности и работоспособности конструкции проведён прочностной расчёт поворотных обратных затворов. В результате числового моделирования всех разработанных обратных затворов, рассчитанные показатели позволяют дать затворам положительную оценку и подтверждают соответствие техническим требованиям.

**Ключевые слова:** поворотный обратный затвор, моделирование, математическое моделирование, метод конечных элементов, расчёт показателей надёжности.

### Введение

Важной составляющей инфраструктуры предприятий и объектов, на которых осуществляется перемещение различных сред (жидкостей, газов, паров и др.), являются трубопроводные системы [1, 2]. Трубопроводная система состоит из разнообразного числа составляющих элементов, это, конечно же, соединенные между собой трубы, фитинги, арматуры, контрольно-измерительные приборы и другие элементы [3, 4].

Трубопроводные арматуры по своим функциям и устройству делят на: запорные, распределительные, регулирующие [5, 6]. Особый интерес, в рамках данной работы представляет защитная арматура, которая предназначена для предохранения системы при отклонениях рабочей среды от заданных параметров [7, 8].

Поворотные обратные затворы (ПОЗ) — это защитная арматура, выполняющая функцию регулирования потока среды в заданном направлении и предотвращения его движения в противоположном направлении. ПОЗ обладают специальным конструктивным элементом, который при протекании среды в одном направлении открывается, позволяя потоку проходить свободно. В то же время, при попытке обратного потока среды этот элемент закрывается автоматически, препятствуя обратному движению [9].

Во время эксплуатации поворотных обратных затворов возможны отказы, связанные с выходом из строя его элементов или нарушением герметичности в клапане, что приводит к аварийным ситуациям на предприятиях [10, 11]. В целях предотвращения подобного рода ситуаций используют различные методы контроля качества изделия, а также стремятся еще на стадии проектирования учесть и избежать провоцирующие факторы [12 – 14].

При разработке одним из главных предъявляемых требований является обеспечение надёжной, безопасной и стабильной работы во время всего срока службы [15 – 17]. На эти показатели влияет герметичность и работоспособность трубопроводной арматуры [16 – 18].

Для оценки этих параметров во время разработки прибегают к использованию различных методов числового и математического моделирования [19, 20]. Преимущество в использовании таких методов заключается в возможности на ранних этапах получить информацию о поведении затвора и отдельных его частей, определить оптимальные параметры для удовлетворения условий прочности и герметичности [21 – 23]. С помощью моделирования возможно получить информацию о поведении системы при различных видах нагружения, при работе со средами, находящимися в различных состояниях [24].

В связи с этим, цель настоящего исследования – проектирование затвора и оценочный расчет надёжности и долговечности его конструкции для обеспечения на трубопроводных системах безопасности при транспортировке рабочей среды со сверхвысокими параметрами.

### Описание конструкции

Был спроектирован оборотный затвор (рис.1), который можно монтировать на системы диаметрами восемьдесят, двести пятьдесят и триста миллиметров (см. также [25]).

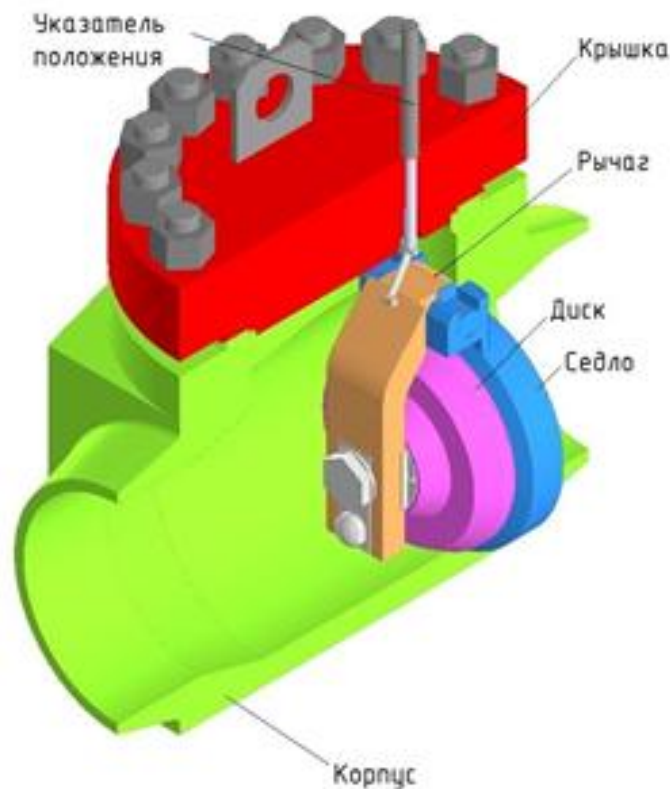


Рис. 1. – Конструкция поворотного обратного затвора с номинальным диаметром DN300

Корпус модельного ряда затворов является литой, фрезерованной деталью, изготовленную из коррозионностойкой стали, который имеет два отверстия (входное и выходное) с номинальными диаметрами 80, 250 и 300 мм, совместимых с проходными диаметрами трубопроводных систем. В корпус устанавливаются основные элементы конструкции ПОЗ.

Конструкция обратного затвора состоит из трёх основных элементов: седло, диск и рычаг.

Корпус поворотного обратного затвора спроектирован так, чтоб во время эксплуатации обеспечить беспрепятственное движение рабочей среды в рабочем направлении и свободное движение запорного органа

Герметизирующая крышка устанавливается на верхнее отверстие корпуса с помощью 12 болтов. Для герметизации полости затвора используются фланцевая резиновая прокладка. В состав конструкции крышки также входит установка дистанционного указателя положения запорного органа, для этого предусмотрено технологическое отверстие.

Металлическая трубка приварена к верхней поверхности крышки. Внутри трубки находится мишень запорного органа, которая может свободно двигаться. Чтоб узнать в каком состоянии находится затвор (в открытом или закрытом), используют дополнительное оборудование – дистанционный указатель положения запорного органа (рис.2).

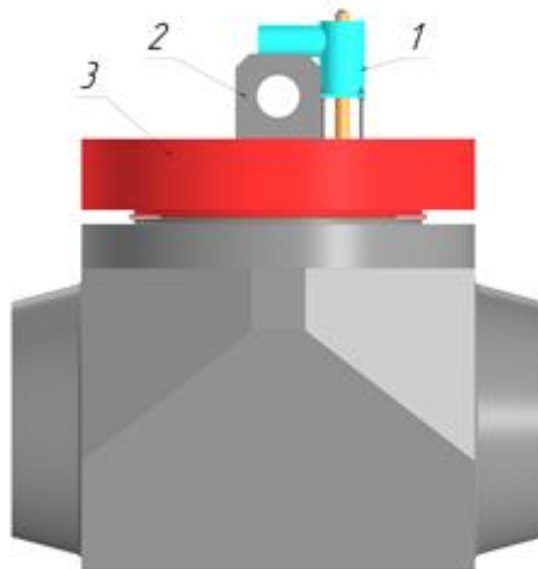


Рис. 2. – Положение крышки затвора и дистанционного указателя положения запорного органа: 1 – дистанционный указатель положения запорного органа, 2 – проушины, 3 – крышка

## **Методика проведения исследования и анализа конструкции**

При разработке ПОЗ методы вычислительного эксперимента и математического моделирования незаменимы: выполняются прочностные и жесткостные расчеты, прочность на устойчивость затвора при различных условиях работы. Данные расчеты позволяют определить допустимые пределы напряжений и деформаций для безопасной эксплуатации затвора. В ходе анализа исследуется напряженно-деформированное состояние конструкции затвора. Это позволяет определить, насколько прочной и надежной будет работа затвора при заданных нагрузках и условиях эксплуатации.

Чтобы выполнить оценивание нагрузки на обратный затворный клапан, потребуется рассчитать его предельную прочность. С этой целью проводится исследование напряженных деформированных состояний каждого элемента клапана, опираясь на методики итоговых компонентов. Вычисление предельной прочности выполняется с учетом наибольших постоянных нагрузок, присущих нормальному эксплуатированию рассматриваемого изделия.

Оценивание базируется на специализированном пакете программ, выполняющих дробление рассматриваемого механизма на ряд отдельных компонентов. Данное оценивание позволяет выявить наиболее загруженные участки, а также оценить сектора, нуждающиеся в подробном и детальном исследовании.

Оптимизация трехмерных геометрических моделей конструкции - процесс, направленный на улучшение эффективности и оптимизацию работы конструкции при помощи изменения ее формы, размеров или материалов.

Для оптимизации трехмерных геометрических моделей конструкции можно использовать различные методы и подходы.

Оптимизация трехмерных геометрических моделей конструкции позволяет улучшить ее производительность, эффективность, прочность и

другие характеристики, а также уменьшить затраты на производство и использование конструкции.

Задача описания напряженно-деформированного состояния может быть описана следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{ij,j} = 0 \text{ в } V; \\ \sigma_{ij} = F_{ij}(\varepsilon_{kl}) \text{ в } V \cup \Sigma; \\ \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \text{ в } V; \\ u_i = u_i^e \text{ на } \Sigma_{u1}; u_i = 0 \text{ на } \Sigma_{u2}; \\ \sigma_{ij}n_j = 0 \text{ на } \Sigma_\sigma, \end{array} \right. , \quad (1)$$

где  $\sigma_{ij}$ ,  $\varepsilon_{kl}$  –тензоры напряженности и деформации;  $u_i$  – составляющие градиента смещения;  $F_{ij}(\varepsilon_{kl})$  –зависимости гибкости;  $u_{i,j}$  – частные компилятивные;  $u_i^e$  – установленные смещения на отрезках  $\Sigma_{u1}$  плоскости тел;  $\Sigma_{u2}$  зафиксированные отрезки плоскости.

Так, плоская пластина, имеющая вид тонкого параллелепипеда, характеризуется тем, что преимущественная часть смещений для нее будет задаваться по значению  $Ox_1$ , а потому:

$$\begin{array}{l} u_1^e = U(t) = \dot{U}_0 t; \\ u_2^e = u_3^e = 0. \end{array} \quad (2)$$

При выполнении вычисления предельной прочности имитации клапана, мы разработали расчетную схему статического нагружения, представляющая собой поверхностно прилагаемое давление на внутреннюю полость клапана. Расчеты проводились при нагрузке  $P=20$  МПа.

Всем элементам клапана в качестве материала была назначена сталь 08X18H10T.

При статическом расчете напряженно-деформированного состояния считаем внешние поверхности входного и выходного отверстия клапана неподвижными.

Вместе с тем, количественное решение достигается автоматизированным дроблением конструкции – конечной компонентной сеткой. Далее был произведен первичный расчет с автоматически сгенерированной КЭС, на основании которого была произведена оптимизация КЭС в объеме конструкции клапана в закрытом и открытом состоянии (рис.3).

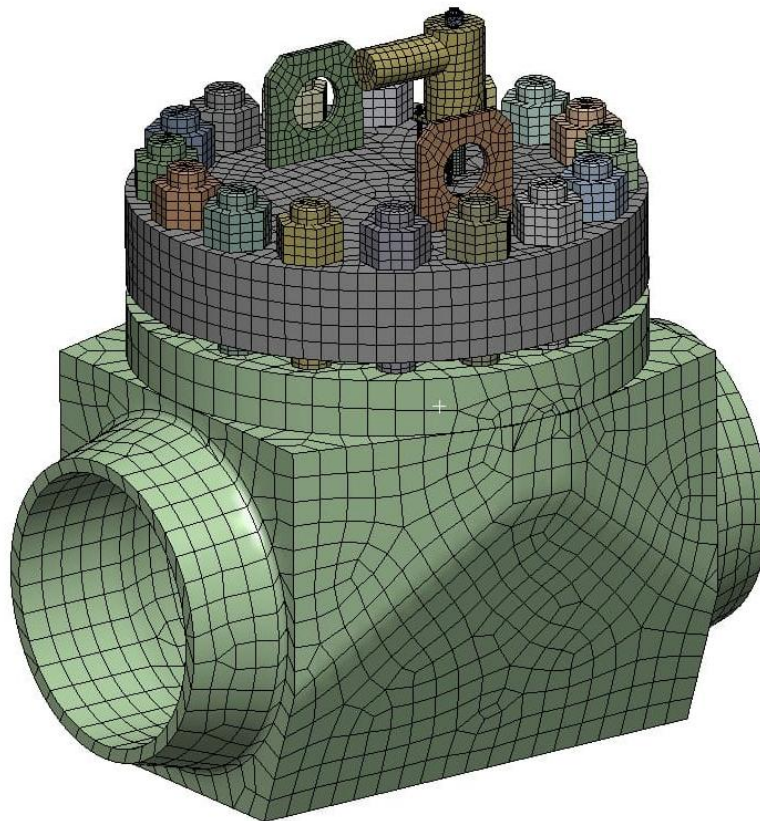


Рис. 3. – Оптимизированная конечно-элементная сетка в поворотном обратном затворе DN300

### **Расчет напряженно-деформированного состояния**

После получения оптимизированной сетки конечных элементов проводится статический конечно-элементный расчет модели клапанов в закрытом и открытом состоянии с целью получения более точных результатов.

Результатами расчета являются распределение эквивалентных напряжений (ЭН) и деформаций (ЭД) элементов конструкции клапана, нагруженного в соответствии с расчетной схемой в закрытом и открытом состоянии рис. 4 – 9.

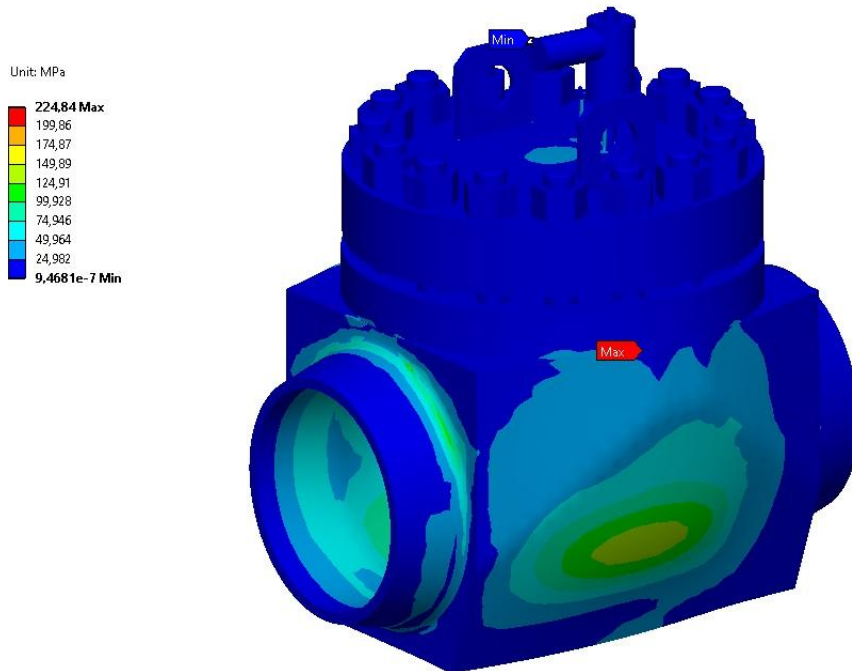


Рис. 4. – Распределение ЭН в объеме ПОЗ DN300 в закрытом состоянии

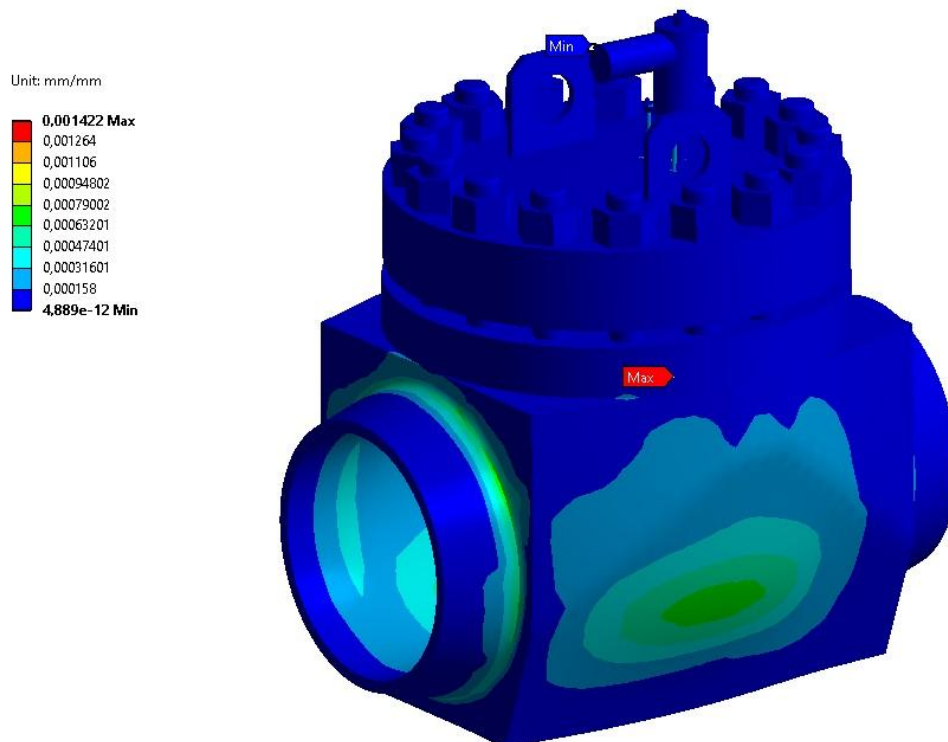


Рис. 5. – Распределение ЭД в объеме ПОЗ DN300 в закрытом состоянии



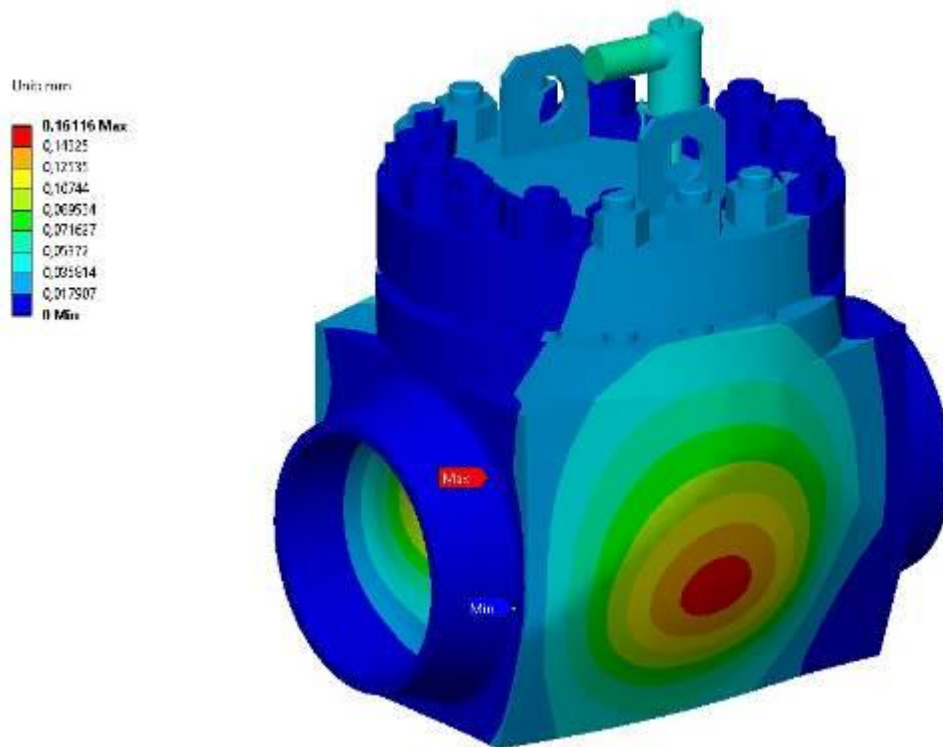


Рис. 6. – Распределение перемещений в объеме ПОЗ DN300 закрытом состоянии

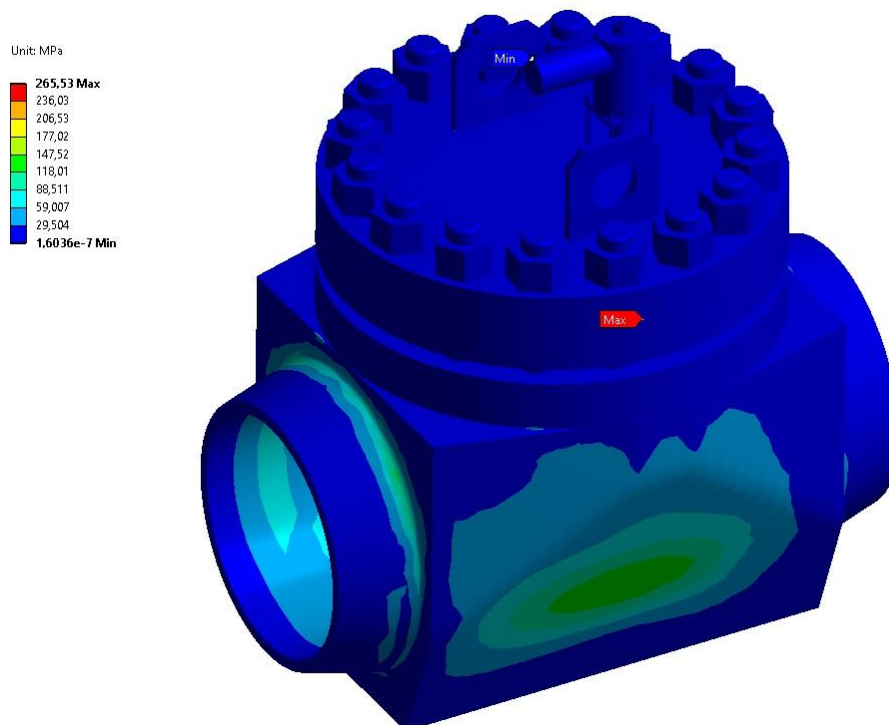


Рис. 7. – Распределение ЭН в объеме ПОЗ DN300 в открытом состоянии

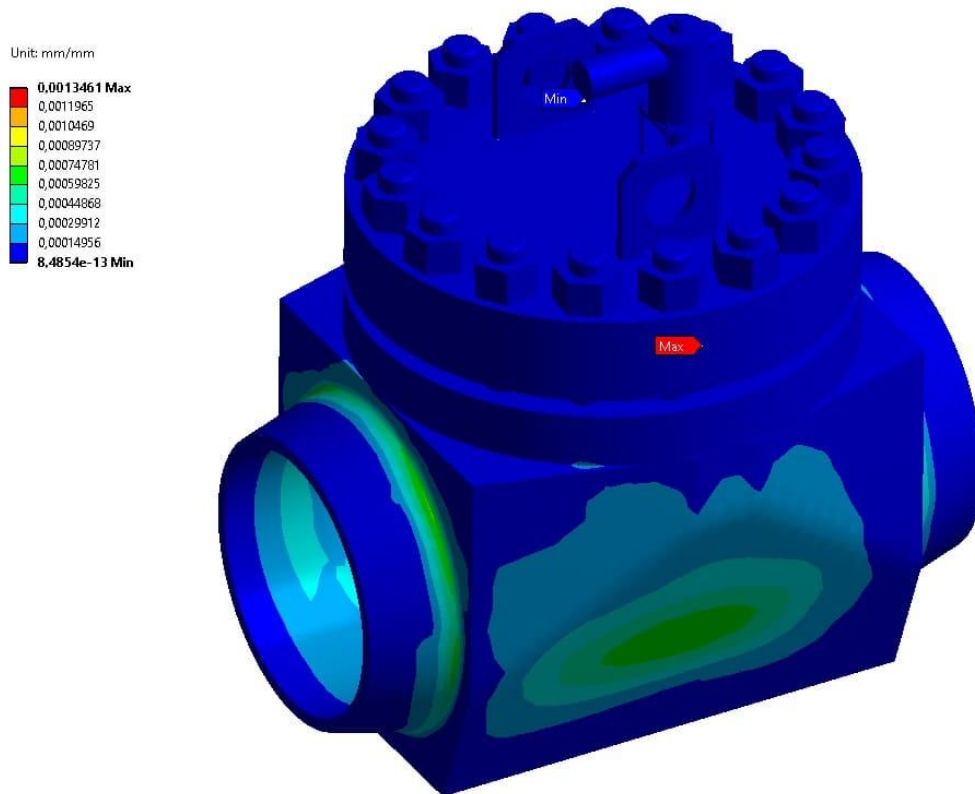


Рис. 8. – Распределение ЭД в объеме ПОЗ DN300 в открытом состоянии

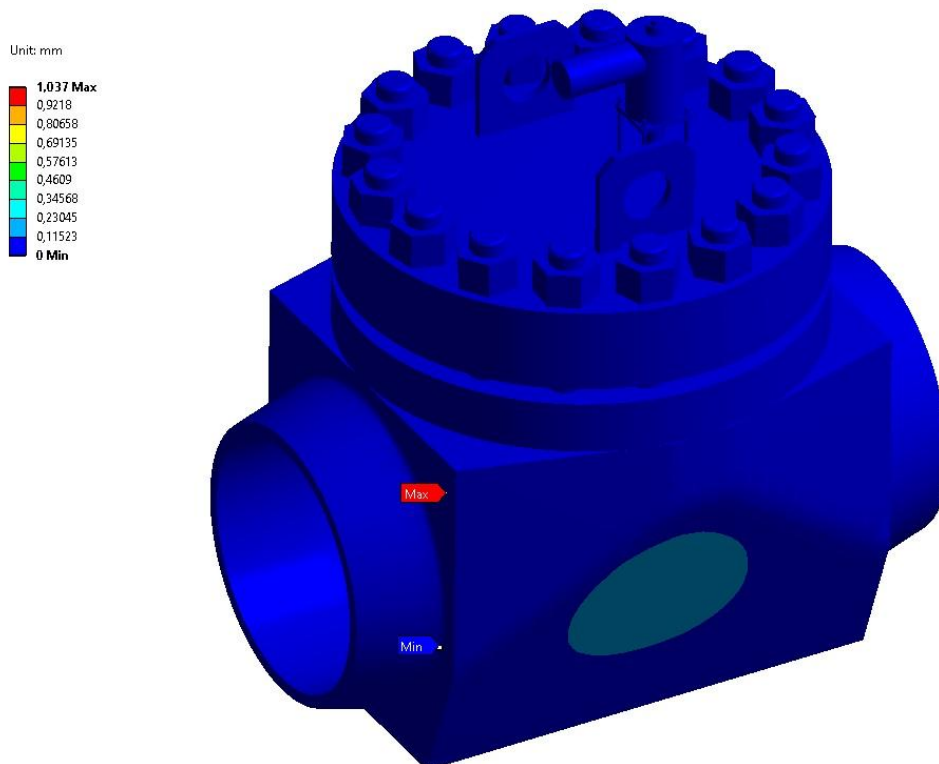


Рис. 9. – Распределение перемещений в объеме ПОЗ DN300 в открытом состоянии

Далее, в сравнительной таблице № 1 представлены результаты расчета поворотных обратных клапанов во всех исполнениях в закрытом и открытом состоянии.

Таблица № 1

Расчет напряженно-деформированного состояния с оптимизированной КЭС

	DN80 - закрыто	DN80 - открыто	DN 250 - закрыто	DN 250 - открыто	DN 300 - закрыто	DN 300 - открыто
Макс. эквивалентные напряжения $\sigma_{\max}$ , МПа	160,26	290,96	250,68	264,29	224,84	265,53
Макс. деформации $\Delta_{\max}$ , %	0,090	0,200	0,126	0,133	0,142	0,135
Макс. перемещения $\delta_{\max}$ , мм	0,04	0,41	0,13	0,56	0,16	1,04

### Расчет напряженно-деформированного состояния с учетом максимальных температур рабочей среды

Представленный расчет выполнялся для идентификации максимально нагруженных областей конструкции при значении температуры рабочей среды равной 350°C. Результаты расчетов представлены на рис. 10 – 25.

В сравнительной таблице № 2 представлены результаты расчета поворотных обратных клапанов во всех исполнениях (DN80, 250 и 300) в закрытом и открытом состоянии при воздействии рабочей среды с температурой 350°C с учетом напряженно-деформированного состояния.

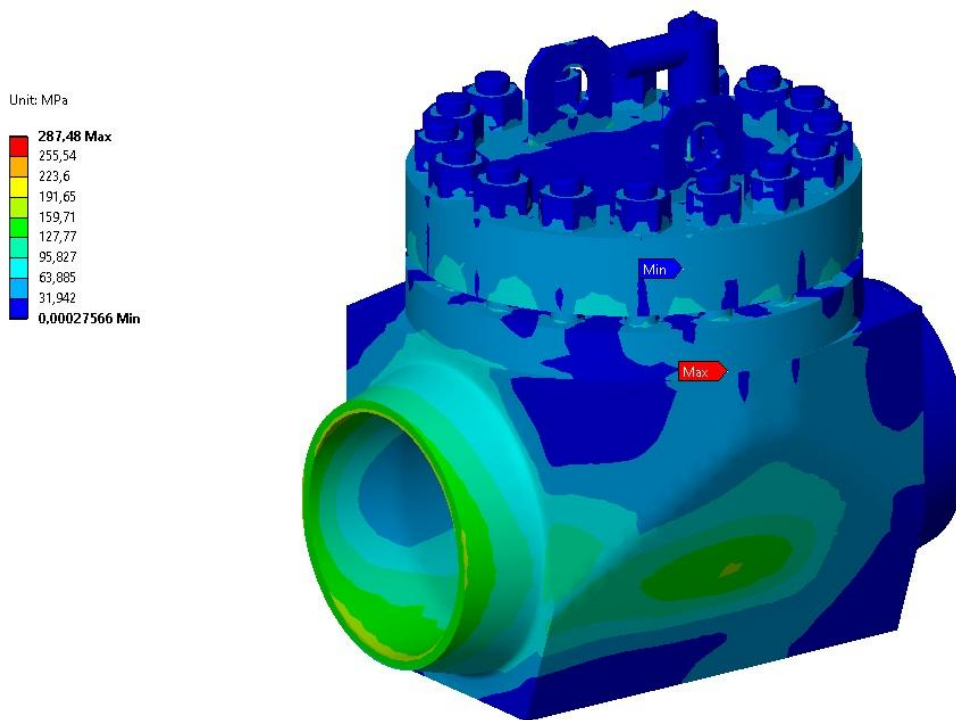


Рис. 10. – Распределение ЭН в ПОЗ DN300 в закрытом состоянии

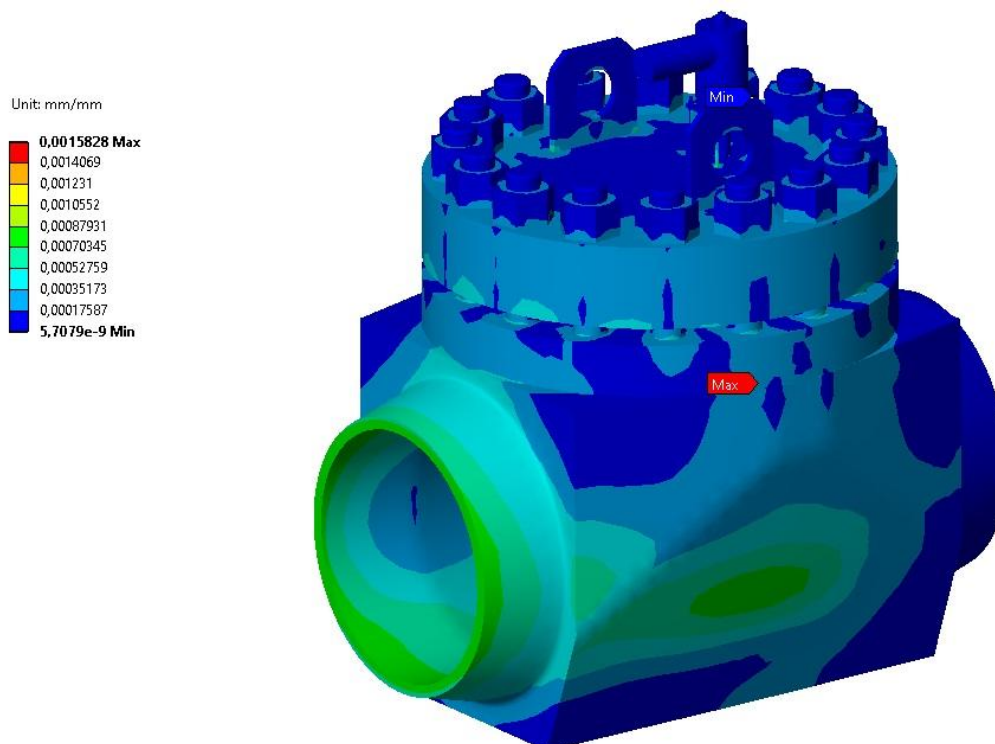


Рис. 11. – Распределение ЭД в объеме ПОЗ DN300 в закрытом состоянии

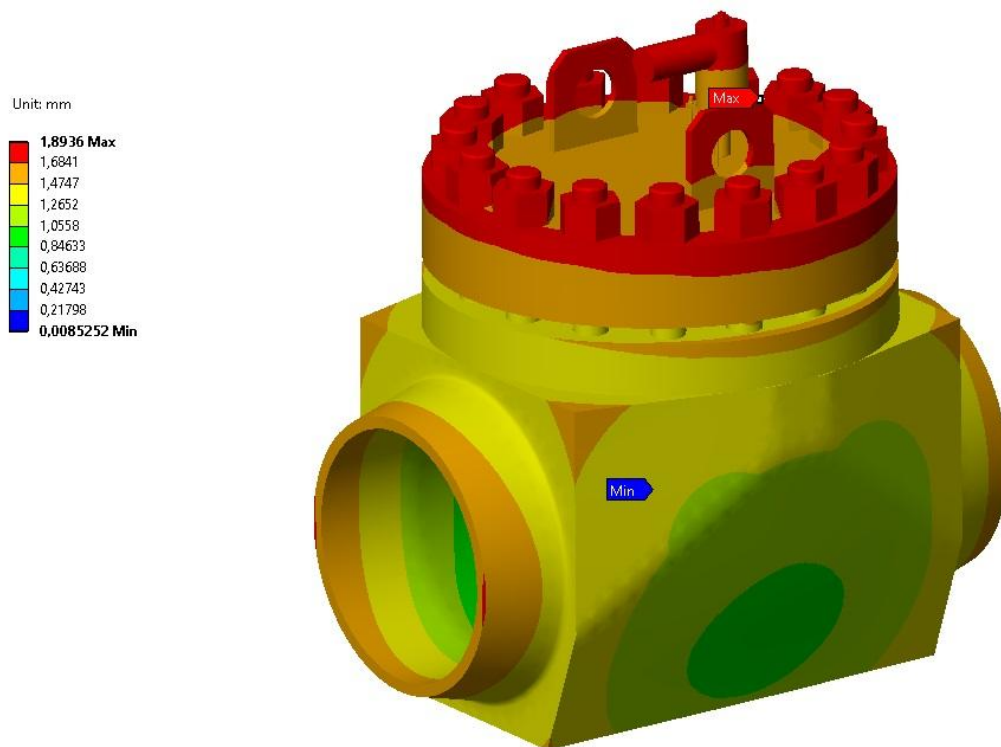


Рис. 12. – Распределение перемещений в объеме поворотного обратного клапана DN300 в закрытом состоянии

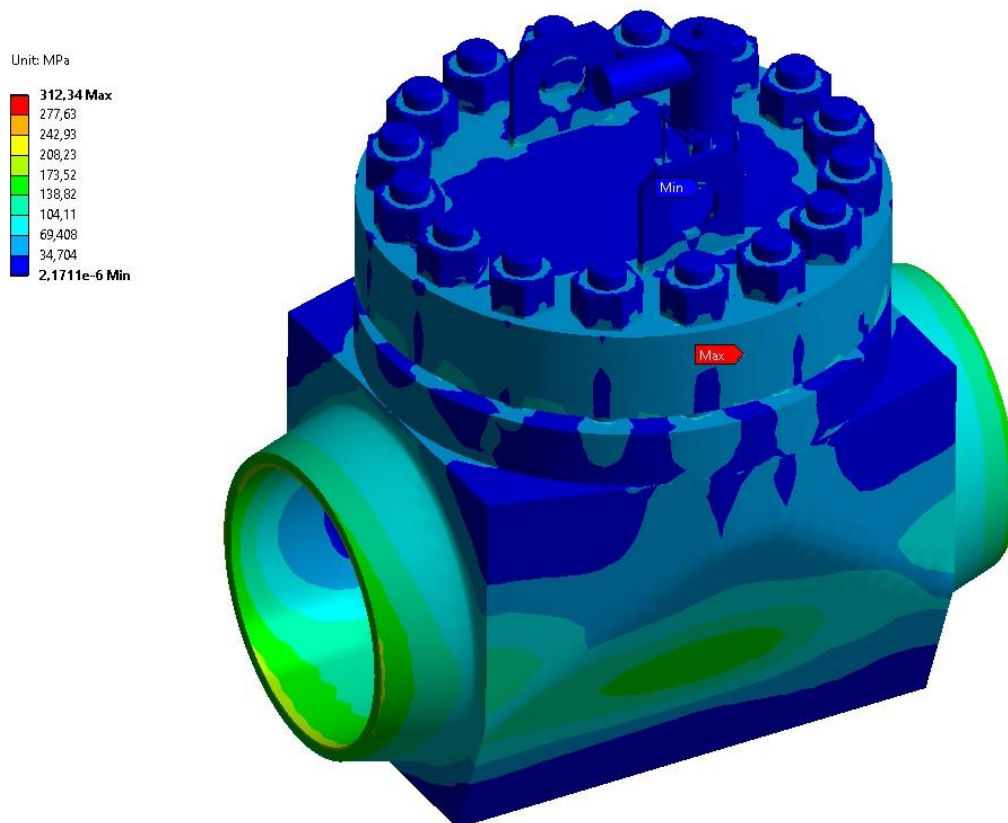


Рис. 13. – Распределение ЭН в объеме ПОЗ DN300 в открытом состоянии

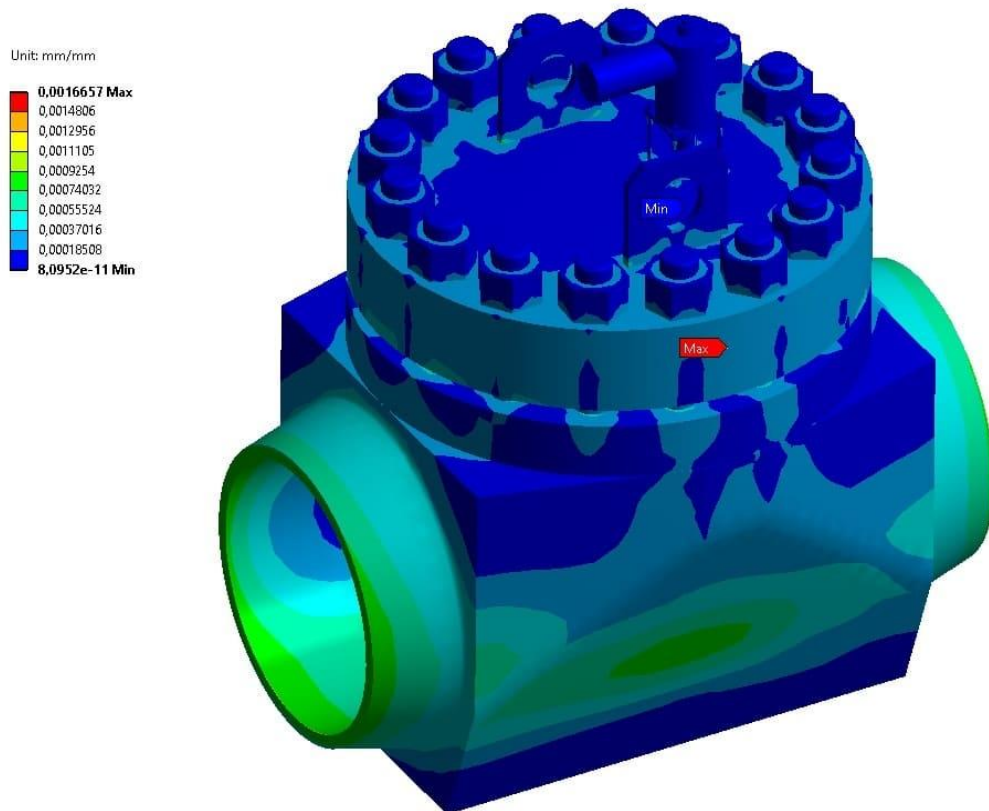


Рис. 14. – Распределение ЭД в объеме ПОЗ DN300 в открытом состоянии

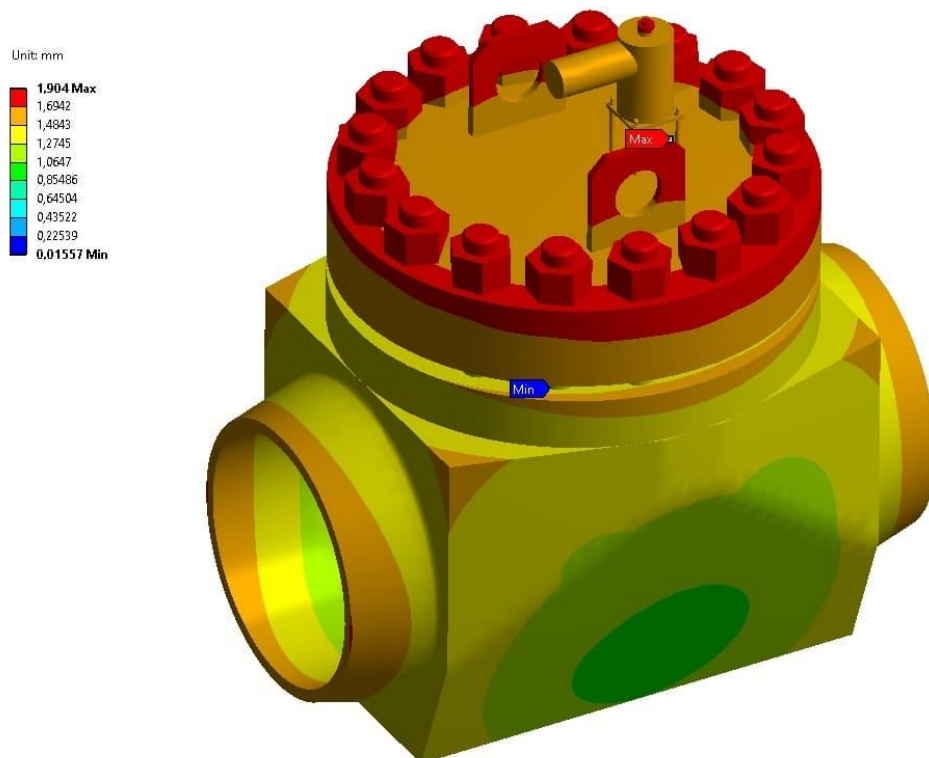


Рис. 15. – Распределение перемещений в объеме ПОЗ DN300 в открытом состоянии

Таблица № 2

Расчет напряженно-деформированного состояния с учетом максимальной температуры рабочей среды равной 350 °С

	DN 80 - закрыто	DN 80 - открыто	DN 250 - закрыто	DN 250 - открыто	DN 300 - закрыто	DN 300 - открыто
Макс. эквивалентные напряжения $\sigma_{\max}$ , МПа	312,44	260,08	286,71	249,04	287,48	312,34
Макс. деформации $\Delta_{\max}$ , %	0,24	0,181	0,144	0,141	0,158	0,167
Макс. перемещения $\delta_{\max}$ , мм	0,89	0,88	1,83	1,87	1,89	1,90

### Расчет показателей надежности

Для оценки надежности разрабатываемых затворов проводится ориентировочный расчет на основе структурного метода расчета надежности трубопроводной арматуры.

Итогом вычисления стал ряд количественных характеристик, описывающих надежность механизма (процент вероятности безотказного функционирования, численность отказов, прочие).

В соответствии с техническими требованиями, разрабатываемые поворотные обратные затворы должны отвечать следующим требованиям надежности и долговечности:

- заданный срок службы затвора должен быть более 50 лет;
- заданный срок службы внутрикорпусных (выемных) деталей должен быть более 15 лет;
- назначенный ресурс не менее 1350 циклов «открытие – закрытие».

Интенсивность отказов ПОЗ, определяется по формуле (3):

$$\lambda'_i = k_1 \cdot \lambda_{0i}, \quad (3)$$

где  $\lambda_{0i}$  – интенсивность отказов за период эксплуатации элементов (среднестатистическая);  $k_1$  – поправочный коэффициент.

Отказ в процентах  $i$ -х компонентов  $\lambda''_i$ , ненагруженных элементов вычисляется по формуле (4):

$$\lambda''_i = k_2 \cdot \lambda'_i = k_2 \cdot k_1 \cdot \lambda_{0i}, \quad (4)$$

где  $k_2$  – поправочный коэффициент.

Поэтому безотказное функционирование может быть выражено соотношением (5):

$$P_i(t) = e^{-(\lambda'_i t'_i + \lambda''_i t''_i)}, \quad (5)$$

где  $t'_i$  – продолжительность пребывания компонента под нагрузкой;  $t''_i$  – продолжительность пребывания компонента в ненагруженном состоянии.

Вместе с тем, зная процент безотказного функционирования  $i$ -х компонентов  $P(t^*)$  на каком-либо временном отрезке ( $t^*$ ), можно рассчитать безотказное функционирование по формуле (6):

$$P_i(t) = e^{\frac{t}{t^*} \ln(P_i(t^*))} \quad (6)$$

Таким образом, мы спроектировали многомерные имитации механизмов обратного затвора, гарантирующего безотказное эксплуатирование коллекторов диаметрами восемьдесят, двести пятьдесят и триста миллиметров. Расчет последовательного соединения проводится по формуле (7):

$$P_c = \prod_{j=1}^n P_j \quad (7)$$

По формуле (8) проводится расчет параллельного соединения:



$$P_c = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - P_j) \quad (8)$$

Формула (9) оценивает работу затвора без отказов:

$$P = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5 \cdot (1 - (1 - P_6)^{16}) \cdot (1 - (1 - P_7)) \cdot (1 - P_8) \quad (9)$$

В таблицах № 3 и № 4 приведены данные для расчета надежности элементов затвора в соответствии с разработанной структурной блок-схемой надежности.

Таблица № 3

Исходные данные для ориентировочного расчета надежности

Наименование элементов и узлов	Известные данные о вероятности безотказной работы за период в 10 лет	Вероятность безотказной работы для искомого периода в 12 лет
Корпус	0,9995	0,99940003
Крышка	0,9995	0,99940003
Диск (захлопка)	0,9991	0,9989201
Резьбовые соединения крышка-корпус (для одной шпильки)	0,97	0,96410888
Сварной шов крышка-корпус	0,999	0,99880012
Прокладка	0,999	0,99880012

Исходя из выполненных расчётов установлена вероятность безотказной работы поворотного обратного затвора, которая составила 99,53%, что соответствует техническим требованиям для поворотного обратного затвора.

## **Выводы**

В процессе выполнения работы были созданы трехмерные модели конструкции ПОЗ с номинальными диаметрами DN80, 250 и 300, которые обеспечивают безопасную эксплуатацию опасных производственных объектов, применяющих систему трубопроводов.

Был проведён анализ разработанной конструкции поворотных обратных затворов, где в качестве описания была выбрана модель с номинальным диаметром DN300. Проведено аналитическое исследование спроектированного модельного ряда ПОЗ в двух состояниях (открытом и закрытом) при помощи метода конечно-элементного анализа для подтверждения прочности и работоспособности конструкции при эксплуатации с высокими параметрами рабочей среды. Также был произведён ориентировочный расчёт показателей надёжности для трубопроводной арматуры.

Таким образом, результаты, полученные в ходе прочностного расчёта объектов, имеют примерный характер, но эти показатели позволяют оценить рассматриваемые системы затворов и установить, соответствуют ли они техническим требованиям по надёжности.

## **Информация о финансовой поддержке**

*Отдельные результаты настоящей работы получены в рамках работ по Соглашению о предоставлении субсидии от 24 июня 2021 года № 075-11-2021-041 по теме: «Разработка и освоение серийного производства модельного ряда поворотных обратных затворов для трубопроводных систем опасных производственных объектов со сверхвысокими параметрами рабочей среды» с Министерством науки и высшего образования РФ.*

## Литература

1. Орлов В.А. Обеспечение физической целостности и энергосбережения трубопроводных систем транспорта воды после их реконструкции // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. №4(80). С. 37-46.
2. Гостинин И.А., Вирясов А.Н., Семенова М.А. Анализ аварийных ситуаций на линейной части магистральных газопроводов // Инженерный вестник Дона, 2013, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1618](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1618)
3. Пантелеев А.С., Шматин А.К. Современные тенденции и подходы к изготовлению трубопроводной арматуры // Фундаментальные основы механики. 2023. №11. С. 106-113.
4. Афанасьева О.В., Бакулина А.А., Коркунов С.Б. Обзор российского рынка трубопроводной арматуры и приводов в 2020 году // Арматуростроение. 2021. №3(132). С. 30-33.
5. Переселкова А.Н. Анализ видов, последствий и причин потенциальных несоответствий при производстве трубопроводной арматуры на основании FMEA-анализа // Современные научные знания. Сборник статей II Международной научно-практической конференции. Пенза: Наука и Просвещение, 2023. С. 78-82.
6. Шегельман И.Р., Васильев А.С., Щукин П.О. Запорная трубопроводная арматура с компенсационной камерой // Инженерный вестник Дона, 2015, №3 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3117](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3117)
7. Трибой М.С., Корняков Л.В., Сизенко О.А. Проблема технического обслуживания трубопроводной арматуры на объектах ЖКХ // Главный энергетик. 2021. №8. С. 4-8.
8. Степаненко М.В., Пикалов Ю.А. Анализ мероприятий по повышению эксплуатационных характеристик запорной трубопроводной арматуры // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование. Сборник научных трудов 5-й международной молодежной научно-

практической конференции. Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга», 2018. С. 274-278.

9. Zhang G., Wang W. W., Wu Z. Y., Chen D. S., Kim H. D., Lin Z. Effect of the opening degree on evolution of cryogenic cavitation through a butterfly valve // Energy. 2023. №283. P. 128543. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128543

10. Рудакова И.В., Моисеев А.С. Анализ мероприятий по повышению эксплуатационных характеристик запорной трубопроводной арматуры // Технические и технологические основы инновационного развития. Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Аэтерна", 2019. С. 67-72.

11. Баранов С.М., Нефедов Н.В. Оценка внутренней герметичности трубопроводной арматуры и способы ее восстановления // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство. М.: Общество с ограниченной ответственностью "КОНВЕРТ", 2019. С. 31-38.

12. Alexandrov I.A., Muranov A.N., Mikhailov M.S. Development of an Algorithm for Automated Evaluation of the Operability of Structural Elements of Shut-off Valves // 2021 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS). 2021. pp. 257-261. DOI: 10.1109/ITQMIS53292.2021.9642718

13. Tatarkanov A.A., Alexandrov I.A., Mikhailov, M.S., Muranov A.N. Algorithmic Approach to The Assessment Automation of The Pipeline Shut-Off Valves Tightness // International Journal of Engineering Trends and Technology. 2021. №69(12). Pp. 147–162. DOI: 10.14445/22315381/IJETT-V69I12P218

14. Татарканов А. А., Александров И. А., Михайлов М. С., Муранов А. Н. Разработка алгоритма автоматизированной оценки герметичности контактных уплотнительных соединений запорной арматуры // Вестник Брянского государственного технического университета. 2021. № 10(107). С. 27-37. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-10-27-37

15. Леонтьев И.Е., Леонтьева Т.Е. Методы повышения надёжности трубопроводной арматуры на магистральных газопроводах // Вестник магистратуры. 2018. №1-2. С. 11-13.

16. Liang Q., Peng C., Li, X. A multi-state Semi-Markov model for nuclear power plants piping systems subject to fatigue damage and random shocks under dynamic environments // International Journal of Fatigue. 2023. №168. P. 107448. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107448

17. Yan Y., Chai, M. Sealing failure and fretting fatigue behavior of fittings induced by pipeline vibration // International Journal of Fatigue. 2020. №136. P. 105602. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105602

18. Мамаева О.Э. Совершенствование эксплуатационных показателей запорной трубопроводной арматуры // Проблемы современных интеграционных процессов и пути их решения. Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований", 2019. С. 90-92.

19. Никитин Ю.А. Оценка работоспособности обратного клапана трубопроводной арматуры в пакете прикладных программ Comsol multiphysics // Научно-технические технологии в машиностроении. Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2020. С. 179-184.

20. Чубаров Ф.Л., Акименко Д.А., Сизов А.Н., Никитин А.В. Разработка математической модели клапана-захлопки для оптимизации его демпфирования при закрытии // Современные научно-технические технологии. 2019. №6. С. 119-125.

21. Li W., Zhang H., Qu W. Stress response of a straight hydraulic pipe under random vibration // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2021. №194. P. 104502. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2021.104502

22. Zhang H., Qin M., Liao K., Wang K., He G. Pipe-soil vibration characteristics of natural gas pipelines during the pigging process // Journal of

Natural Gas Science and Engineering. 2021. №95. P. 104148. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.104148

23. Александров И. А., Шептунов С. А., Муранов А. Н. Моделирование и организация технологической среды машиностроительных предприятий: Учебно-методическое пособие. Москва: Общество с ограниченной ответственностью Издательство «Янус-К», 2023. 128 с..

24. Колганов А.Е. Особенности прочностных расчетов деталей трубопроводной арматуры // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2019. С. 125-127.

25. Соболева Ю.А., Карпов Н.С., Кочаров М.А. Разработка арматуры для опасных производственных объектов, работающей в широком диапазоне температур окружающей среды // Инженерный вестник Дона, 2023, №12 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n12y2023/XXXX/

### References

1. Orlov V.A. Voda i jekologija: problemy i reshenija. 2019. №4(80). pp. 37-46.

2. Gostinin I.A., Virjasov A.N., Semenova M.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1618

3. Panteleev A.S., Shmatin A.K. Fundamental'nye osnovy mehaniki. 2023. №11. pp. 106-113.

4. Afanas'eva O.V., Bakulina A.A., Korkunov S.B. Armaturostroenie. 2021. №3 (132). pp. 30-33.

Pereselkova A.N. Sovremennye nauchnye znaniya. Sbornik statej II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii (Modern scientific knowledge. Collection of articles of the II International Scientific and Practical Conference). Penza, 2023, pp. 78-82.

6. Shegel'man I.R., Vasil'ev A.S., Shhukin P.O. Inzhenernyj vestnik Dona, 2015, №3 URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3117
7. Triboj M.S., Kornjakov L.V., Sizenko O.A. Glavnyj jenergetik. 2021. №8. pp. 4-8.
8. Stepanenko M.V., Pikalov Ju.A. Kachestvo produkcii: kontrol', upravlenie, povyshenie, planirovanie. Sbornik nauchnyh trudov 5-j mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoi konferencii (Product quality: control, management, improvement, planning. Collection of scientific papers of the 5th international youth scientific and practical conference). Kursk, 2018, pp. 274-278.
9. Zhang G., Wang W. W., Wu Z. Y., Chen D. S., Kim H. D., Lin Z. Energy. 2023. №283. . P. 128543. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128543
10. Rudakova I.V., Moiseev A.S. Tehnicheskie i tehnologicheskie osnovy innovacionnogo razvitija (Technical and technological foundations of innovative development). Ufa, 2019, pp. 67-72.
11. Baranov S.M., Nefedov N.V. Peredovye innovacionnye razrabotki. Perspektivy i opyt ispol'zovanija, problemy vnedrenija v proizvodstvo (Advanced innovative developments. Prospects and experience of use, problems of implementation in production). Moscow, 2019, pp. 31-38.
12. Alexandrov I.A., Muranov A.N., Mikhailov M.S. 2021 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS). 2021. pp. 257-261. DOI: 10.1109/ITQMIS53292.2021.9642718.
13. Tatarkanov A.A., Alexandrov I.A., Mikhailov, M.S., Muranov A.N. International Journal of Engineering Trends and Technology. 2021. №69 (12). pp. 147–162. DOI: 10.14445/22315381/IJETT-V69I12P218
14. Tatarkanov A. A., Aleksandrov I. A., Mihajlov M. S., Muranov A. N. Vestnik Brjanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2021. № 10(107). pp. 27-37. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-10-27-37.

15. Leont'ev I.E., Leont'eva T.E. Vestnik magistratury. 2018. №1-2. pp. 11-13.
16. Liang Q., Peng C., Li, X. International Journal of Fatigue. 2023. №168. P. 107448. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107448
17. Yan Y., Chai, M. International Journal of Fatigue. 2020. №136. P. 105602. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105602
18. Mamaeva O. Je. Problemy sovremennyh integracionnyh processov i puti ih reshenija (Problems of modern integration processes and ways to solve them). Ufa, 2019, pp. 90-92.
19. Nikitin Ju.A. Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii (High technology in mechanical engineering). Ufa, 2020, pp. 179-184.
20. Chubarov F.L., Akimenko D.A., Sizov A.N., Nikitin A.V. Sovremennye naukoemkie tehnologii. 2019. №6. pp. 119-125.
21. Li W., Zhang H., Qu W. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2021. №194. P. 104502. DOI: 10.1016/j.ijvp.2021.104502
22. Zhang H., Qin M., Liao K., Wang K., He G. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2021. №95. P. 104148. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.104148
23. Aleksandrov I. A., Sheptunov S. A., Muranov A. N. Modelirovanie i organizacija tehnologicheskoy sredy mashinostroitel'nyh predpriyatij: Uchebnometodicheskoe posobie [Modelling and organisation of technological environment of machine-building enterprises: Educational and methodical manual]. Moskva: Obshhestvo s ogranichennoj otvetstvennost'ju Izdatel'stvo «Janus-K», 2023. 128 p.
24. Kolganov A.E. Jenergosberezhenie i innovacionnye tehnologii v toplivno-jenergeticheskom komplekse (Energy saving and innovative technologies in the fuel and energy complex). Tjumen', 2019, pp. 125-127.
25. Soboleva Ju.A., Karpov N.S., Kocharov M.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №12. URL [ivdon.ru/magazine/archive/n12y2023/XXXX/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n12y2023/XXXX/).





**Дата поступления: 29.10.2023**

**Дата публикация: 9.12.2023**