

## Разработка арматуры для опасных производственных объектов, работающей в широком диапазоне температур окружающей среды

*Ю.А. Соболева, Н.С. Карпов, М.А. Кочаров*

*Институт конструкторско-технологической информатики РАН (ИКТИ РАН)*

**Аннотация:** Безопасность опасных производственных объектов напрямую связана с надежной эксплуатацией трубопроводных систем, так как неисправность, возникающая в элементах таких систем, может привести к серьезным последствиям для производств и окружающей среды. Так как наибольшее количество отказов связано с неисправностями, возникшими в результате коррозии, то для повышения надежности требуется повышение коррозионной стойкости металла элементов трубопровода. В статье проводится обзор материалов для изготовления деталей, влияние различных климатических условий на механические свойства сталей. Также представлен разработанный поворотный затвор, предназначенный для автоматического предотвращения обратного потока рабочей среды. Для подтверждения работоспособности конструкции был проведен прочностной расчет конструкции, где рассматривается ее напряженно-деформированное состояние в заданных условиях нагружения. По итогам были получены значения максимальных эквивалентных напряжений, максимальных деформаций и перемещений, являющиеся ниже максимально допустимых.

**Ключевые слова:** трубопроводная система, трубопровод, запорная арматура, поворотный обратный затвор, математическое моделирование, метод конечных элементов.

### Введение

Трубопроводные системы обеспечивают работу многих жизненно важных объектов: продовольственную, автомобилестроительную, химическую, нефтехимическую, газовую промышленность, коммунальное хозяйство [1 – 3]. Трубопроводы должны быть надежными и безопасными в эксплуатации, ведь от них зависит жизнеобеспечение общества и промышленных предприятий [4 – 6]. Возникновение неисправности в любом из элементов системы может привести к аварии на промышленном объекте, которая сопровождается экологическим и экономическим ущербом [7 – 8]. Поэтому важным для проектировщиков и технических специалистов является оценка состояния трубопроводных систем, в том числе оценка с применением автоматизированных средств [9 – 11]. Важнейшими фактором,

определяющим остаточный ресурс и долговечность, является состояние материалов деталей [12, 13]. Повышение надежности систем опасных производственных объектов напрямую связана с увеличением коррозионной стойкости деталей, так как одной из причин отказов является возникновение повреждений в металле труб ввиду коррозии, происходящей под действием агрессивных сред [14, 15].

Трубопровод представляет систему, состоящую из отдельных элементов: прямые участки, фасонные детали (тройники, отводы, переходы), опоры, подвески, крепежные детали (болты, гайки, шайбы), трубопроводная арматура и т.д. [16]. Элементы, контактирующие со средой, должны выдерживать работу в особых условиях: в коррозионной, агрессивной, токсичной среде, при высоких и сверхвысоких параметрах пара, высоких давлениях, низких и высоких температурах, при вязких и сыпучих средах [17, 18].

Трубопроводная арматура предназначена для управления потоками рабочих сред при помощи изменения диаметра проходного сечения. По характеру выполняемых функций ее подразделяют на следующие классы: запорная, регулирующая, предохранительная, защитная, распределительно-смесительная [19 – 21]. Поворотный обратный затвор (ПОЗ) относится к защитной арматуре, которая предназначена для отключения участка трубопровода при критическом превышении параметров рабочей среды. ПОЗ обеспечивает движение потока в заданном направлении, при смене направления на обратное происходит закрытие затвора [22].

Выбор материалов, из которых изготавливают ПОЗ является важной частью при проектировании, позволяющей увеличить надежность конструкции, так как решение проблемы безопасности трубопроводных систем связано с эффективностью противокоррозионной защиты [23]. В связи с этим, важнейшими критериями является прочность, стойкость к

---

коррозии, газовая и кислородная герметичность при работе под давлением [24 – 26].

Целью данной работы является подбор надежного материала и дальнейший прочностной расчет конструкции поворотных обратных затворов, применяемых на производственных объектах высокой опасности.

### **Обзор материалов для изготовления элементов трубопровода**

Материалы, используемые при изготовлении трубопроводной арматуры, делятся по назначению на группы: корпусные, уплотнительные, прокладочные, герметизирующие и смазочные. В данной работе будут рассматриваться только корпусные материалы, которым необходимо обладать высокой прочностью, коррозионной стойкостью и технологичностью обработки. Благодаря хорошим литейным качествам, пластичности и легкости обработки, одним из самых распространённых конструкционных материалов является сталь.

Для изготовления элементов трубопровода опасных производственных объектов используют стали следующих марок: 20, 08X18H10T, 17ГС 25, 25X1МФ, ХН35ВТ, 25Х1МФ, 30ХМ, 15Х11МФ. Среди представленных сталей наиболее часто применяют стали 20 и 08X18H10T.

Стали 20 используются в промышленности для производства деталей машин и механизмов, например, это могут быть валы, оси, шестерни, рычаги и т.д. В таблице №1 представлен состав стали 20.

Таблица № 1

Химический состав стали 20 в %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As	Fe
0,17- 0,24	0,17- 0,37	0,35- 0,65	≤0,25	≤0,04	≤0,04	≤0,25	≤0,25	≤0,08	~98

Кремний препятствует высокой концентрации водорода, кислорода и азота, тем самым повышая прочность стали. Марганец способствует удалению серы, положительно влияет на качество поверхности.

Сталь 08X18H10T является преобладающим материалом для областей холодильной и криогенной техники, благодаря высокой пластичности и вязкости при низких температурах, высокой коррозионной стойкости. В таблице №2 представлен состав стали 08X18H10T.

Таблица № 2

Химический состав стали 08X18H10T в %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Fe
≤0,08	≤0,8	≤2	9-11	≤0,02	≤0,035	17-19	≤0,3	~65

В хромоникелевых сталях наличие титана устраняет склонность к коррозии при нагреве. Хром обеспечивает коррозионную стойкость, увеличивает порог хладоломкости. Легирование никелем повышает пластичность, увеличивает прокаливаемость, уменьшает размер зерна, снижает концентрацию примесей на дислокациях. Аустенитные хромоникелевые стали имеют также высокую стойкость к растворам органических кислот, что позволит изготовленным арматурам работать с агрессивными средами.

### **Теоретическое и аналитическое исследование изменения свойств металлов в процессе эксплуатации**

Продолжительное использование любого металлического изделия обусловлено ухудшением его физических параметров, поэтому даже под воздействием проектных нагрузок нередко можно наблюдать его деформирование. Снижение сопротивляемости к физическому повреждению обуславливается повышением когнитивного напряжения, процессом

старения металлов, а также истончением стенок, что, как правило, происходит из-за ржавления. Основным фактором преждевременного разрушения трубопровода является его длительный контакт с внешней коррозионной средой (стресс-коррозия), на который влияют такие параметры как давление, уровень рН коррозионной среды, механические свойства и структура металла. Именно поэтому важно исследование химического состава и уровня сопротивления металла к коррозии.

Целый ряд процессов, которые естественным образом протекают в металлических трубопроводных системах в ходе их продолжительного эксплуатации, негативно влияют на физические характеристики использованных в этих системах материалов. Ввиду того, что появление микротрещин на трубах обуславливается локальными изменениями структуры металлов, то для оценивания уровня продолжительного воздействия на показатели сопротивляемости к разрушению металлов, проводится ряд специализированных исследований, где устанавливается выраженная склонность металла к деформации, характеристика стойкости к образованию надломов, сопротивляемость к зарождению и диффузии надломов, прочие.

Но особый интерес представляет именно природа возникновения рассматриваемых эффектов, которую можно описать, воспользовавшись образцом стальной трубы – 17ГС. Величины разрывного сопротивления располагаются в диапазоне  $563 \pm 62$  Н/мм<sup>2</sup>, что соответствует стандарту ГОСТ 19282 этого материала.

Исследования, выполняемые при различных изгибах оцениваемого изделия, продемонстрировали ухудшение параметров сопротивляемости к физическим разрушениям. На рис.1 продемонстрировано влияние длительности эксплуатации на температуру перехода в хрупкое состояние металла труб из стали 17ГС. Так, эксплуатация в течение 25 лет показывает

---

снижение ударных вязкостей на 18-19%. В данном случае,  $KCU$  при -37-39 градусов Цельсия: с 59,4 до 49,7 Дж/см<sup>2</sup>,  $KCU$  при +18-19 градусов Цельсия с 59 до 48,4 Дж/см<sup>2</sup>.

По завершении тридцатилетнего эксплуатирования металлических труб температурные пределы хладоломкости переходят в разряд положительных температур, а потому процесс диффузии надломов при возрастании температур описывается нестойкими алгоритмами.

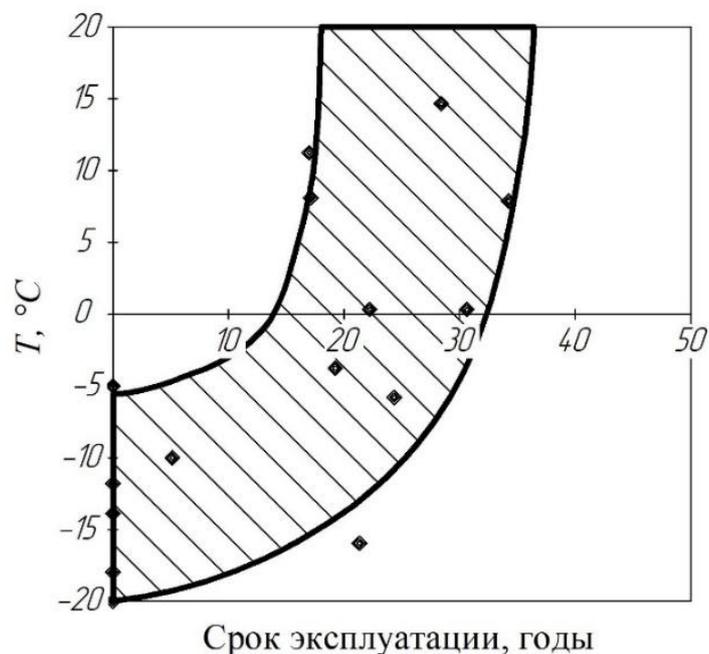


Рис.1. – Влияние длительности эксплуатации на температуру перехода в хрупкое состояние металла труб из стали 17ГС

Сорокалетнее эксплуатирование снижает уровень вязкости к разрушениям с 44 до 31,9 МПа·м<sup>1/2</sup>. Значения наибольших раскрытий надломов  $COD$  снижаются в 1,35-1,41 раза, а металлы демонстрируют повышенную чувствительность к когнитивному напряжению.

Вместе с тем, диффузии постоянных надломов так же будут определяться преимущественно продолжительностью эксплуатирования. Так, минимальными диффузиями постоянных надломов характеризуются стальные трубы 17ГС (показатели напряженности  $K=59...61$  МПа·м<sup>1/2</sup>). При

увеличении продолжительности эксплуатации трубы, скорости диффузии постоянных надломов повышаются, а при сорока – сорокапятилетнем эксплуатации могут достигать  $(79...81) \cdot 10^{-4}$  миллиметров в минуту.

### **Исследование влияния температуры на свойства материалов ПОЗ**

Выносливость стали устанавливается совокупностью ее механических и технологических свойств, которые зависят от химического состава и структурного состояния. Среди механических свойств основными являются прочность и пластичность. Прочность определяется способностью материала сопротивляться, не разрушаясь, приложенной силе. Пластичность – способность материала необратимо деформироваться, не разрушаясь, под действием нагрузки и сохранять эти изменения после снятия нагрузки.

В общем случае ряд физических характеристик того или иного материала характеризуется непостоянством, а его основные параметры будут определяться: температурой, скоростью деформаций, прочие.

Чтобы оценить воздействие температур на стальные изделия, требуется задействовать несколько характеристик:

- пределы прочности  $\sigma_b$  и текучести  $\sigma_{0,2}$ ;
- характеристики пластичности:

1. Относительное удлинение  $\delta$  – отношение приращения расчетной длины образца после разрыва к его начальной расчетной длине.

2. Относительное сужение  $\psi$  – отношение разности начальной площади и минимальной площади поперечного сечения образца после разрыва к его начальной площади поперечного сечения.

Параметры  $\delta$  и  $\psi$  могут определяться соотношением напряжения течения  $\sigma_s$ , разрушающим напряжением  $\sigma_f$  и деформационным упрочнением.

Пластичность материала повышается с увеличением температуры, т.к. повышенная температура облегчает движение дислокаций в твердых телах.

При испытаниях стали, например, сжатие или растяжение, повышение температуры оказывает сильное влияние на ее механические свойства.

На рис.2 представлено изменение свойств стали 20 при повышении температуры до 600 °С.

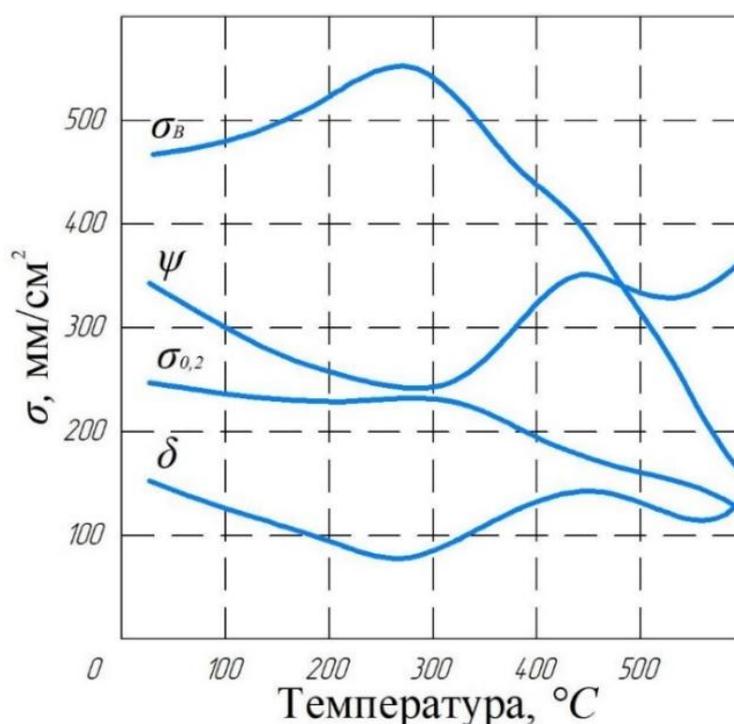


Рис. 2. – Степень воздействия температур на ряд физических характеристик стали 20

Так, на кривых, описывающих непостоянство в диапазоне до 300 градусов Цельсия можно наблюдать характерную площадку непостоянства, однако при возрастании температур – непостоянство будет снижаться. Технологический отжиг (от 195 до 298°С) обуславливает улучшение показателей крепости и одновременное ухудшение пластичности металла. Показано, что модули упругости металла при повышении температур – будут снижаться.

Сталь упрочняется в результате холодного пластического деформирования, однако вместе с этим снижается ее пластичность и ударная вязкость (естественное старение). При увеличении температуры этот процесс ускоряется, ударная вязкость может достичь около 12% исходной величины (искусственное старение).

В таблицах №3 и №4 для сталей 20 и 08X18H10T соответственно приведены механические свойства при различной температуре.

Таблица № 3

Механические характеристики стали 20 при разных температурах

Температура испытаний, °С	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , ГПа	Предел прочности $\sigma_B$ , ГПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %
20	0,28	0,43	33	66
200	0,23	0,40	27	66
300	0,17	0,41	28	63
400	0,15	0,34	38	80
500	0,14	0,24	39	85

Таблица № 4

Механические характеристики стали 08X18H10T при разных температурах

Температура испытаний, °С	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , ГПа	Предел прочности $\sigma_B$ , ГПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %
20	0,27	0,61	41	63
300	0,20	0,45	31	65
400	0,18	0,44	31	65
500	0,18	0,44	29	65

Затем имеет смысл исследовать степень температурного воздействия на граничные величины длительной прочности (так как терморедуцированная напряженность попросту разрушает основные составляющие материала на каком-то временном отрезке).

Вместе с тем характеристики крепости обуславливаются наличием устойчивых связей между соседствующими атомами благодаря их естественному скреплению. Так, под воздействием температур деформация возникает из-за нарушения межатомной корреляции. В то же время при криотемпературах наблюдается снижение прочности. Более того, из-за воздействия энергетических всплесков в металлах, некоторая часть центров (компонентов, или же составляющих) может оказываться недогруженной. Далее, благодаря устойчивой взаимной связи основных молекулярных участков между собой, может зарождаться ряд новых вакансий.

В случае, когда к металлу приложено напряжение, вакансии и дислокации перемещаются и скапливаются по границам зерен, около дефектов и микродефектов структуры. Из-за большого скопления вакансий и дислокаций образуются микротрещины, которые в дальнейшем становятся концентраторами напряжений, в результате чего происходит разрушение.

### **Разработка поворотного обратного затвора**

В рамках проекта был разработан затвор поворотный обратный (рис.3) основными конструктивными элементами которого являются: крышка (поз. 1); корпус (поз. 2); седло (поз. 3) диск (поз. 4); рычаг (поз. 5) (см. также [27]). Рабочая среда будет перемещаться по конструкции, подключенной горизонтально или вертикально, в определенном направлении, и не сможет изменять направление движения. Корпус изготавливается при помощи литья с дальнейшей фрезерной обработкой. Монолитная конструкция обеспечивает высокий уровень герметичности, имеет технологическое отверстие в верхней части, через которое устанавливаются основные конструктивные элементы, осуществляется замена и ремонт без демонтажа из трубопроводной системы трубопровода. Диск выступает в качестве заслонки, которая обеспечивает герметичное перекрытие потока. При движении в рабочем направлении среда

поднимает диск, при обратном потоке – диск плотно прижимается под действием среды.

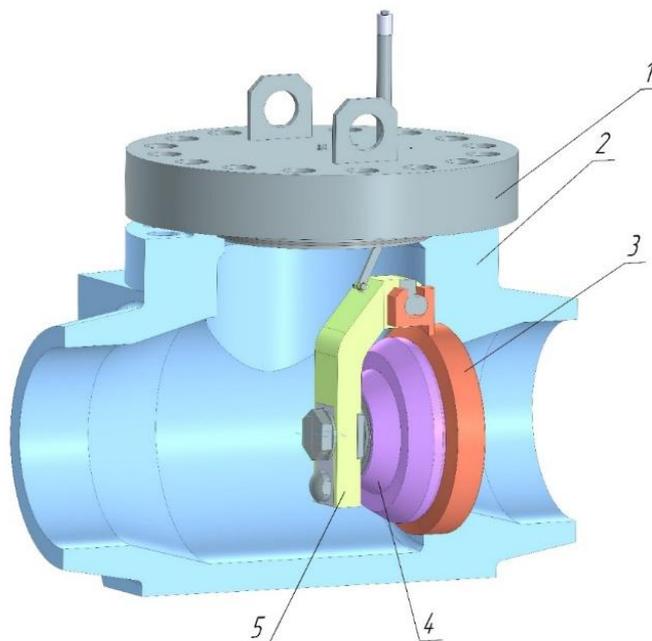


Рис. 3. – Разработанный поворотный обратный затвор

Седло устанавливается в паз корпуса, обеспечивает плотное прилегание диска. Рычаг Г-образной формы предназначен для приведения в движение запорного органа затвора. Он крепится к седлу посредством вала, обеспечивает открытие и закрытие запорного органа по рабочей траектории.

Крышка затвора предназначена для обеспечения герметичности поворотного обратного затвора, защиты конструкции от попадания внутрь инородных тел (рис. 4). Технологическое отверстие в конструкции крышке предназначено для установки указателя положения диска, в которое. Для установки указателя металлическая трубка крепится к крышке и свободно двигается вверх или в низ в соответствии с движением запорного органа.

Для оценки работоспособности разработанной конструкции был проведен расчет деформаций, напряжений и перемещений.

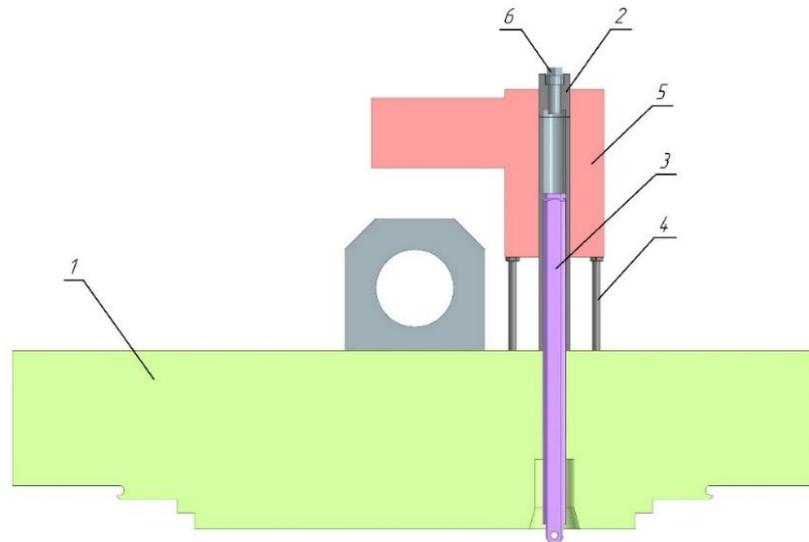


Рис. 4. – Конструкция дистанционного указателя положения запорного органа: 1 – крышка, 2 – втулка, 3 – мишень, 4 – шпильки дистанционного указателя положения запорного ролика, 5 – дистанционный указатель положения запорного органа, 6 – пробка

### Прочностной расчет затвора поворотного обратного

С целью проведения анализа прочности будет рассмотрено напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции в заданных условиях нагружения.

Связь деформаций и напряжений устанавливается законом Гука, согласно которому напряжения в точке прямо пропорциональны деформациям.

Кроме того, пластичность может определяться по зависимости (1), исходя из уравнений теории упругости:

$$\sigma_{ij}^{(m)} = C \left( Y^2(\varepsilon^{(m-1)}) \right)_{ijkl} \varepsilon_{kl}^{(m)}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{ij}^{(m)}$  – матрица напряжений;  $\varepsilon_{kl}^{(m)}$  – тензор деформации;  $m$ -м шаге итерации.

Число итераций выбираем из условия достижения заданного отклонения напряжений  $\Delta$ :

$$\max_{x_k \in V} \frac{\sum_{i,j} |\sigma_{ij}^{(m)}(x_k) - \sigma_{ij}^{(m-1)}(x_k)|}{\sum_{i,j} |\sigma_{ij}^{(m-1)}(x_k)|} < \Delta. \quad (2)$$

Благодаря многократному повторению процесса (2), большинство многомерных задач сводится к соотношению (3):

$$\begin{cases} \sigma_{ij,j}^{(m)} = 0 \text{ в } V; \\ \sigma_{ij}^{(m)} = C \left( Y_2(\varepsilon^{(m)}) \right)_{ijkl} \varepsilon_{kl}^{(m)} \text{ в } V \cup \Sigma; \\ \varepsilon_{kl}^{(m)} = \frac{1}{2} \left( u_{i,j}^{(m)} + u_{j,i}^{(m)} \right) \text{ в } V; \\ u_i^{(m)} = u_i^e \text{ на } \Sigma_{u1}; u_i^{(m)} = 0 \text{ на } \Sigma_{u2}; \\ \sigma_{ij}^{(m)} n_j = 0 \text{ на } \Sigma_\sigma, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\sigma_{ij}$  – компонента тензоров напряжений (декартова);  $\varepsilon_{kl}$  – компонента тензора деформаций (декартова);  $u_i$  – вектор перемещений;  $F_{ij}(\varepsilon_{kl})$  – функция нелинейного тензора, описывающая модель пластичности;  $u_{j,i}$  – частная производная;  $u_i^e$  – перемещения на части  $\Sigma_{u1}$  поверхности тела; поверхность  $\Sigma_{u2}$  полагаем жесткозакрепленной, с нулевыми перемещениями.

Численные решения задач (3) на любых повторениях опираются на методики итоговых компонентов. Так, вариационная формулировка условия (3) будет выражаться по формуле (4):

$$\int_V \delta_\varepsilon^{(m)T} \sigma^{(m)} dV = \int_{\partial V} \delta u^{(m)T} S^{(m)} d\Sigma, \quad (4)$$

В данном случае (5) задействован ряд координатных столбцов для составляющих градиента смещения:

$$\begin{aligned} u^{(m)} &= \left[ u_1^{(m)}, u_2^{(m)}, u_3^{(m)} \right]^T; \\ \sigma^{(m)} &= \left[ \sigma_{11}^{(m)}, \sigma_{22}^{(m)}, \sigma_{33}^{(m)}, \sigma_{12}^{(m)}, \sigma_{23}^{(m)}, \sigma_{31}^{(m)} \right]^T; \\ \varepsilon^{(m)} &= \left[ \varepsilon_{11}^{(m)}, \varepsilon_{22}^{(m)}, \varepsilon_{33}^{(m)}, \varepsilon_{12}^{(m)}, \varepsilon_{23}^{(m)}, \varepsilon_{13}^{(m)} \right]^T. \end{aligned} \quad (5)$$

Поэтому расчеты тех или иных конструкций обратных затворных клапанов должны опираться на установление самых нагруженных участков, которые по-разному нагружаются.

Оценить конструктивное состояние клапана можно при помощи оценивания напряженных деформированных состояний компонентов ПОЗ, благодаря моделированию по методике конечной составляющей, учитывая наибольшие и наименьшие температуры.

Оценивание выполняется в плоскости среза конечного элементного программного продукта путем автоматического дробления образца на ряд конечных составляющих. Благодаря этому упрощенному оцениванию можно выявлять самые нагруженные участки, а также анализировать степень соответствия текущих условий, прочие.

В ходе вычисления напряженных деформированных состояний, имитация клапана упрощалась удалением малозначительных слабонагруженных и небольших компонентов, которые не влияют на результат вычислений. Созданная имитация клапана отображается рис.5. В ходе решения задачи численного расчета для того, чтобы сократить время расчёта и уменьшить нагрузку на систему, создаётся сетка с крупными ячейками на плоскостях большой площади и с сужающимися ячейками к отверстиям. Большие поверхности разбивались вдоль взаимно перпендикулярными плоскостями, после чего указывался размер элементов на поверхностях и рёбрах.

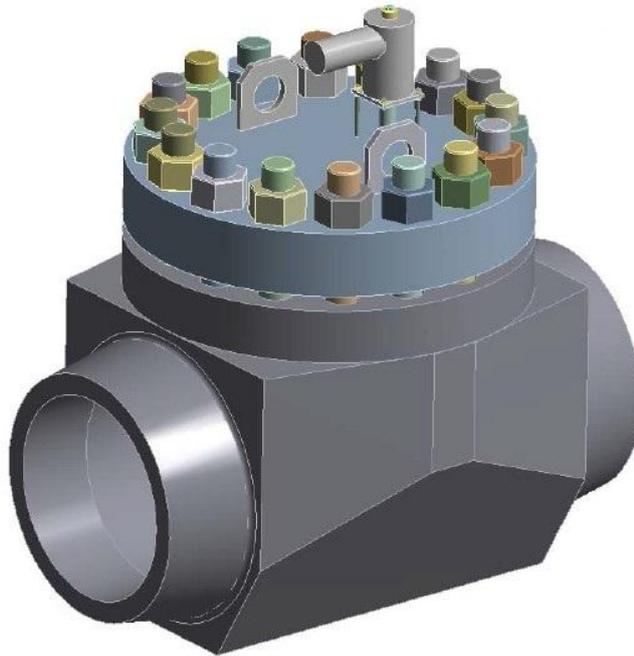


Рис. 5. – Расчетная модель клапана ДУ250

Такая сетка позволяет обобщить результаты на большой площади, при этом максимально учитывая деформацию наиболее нагруженных областей конструкции.

Были при этом приняты следующие допущения:

- однородность материалов;
- неизменность агрегатного состояния и химического состава материалов;
- деформационный нагрев отсутствует;
- воздействия на основание, вызванные внешними условиями, отсутствуют;
- нагрузки не зависят от времени, постоянны, приложены в одном направлении.

Конструкционным элементам ПОЗ в рамках конечно-элементного анализа НДС была назначена сталь 08Х18Н10Т.

## Результаты

Максимальные эквивалентные напряжения и деформации ПОЗ, представленные в таблице 5, являются результатом расчета НДС.

Таблица № 5

Результаты расчета прочности конструкции в закрытом состоянии

Условие расчета	Положение крышки	Макс. эквивалентные напряжения $\sigma_{\max}$ , МПа	Макс. деформации $\Delta_{\max}$ , %	Макс. перемещения $\delta_{\max}$ , мм
Максимальная температура окружающей среды 45°C	Закрыта	257,91	0,130	0,17
	Открыта	337,62	0,169	0,57
Минимальная температура окружающей среды -5°C	Закрыта	269,70	0,136	0,14
	Открыта	303,12	0,156	0,64

На основе полученных значений можно сделать вывод о соответствии прочности элементов конструкции ПОЗ значениям, необходимым для безопасной эксплуатации конструкции.

## Выводы

В статье были рассмотрены материалы, используемые для изготовления трубопроводной арматуры, и изменение их свойств в процессе эксплуатации. Проведен анализ влияния температуры окружающей среды на механические свойства наиболее часто используемых сталей: 20 и 08X18H10T. Для изготовления ПОЗ, используемых на производственных объектах повышенной опасности, была выбрана сталь 08X18H10T, так как ее рабочий диапазон температуры значительно больше: от -269 до 600 °С. Также, данный материал имеет более высокую стойкость к растворам органических кислот, что позволяет изготовленным ПОЗ работать с

агрессивными средами, и имеет более низкое содержание углерода, которое благотворно сказывается на антикоррозионных свойствах.

В рамках исследования была разработана конструкция поворотного обратного затвора, обеспечивающая движение рабочей среды в заданном направлении и предотвращающая в обратном. Для анализа прочности ПОЗ было рассмотрено напряженно-деформированное состояние элементов конструкции методом конечных элементов. В результате были получены значения максимальных эквивалентных напряжений, максимальных деформаций и перемещений, которые являются ниже предельных, тем самым подтверждая работоспособность разрабатываемой конструкции.

### **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. Шумаев В.А. Инновационные виды трубопроводного транспорта // Транспортное право и безопасность. 2016. № 5(5). С. 14-21.
2. Гайфуллина М.М. Современное состояние системы магистральных нефтепроводов в России // Аллея науки. 2019. Т. 2, № 4(31). С. 206-209.
3. Зубарева О.Н. Особенности сантехнического оборудования жилых и общественных зданий // Системные технологии. 2019. № 3(32). С. 31-36.

4. Голубева Е.А., Писаренко А.В. Проблема экологической безопасности при эксплуатации трубопроводного транспорта // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2019. № 2(3). С. 59-63.

5. Delshah M., Rahimpour H.R., Rahimpour M.R. Chemicals transporting systems safety: pumps, pipelines, and valves // Crises in Oil, Gas and Petrochemical Industries. 2023. №2. Pp. 227–242. DOI: 10.1016/B978-0-323-95163-0.00006-2

6. Иванцов О.М., Бушова Н.Н. Научно-техническая программа "Высоконадежный трубопроводный транспорт" // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 3. С. 12-21.

7. Lu H., Xi D., Qin G. Environmental risk of oil pipeline accidents // Science of The Total Environment. 2023. № 874. P. 162386. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162386

8. Даминев Р.Р., Асфандиярова Л.Р., Даминева Р.М. Повышение промышленной и экологической безопасности установки подготовки нефти // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2021. Т. 23, № 5(103). С. 53-56.

9. 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

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

---

11. Старостин И.В., Шевцов И.В., Чепусов А.Ю. Учет локальных разрушений трубопровода при проведении экспертизы промышленной безопасности // Инновационная наука. 2016. № 2-3. С. 137-138.
12. Бандурин М.А. Проблемы оценки остаточного ресурса длительно эксплуатируемых водопроводящих сооружений // Инженерный вестник Дона, 2012, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/891](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/891)
13. 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.
14. Орлова С.С. Оценка эксплуатационной надежности трубопроводов, транспортирующих сточные воды // Аграрный научный журнал. 2016. № 3. С. 59-62.
15. Вирясов А.Н., Гостинин И.А., Семенова М.А. Применение труб коррозионно-стойкого исполнения для обеспечения надежности нефтегазотранспортных систем Западной Сибири // Инженерный вестник Дона, 2013, №1 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1487](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1487)
16. Куличкова Е.А., Стеткар М.А., Голубева Т.Э. Параметрическое моделирование судового комплектующего оборудования // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2022. №1. С. 147.
17. Копытова Н.П. Защита от коррозии промысловых трубопроводов // Проблемы современной науки и образования. 2017. № 8(90). С. 19-22.
18. Calderón-Hernández J.W., Sinatora A., de Melo H.G., Chaves A.P., Mano E.S., Leal Filho L.S. Hydraulic convey of iron ore slurry: Pipeline wear and ore particle degradation in function of pumping time // Wear. 2020. Pp. 450–451. DOI: [10.1016/j.wear.2020.203272](https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203272)

19. Крамсаков Д.Е., Чудинов А.М., Кольга А.Д. Конструирование трубопроводной запорной арматуры с использованием законов гидростатики и гидродинамики // Транспортное машиностроение. 2023. № 2(14). С. 27-36.
20. Телепнева А.В. Запорно-регулирующая арматура // Молодой исследователь Дона. 2018. № 5(14). С. 116-121.
21. Куличкова Е.А. Судовая трубопроводная арматура: влияние на нестационарные процессы в трубопроводных системах // Судостроение. 2018. № 3(838). С. 19-23.
22. Пантелеев А.С., Шматин А.К. Современные тенденции и подходы к изготовлению трубопроводной арматуры // Фундаментальные основы механики. 2023. № 11. С. 106-113.
23. Ахмедова Г.М., Ахмедов А.М. Стойкость и защита металлических трубопроводных материалов в условиях эксплуатационных сред // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. № 3(88). С. 52-63.
24. Мягков К.А., Гаффанов Р.Ф., Сериков Д.Ю. Совершенствование методики расчета на прочность фланцевых соединений // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2018. № 3. С. 40-45.
25. Шарипов Р.Х. Напряженно-деформированное состояние трубопроводов в мерзлом грунте на сильно обводненных участках трассы // Аллея науки. 2018. №11(27). С. 778-781.
26. 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

27. Меликов И.Г., Лысенко В.Р., Лампежев А.Х. Разработка и моделирование поворотных затворов для трубопроводных систем // Инженерный вестник Дона, 2023, №12. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n12y2023/XXXX/

### References

1. Shumaev V.A. Transportnoe pravo i bezopasnost'. 2016. № 5(5). P. 14-21.
2. Gajfullina M.M. Alleja nauki. 2019. V. 2, № 4(31). P. 206-209.
3. Zubareva O.N. Sistemnye tehnologii. 2019. № 3(32). pp. 31-36.
4. Golubeva E.A., Pisarenko A.V. Pozharnaja i tehnosfernaja bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovanija. 2019. № 2(3). pp. 59-63.
5. Delshah M., Rahimpour H.R., Rahimpour M.R. Crises in Oil, Gas and Petrochemical Industries. 2023. №2. Pp. 227–242. DOI: 10.1016/B978-0-323-95163-0.00006-2
6. Ivancov O.M. Bezopasnost' truda v promyshlennosti. 2019. № 3. Pp. 12-21.
7. Lu H., Xi D., Qin G. Science of The Total Environment. 2023. № 874. P. 162386. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162386
8. Daminev R.R. Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2021. V. 23, № 5(103). pp. 53-56.
9. 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
10. Tatarkanov A.A., Alexandrov I.A., Muranov A.N., Mikhailov M.S. International Journal of Engineering Trends and Technology. 2021. №12. pp. 147-162. DOI: 10.14445/22315381/IJETT-V69I12P218

11. Starostin I.V., Shevcov I.V., Chepusov A.Ju. Innovacionnaja nauka. 2016. № 2-3. pp. 137-138.
12. Bandurin M.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №3 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/891](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/891)
13. Aleksandrov I. A., Sheptunov S. A., Muranov A. N. Modelirovanie i organizacija tehnologicheskoy sredy mashinostroitel'nyh predpriyatij: Uchebno-metodicheskoe 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.
14. Orlova S.S. Agrarnyj nauchnyj zhurnal. 2016. № 3. pp. 59-62.
15. Virjasov A.N., Gostinin I.A., Semenova M.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №1 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1487](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1487)
16. Kulichkova E.A., Stetkar M.A., Golubeva T.Je. Nedelja nauki sankt-peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo tehničeskogo universiteta. 2022. №1. p. 147.
17. Kopytova N.P. Problemy sovremennoj nauki i obrazovanija. 2017. № 8(90). pp. 19-22.
18. Calderón-Hernández J.W., Sinatora A., de Melo H.G., Chaves A.P., Mano E.S., Leal Filho L.S. Wear. 2020. pp. 450–451. DOI: [10.1016/j.wear.2020.203272](https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203272)
19. Kramsakov D.E., Chudinov A.M., Kol'ga A.D. Transportnoe mashinostroenie. 2023. № 2(14). pp. 27-36.
20. Telepneva A.V. Molodoj issledovatel' Dona. 2018. № 5(14). pp. 116-121.
21. Kulichkova E.A. Sudostroenie. 2018. № 3(838). pp. 19-23.
22. Panteleev A.S., Shmatin A.K. Fundamental'nye osnovy mehaniki. 2023. № 11. pp. 106-113.

23. Ahmedova G.M., Ahmedov A.M. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Serija: Stroitel'stvo i arhitektura. 2022. № 3(88). pp. 52-63.

24. Mjagkov K.A., Gaffanov R.F., Serikov D.Ju. Stroitel'stvo neftjanyh i gazovyh skvazhin na sushe i na more. 2018. № 3. pp. 40-45.

25. Sharipov R.H. Alleja nauki. 2018. №11 (27). pp. 778-781.

26. 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

27. Melikov I.G., Lysenko V.R., Lampežhev A.H. Inženernyj vestnik Dona, 2023, №12 URL ivdon.ru/magazine/archive/n12y2023/XXXX/

**Дата поступления: 29.10.2023**

**Дата публикация: 9.12.2023**