

УДК 621.646

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ГЕРМЕТИЧНОСТИ КОРПУСОВ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ В
УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
ПАРАМЕТРОВ**

*Студент 2 курса магистратуры Гилязов Данил Алмазович, Уфимский
государственный нефтяной технический университет, Российская Федерация,
г.Уфа.*

**MODERN PROBLEMS AND PROSPECTS FOR ENSURING THE
TIGHTNESS OF SHUT-OFF VALVE HOUSINGS UNDER EXTREME
OPERATING PARAMETERS**

*Second-year master's student Danil Almazovich Gilyazev, Ufa State Petroleum
Technological University, Russian Federation, Ufa.*

Аннотация: В статье представлен комплексный анализ современного состояния проблемы обеспечения герметичности корпусов запорной арматуры (ЗА) для критически важных применений в нефтегазовой, химической, энергетической и других отраслях промышленности. Рассмотрены основные типы конструкций ЗА (задвижки, клапаны, краны, затворы), их сильные и слабые стороны с точки зрения герметичности. Проведен детальный обзор факторов, влияющих на возникновение утечек, включая экстремальные температуры, давления, вибрации, коррозию и износ уплотнений. Проанализированы современные материалы и технологии, применяемые для повышения надежности уплотнительных узлов, такие как графитовые набивки, PTFE, эластомеры и металлические прокладки. Особое внимание уделено нормативной базе, регламентирующей требования к герметичности, в частности, национальному стандарту ГОСТ Р 54808-2011. На основе проведенного анализа выявлена ключевая проблема: несоответствие традиционных конструктивных решений и материалов постоянно растущим требованиям к рабочим параметрам и безопасности. Определена актуальность разработки принципиально новых методов герметизации, таких

как использование эластичного баллона, способных обеспечить абсолютную и долговременную герметичность в условиях сверхвысоких нагрузок и агрессивных сред.

Ключевые слова. *Запорная арматура, герметичность корпуса, утечка рабочей среды, фланцевое соединение, уплотнительные материалы, метод конечных элементов (МКЭ), эксплуатационная надежность, промышленная безопасность, ГОСТ Р 54808-2011, эластичный баллон.*

Abstract: The article provides a comprehensive analysis of the current state of the problem of ensuring the tightness of the bodies of shut-off valves (SV) for critical applications in the oil and gas, chemical, energy, and other industries. The main types of SV designs (gate valves, globe valves, ball valves, butterfly valves) are considered, highlighting their strengths and weaknesses from the point of view of tightness. A detailed review of the factors affecting the occurrence of leaks is carried out, including extreme temperatures, pressures, vibrations, corrosion, and seal wear. Modern materials and technologies used to improve the reliability of sealing units, such as graphite packings, PTFE, elastomers, and metal gaskets, are analyzed. Special attention is paid to the regulatory framework governing leakage requirements, in particular, the national standard GOST R 54808-2011. Based on the analysis, the key problem is identified: the inconsistency of traditional design solutions and materials with the constantly growing requirements for operating parameters and safety. The relevance of developing fundamentally new sealing methods, such as the use of an elastic balloon, capable of ensuring absolute and long-term tightness under conditions of ultra-high loads and aggressive environments, is determined.

Keywords: Shut-off valves, body tightness, working medium leakage, flange connection, sealing materials, finite element method (FEM), operational reliability, industrial safety, GOST R 54808-2011, elastic balloon.

Корпус запорной арматуры представляет собой фундаментальный компонент, от которого зависит целостность, безопасность и эффективность

бесчисленного множества технологических систем в ключевых отраслях мировой промышленности. Нефтегазовый сектор, химическая и нефтехимическая промышленность, энергетика, судостроение, коммунальное хозяйство — это далеко не полный перечень областей, где надежная работа задвижек, клапанов, кранов и затворов является не просто вопросом экономической эффективности, но и гарантией экологической безопасности и предотвращения катастрофических аварий с человеческими жертвами. В основе этой надежности лежит сложная, многогранная и непреходяще актуальная научно-техническая проблема — обеспечение абсолютной и долговременной герметичности корпусной части арматуры. Именно корпус, как основная несущая конструкция, воспринимает все колоссальные нагрузки от рабочей среды: экстремальные давления, достигающие сотен атмосфер, температурные перепады от криогенных до тысяч градусов, агрессивное химическое воздействие транспортируемых веществ. Любое нарушение его целостности неминуемо ведет к утечке этих сред, последствия которой могут варьироваться от значительных финансовых потерь до масштабных экологических катастроф и трагических техногенных аварий, что делает исследование в данной области исключительно актуальным.

Актуальность темы настоящего исследования обусловлена целым комплексом факторов, главным из которых является постоянно растущий уровень требований к технологическим процессам. Современная промышленность шагнула далеко за пределы, которые еще несколько десятилетий назад считались экстремальными. Освоение месторождений на шельфе арктических морей, где арматура должна работать при температурах до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже; увеличение глубины переработки углеводородов, сопровождающееся ростом рабочих давлений и температур, а также повышением агрессивности сред; развитие атомной энергетики на новых принципах; запуск космических аппаратов — все эти направления предъявляют к запорной арматуре принципиально новые, беспрецедентные требования.

Существующие традиционные решения, основанные на классических схемах уплотнения фланцевых и муфтовых соединений, применении стандартных прокладочных материалов и проверенных, но морально устаревающих конструктивных форм корпусов, зачастую не в состоянии обеспечить необходимый уровень надежности в таких условиях. Это создает объективную потребность в глубоком, всестороннем и системном исследовании физических основ процессов нарушения герметичности, разработке новых и совершенствовании существующих методов ее обеспечения с привлечением новейших материалов, технологий и расчетных методик, что и определяет научную и практическую значимость данной работы.

Проблема обеспечения герметичности корпуса запорной арматуры носит комплексный, междисциплинарный характер, находясь на стыке механики сплошных сред, теории упругости и пластичности, материаловедения, химии, теплофизики и теории прочности. Она включает в себя несколько взаимосвязанных аспектов. Во-первых, это герметичность разъемных соединений корпуса, к которым относятся, прежде всего, фланцевые соединения крышки с корпусом. Неплотность в этих узлах возникает вследствие сложного взаимодействия множества факторов: несовершенства контактирующих поверхностей, релаксации напряжений в болтах, ползучести материала прокладки, температурных деформаций, нерационального конструктива самого фланца. Во-вторых, это обеспечение монолитности неразъемных соединений, получаемых методами сварки или пайки. Здесь ключевыми проблемами являются возникновение остаточных сварочных напряжений, образование микротрещин и других дефектов, изменение структуры и свойств материала в зоне термического влияния, коррозионное растрескивание. В-третьих, это герметичность сальникового узла, уплотняющего подвижные элементы, однако данная проблема, будучи важной, часто выносится за рамки исследований, сфокусированных исключительно на статическом корпусе арматуры как на основном барьере на пути рабочей среды.

Современный этап развития науки и техники предлагает исследователю мощный арсенал инструментов для решения обозначенной проблемы. Это, прежде всего, методы компьютерного инженерного анализа, такие как метод конечных элементов, позволяющие с высокой степенью достоверности моделировать напряженно-деформированное состояние корпусных деталей и фланцевых соединений в условиях сложного термосилового нагружения, прогнозировать зоны возможной протечки и оптимизировать геометрию без дорогостоящих натуральных экспериментов. Это появление новых классов конструкционных и уплотнительных материалов: металлических порошковых сплавов, наноструктурированных сталей, композиционных материалов на основе углеродных и стекловолокон, высокотемпературных полимеров и эластомеров, обладающих уникальными прочностными и уплотнительными характеристиками. Это развитие аддитивных технологий, открывающих путь к изготовлению корпусов сложнейшей геометрии с внутренними полостями охлаждения, оптимизированным распределением материала и интегрированными элементами, недостижимыми при традиционном литье или механической обработке. Наконец, это новые принципы контроля герметичности, основанные на акустической эмиссии, оптоволоконных датчиках и системах предиктивной аналитики, позволяющих не просто констатировать факт утечки, а предсказывать ее вероятность на основе анализа данных в режиме реального времени.

Таким образом, центральная гипотеза данного исследования заключается в том, что комплексное применение перспективных конструктивных решений, новейших материалов и передовых компьютерных методов расчета позволяет кардинально повысить надежность и долговечность герметичности корпуса запорной арматуры, работающей в условиях сверхвысоких параметров и агрессивных сред, выходя за пределы возможностей традиционных технологий. Целью работы является разработка научно обоснованных и практико-ориентированных методов и рекомендаций по обеспечению герметичности

корпусов запорной арматуры на основе комплексного анализа, математического моделирования и экспериментальных исследований. Для достижения этой цели в работе поставлен и последовательно решается ряд взаимосвязанных задач, включающих анализ существующих конструкций и выявление их «слабых мест», разработку усовершенствованных 3D-моделей корпусных деталей, проведение серии виртуальных экспериментов методом конечных элементов для оценки прочности и герметичности при различных видах нагружения, исследование влияния свойств новых уплотнительных и конструкционных материалов на рабочие характеристики узлов, а также разработку практических рекомендаций для проектировщиков и производителей арматуры. Научная новизна исследования заключается в комплексном системном подходе к проблеме, сочетающем углубленный анализ дефектов существующих конструкций с синтезом новых решений, верифицированных современными расчетными методами. В частности, ожидается получение новых знаний о характере распределения контактных давлений на уплотнительных поверхностях фланцев при комбинированном воздействии высоких температур и давления, о поведении новых композиционных прокладочных материалов в условиях ползучести и релаксации, а также об оптимизации геометрии корпусов, производимых аддитивными методами, для минимизации концентраторов напряжений и обеспечения равнопрочности. Практическая значимость работы определяется тем, что полученные результаты и разработанные на их основе рекомендации могут быть непосредственно использованы инженерами-конструкторами и технологами машиностроительных предприятий, специализирующихся на производстве трубопроводной арматуры для ответственных применений. Внедрение разработанных решений позволит повысить конкурентоспособность отечественной продукции, снизить эксплуатационные расходы за счет увеличения межремонтных пробегов и, что самое главное, существенно

повысить уровень промышленной и экологической безопасности на опасных производственных объектах.

Анализ существующих конструкций запорной арматуры позволяет выявить их сильные и слабые стороны, что является фундаментальной основой для дальнейшего совершенствования, особенно в аспекте обеспечения ключевого требования — герметичности корпуса. Конструктивное исполнение корпуса напрямую диктуется типом арматуры, принципом действия запорного органа и методом соединения с трубопроводом, поскольку каждый из этих факторов вносит свой вклад в общую надежность и герметичность узла. Классификация запорной арматуры по типу запорного органа является основной. Наиболее распространенными и широко используемыми типами являются задвижки, клапаны (вентили), краны и затворы. Задвижки, характеризующиеся тем, что их запорный элемент перемещается перпендикулярно оси потока среды, являются одним из самых востребованных видов арматуры на магистральных трубопроводах большого диаметра, где требуются минимальные потери давления в открытом состоянии. Их корпус, как правило, массивный и симметричный, часто выполняется разборным, с фланцевым соединением крышки и корпуса, что создает очевидную потенциальную точку утечки. Основная проблема герметичности в задвижках связана с обеспечением плотного прилегания уплотнительных элементов клина к седлам корпуса, особенно при работе с абразивными средами, которые приводят к интенсивному износу и последующему неплотному закрытию. Кроме того, в конструкциях с выдвигным шпинделем сальниковый узел, предназначенный для герметизации подвижного соединения, также представляет собой уязвимое место, требующее постоянного контроля и подтяжки.

Таблица 1 – Сравнительный анализ основных типов запорной арматуры

Типа арматуры	Преимущества	Недостатки (с точки зрения герметичности корпуса)	Типичные применения
Задвижка	Низкое гидравлическое сопротивление, прямооточность	Фланцевое соединение крышки, износ седла и клина, сальниковый узел	Магистральные трубопроводы большого диаметра, вода, пар, нефть
Запорный канал (вентиль)	Высокая герметичность в закрытом состоянии, регулирование расхода	Высокое гидравлическое сопротивление, резьбовая заглушка сальника, потенциальные течи по крышке	Трубопроводы малого и среднего диаметра, пар, агрессивные среды
Шаровой кран	Высокая герметичность, малое сопротивление, быстрое действие	Ограниченная термостойкость полимерных седел, неремонтопригодность сварного корпуса	Широкий спектр применений, включая газ, воду, нефтепродукты
Поворотный затвор	Малая строительная длина и масса, низкая стоимость	Низкая герметичность, износ эластомерного уплотнения, перекося диска	Трубопроводы больших диаметров, низкие давления, вода, воздух

Запорные клапаны, или вентили, в которых запорный элемент перемещается параллельно оси потока, садясь на седло, предлагают иные

преимущества и недостатки. Их ключевым достоинством является возможность применения для тонкого регулирования расхода, а также более высокая, по сравнению с задвижками, надежность в закрытом положении, особенно после длительной эксплуатации, так как при закрытии происходит притирка золотника к седлу. Однако это преимущество омрачается высоким гидравлическим сопротивлением из-за S-образной формы проточной части корпуса, что приводит к значительным потерям энергии. С точки зрения герметичности корпуса, клапаны часто выполняются в неразборном исполнении, что исключает проблему разъемного соединения крышки, но создает сложности с обслуживанием и ремонтом внутренней полости. Резьбовая заглушка в верхней части корпуса для организации сальниковой камеры является еще одним потенциальным источником протечки, подверженным, помимо прочего, коррозионному воздействию и механическому износу резьбы. Шаровые краны, получившие широчайшее распространение в последние десятилетия, представляют собой арматуру, где запорным элементом служит сферическая пробка с сквозным отверстием. Простота конструкции, малое гидравлическое сопротивление, быстрота действия и высочайшая надежность уплотнения сделали их чрезвычайно популярными. Герметичность в закрытом состоянии обеспечивается за счет прижатия шара к уплотнительным кольцам, изготовленным из полимерных материалов, что обеспечивает герметичность класса "А" по ГОСТ 9544. Однако именно в этом и кроется их основной конструктивный недостаток применительно к экстремальным условиям: уплотнительные кольца из термопластов имеют ограниченный температурный диапазон применения и склонны к старению и потере эластичности. Корпус шаровых кранов чаще всего неразборный, сваривается из двух или трех частей, что, с одной стороны, обеспечивает высокую надежность, но с другой — делает их абсолютно неремонтопригодными в случае выхода из строя внутренних элементов. Фланцевые соединения таких кранов с трубопроводом, равно как и

потенциальные течи через уплотнения поворотного вала, остаются зонами повышенного внимания. Поворотные дисковые

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 54808-2011. Арматура трубопроводная. Нормы герметичности затворов. — Введ. 2012-01-01. — М. : Стандартинформ, 2011. — IV, 27 с.
2. ISO 5208:2008. Industrial valves — Pressure testing of valves. — Geneva : ISO, 2008.
3. IEC 60534-4:2006. Industrial-process control valves — Part 4: Inspection and routine testing. — Geneva : IEC, 2006.
4. ГОСТ Р ИСО 8573-1-2005. Сжатый воздух. Часть 1. Загрязнения и классы чистоты. — Введ. 2006-07-01. — М. : Стандартинформ, 2005.
5. ГОСТ 9544-2015. Арматура трубопроводная запорная. Нормы герметичности затворов. — Введ. 2017-01-01. — М. : Стандартинформ, 2016. — 15 с.
6. Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика: Справочное пособие / Т.М. Башта. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 1971. — 672 с.
7. Богданов В.Н. Трубопроводная арматура для нефтегазовой промышленности: Справочное пособие / В.Н. Богданов, А.П. Ольховский. — М. : Недра, 1989. — 320 с.
8. Гуревич Д.Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры: Учебное пособие для вузов / Д.Ф. Гуревич. — Л. : Машиностроение, 1979. — 256 с.
9. Ильин В.А. Материаловедение: Учебник для вузов / В.А. Ильин, А.В. Батаев. — М. : Издательский центр "Академия", 2013. — 528 с.