



ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД к проектированию трубопроводной арматуры для загрязнённых сред

Фото с сайта: www.joblo.com

И.Н. Карелин, д. т. н., РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

*«А в чём дело? – спросили его.
– Я вам скажу, – пообещал он. – В разделении функций, вот в чём дело!
Я требую жёстко установленных границ Сомнения и Неопределённости!»*

Douglas Adams. The Hitch Hiker's Guide to the Galaxy

» В существующих приоритетных научно-технических проблемах нефтегазовых отраслей страны немаловажное место занимают направления обеспечения экологической и промышленной безопасности производственных комплексов, а также повышения эффективности реализуемых технологий на всех этапах деятельности отраслей. Значимость качества технологического оборудования в реализации указанных приоритетных направлений трудно переоценить. При этом постоянно актуальна надёжность оборудования и есть, по меткому выражению академика Б.В. Гнеденко, «...качество, развернутое во времени». В частности, касаясь масштабных объектов

и перспективных проектов, содержащих сложные и протяженные трубопроводные обвязки для управления потоками рабочих и технологических сред, следует отметить необходимость всё большего количества специфических трубопроводных устройств для критических условий эксплуатации [1].

Вместе с тем анализ подобных условий приводит к выводу о том, что они обусловлены не только всё более напряженными технологическими параметрами функционирования обслуживаемых ими процессов, но и проблемами адаптации к ним существующих конструкций трубопроводных устройств. Ведь высокие или низкие температуры транс-

портируемых сред, их повышенное давление и содержание агрессивных (коррозионно-активных и твердых) компонентов, сложная геометрия трубопроводных обвязок оборудования являются объективными и часто неустраняемыми негативными факторами. Прямым следствием указанных факторов является эрозия металлов, т. е. разрушение поверхностного слоя металла деталей при обтекании потоком твердых, жидких или газообразных частиц, а нередко и многофазным потоком среды.

Адаптация существующих конструкций разнообразных нефтегазовых (современный приоритет Минпромторга РФ) трубопроводных устройств (НГТУ), особенно к абра-

зивосодержащим потокам, путем материалозамещения, т. е. посредством защиты обтекаемых поверхностей изнашивающихся деталей более стойкими, даже самыми твердыми из существующих, материалами, зачастую оказывается малоэффективной (рис. 1). Последствия подобных отказов в нефтегазовых отраслях (рис. 2) совершенно понятны: от нарушения нормального режима эксплуатации более значимого оборудования (например, газоперекачивающих агрегатов или нефтяных насосных станций) до экологических катастроф и разной степени травматизма персонала, порой несовместимого с жизнью.

Фактор критичности в конструкциях, например – в запорных и регулирующих устройствах, изначально заложен в принципе их действия. В процессе работы указанных устройств, сопровождающейся кратковременным периодическим или более длительным защемлением управляемого потока, скорость последнего, а следовательно, и агрессивность, резко возрастает. Известно, что интенсивность (скорость) поверхностного разрушения эродируемого материала прямо связана со скоростью указанных потоков целостепенной зависимостью. Это определенно позволяет даже широко используемые стандартные элементы трубопроводов (задвижки, краны, фитинги и т. п.), особенно в условиях загрязненных мехпримесями сред, отнести к категории устройств для критических условий эксплуатации.

И такую проблему, учитывая наличие характерных видов отказов (см. рис. 1), следует рассматривать с позиций трибологии, акцентируя внимание на сопротивлении изделий абразивной эрозии, т. е. триботехники [2]. Анализ научных исследований в этом направлении выявил необходимость методологического пересмотра решения означенной проблемы. Существующий преимущественно эмпирический подход, выражающийся непосредственностью прин-

ципа «где изнашивается, там и надо упрочнять», даже с учетом богатейшего опыта применения упрочняющих технологий [3] сколько-нибудь заметного эффекта в плане увеличения стойкости НГТУ не приносил [4]. Изучение методологических средств показало, что прерогативой методологии системного подхода как раз и является постановка новых задач исследований [5].

Иницилирующей приложением системного подхода к рассматриваемой проблеме в настоящей работе явилась рациональная мысль зарубежных специалистов трибологии об исследовании газодинамической ситуации в окрестности изнашиваемой поверхности [6]. Причем было

понятно, что под окрестностью целесообразно понимать гидравлическую характеристику всей проточной части изнашиваемого изделия. К тому же наблюдалось косвенное подтверждение данного направления исследований в некоторых конструкторских решениях трубопроводных устройств (применение сопел, лопаток, клеток и решеток, создание конструктивных элементов, повышающих плавность изменения расходной характеристики запорных устройств и т. п.).

Тщательный анализ известных в теории эрозии трибосистем вида «поток – материал преграды» [7] позволил предложить новое системное представление объекта исследова-

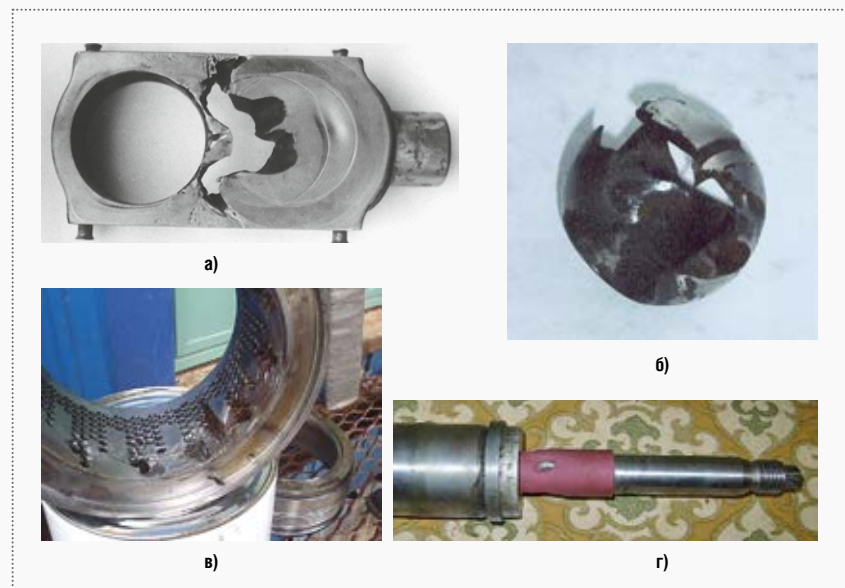


Рис. 1. Виды повреждений деталей газонефтяных трубопроводных устройств с защитой спецматериалами: а – шибер фонтанной задвижки с суперсплавами (Япония); б – шаровая пробка с покрытием твердым хромом клапана системы очистки природного газа (СССР); в – клетка «уникального» регулирующего клапана (Голландия); г – шток регулирующего устройства с защитной керамической втулкой (Россия)



Рис. 2. Фонтанная арматура АО «РОСПАН ИНТЕРНЭШНЛ» и её задвижка после аварии (Россия)

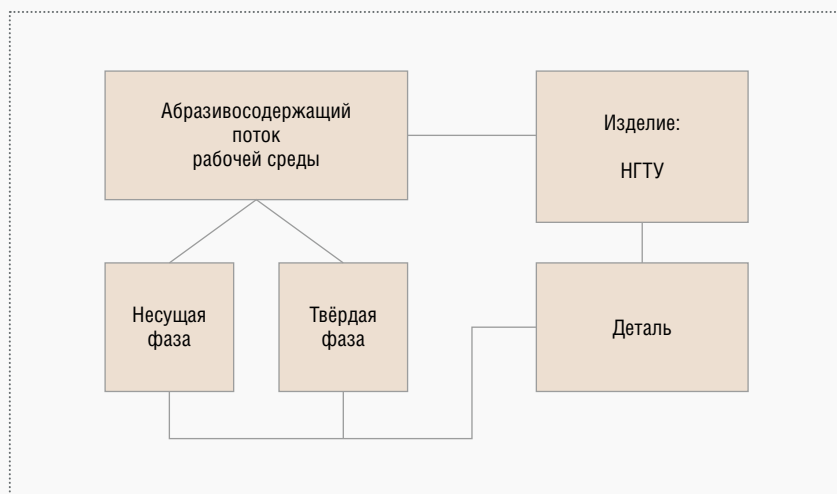


Рис. 3. Структурная схема системы абразивной эрозии НГТУ

ния, т. е. физическую интерпретацию понятия системы, при формировании которой первичным является признак целостности [8]. Первичность целостности в данном случае понимается в том аспекте, что только целое дает смысл каждому элементу («...только целое дает смысл каждому камню» [9]). Признак же целостности обусловлен наличием интегративного свойства, которое присуще системе в целом, но не может быть отнесено ни к одному из ее элементов в отдельности. Таковым как раз и является износ.

И тогда, исходя из условия целостности, и поскольку отказ, например, запорного устройства вследствие абразивной эрозии происходит в изделии, новая более полная система включает изделие в процессе функционирования (т. е. в процессе изменения геометрических характеристик проточной части изделия или составляющих ее деталей) и абразиво-содержащий поток рабочей среды (рис. 3). И каждый из этих элементов рассматривается с позиций развития интегративного свойства трибосистемы – износа, причем не в статике. В этом суть механизма обеспечения целостности системы как методологической специфики системного подхода. Новая система полностью отвечает всем необходимым требованиям: целостности и членимости, наличия связей, структуры и интегративного свойства.

Для изучения процесса функционирования данной системы использован логический эксперимент на геометрической модели, изоморфной объекту с точки зрения изучаемых при эксперименте свойств, например – на шибберном затворе запорного устройства. Определив свойства элементов «поток» и «изделие», которые при реализации связи между элементами трансформируются в функции, задача и логика такого эксперимента состоит в построении альтернативных причинно-следственных цепочек от возникновения до имеющегося внешнего вида отказавших по причине абразивной эрозии деталей затворов. В данном случае при восстановлении логической цепи событий, приводящих к функциональному отказу изделия, внешний вид повреждений отказавших деталей служит в качестве исходной информации (рис. 4).

В ходе логического эксперимента изучаются изменения свойств основных элементов системы на уровне связи «изделие – поток». Элемент «изделие» характеризуется свойством «конструкция». Такие свойства, как массогабаритные параметры, присоединительные размеры, тип управления и др. используются как ограничения на этапе реализации технических решений, полученных в результате данного эксперимента.

На этом же уровне системы из свойств элемента «абразиво-содер-

жащий поток рабочей среды» рассматривается скорость потока среды. Другие свойства потока (например, фазовый состав потока, концентрация и свойства абразивных частиц, химический состав вещества несущей фазы потока, давление, температура и др.) имеют значение на других уровнях связи элементов системы.

При реализации связей в системе рассматриваемые свойства определяют соответствующие функции элементов. Именно анализ функций элементов системы, предусмотренный методологией системного подхода, в данном случае оказывается наиболее конструктивным. Функция элемента «изделие» представляет собой принцип действия, который в запорных устройствах определяется как процесс перекрытия потока рабочей среды с заданной степенью герметичности. Степень же герметичности определяется соответствующим классом по ГОСТ Р 54808-2011 (или API 598), регламентирующим протечку среды через закрытый затвор. Выполнение запорным устройством своей функции определяется двумя фиксированными положениями запорного органа: «открыто» и «закрыто». При этом промежуточное фиксированное положение запорного органа при управлении устройством запрещается стандартными техническими требованиями на изделие.



Рис. 4. Внешний вид поверхностных разрушений отказавшей детали запорного устройства

Функция элемента «поток», следующая из свойства «скорость», состоит в агрессивном воздействии на изделие, причем только в смысле эрозионного воздействия абразиво-содержащего потока рабочей среды, поскольку скорость потока частиц является, как известно, определяющим фактором скорости абразивной эрозии.

Внешний вид эрозионных повреждений на запорных поверхностях деталей шибера затвора (см. **рис. 4**), приводящих к функциональному отказу задвижки, свидетельствует о функционировании абразиво-содержащего потока в положении затвора «закрыто». Эрозионные разрушения распространяются под контактными герметизирующими поверхностями затворов «шиберседло» и далее именно в положении затвора «закрыто». Логика причинно-следственной цепи такова: большие эрозионные повреждения → высокая скорость абразивной эрозии → высокая скорость потока → негерметичное перекрытие потока. Таким образом, негерметичное перекрытие потока обусловлено конструкцией изделия, а значит, рассматриваемыми функциями элементов системы. Дальнейшая логическая цепь событий представляется альтернативной.

Вариант 1. Не рассматривая случай нарушения технологической дисциплины при управлении запорным

устройством, популярнее – «человеческий фактор» (т. е. эксплуатацию в полуоткрытом положении затвора), возможно отсутствие фиксаторов конечных положений затвора или наличие рассогласования положений механизма привода с относительным положением деталей затвора. В этом случае выступающие в проходном отверстии в положении затвора «открыто» часть шибера разрушается в результате абразивной эрозии рабочим потоком, т. е. разрушается участок герметизирующей поверхности шибера с входной стороны устройства и участок герметизирующей поверхности седла с выходной стороны (**рис. 5**). И в положении затвора «закрыто» по этим участкам происходит протечка рабочей среды, т. е. негерметичность затвора.

Вариант 2. По причинам варианта 1 в положении затвора «закрыто» герметизирующие поверхности седел не симметричны герметизирующим поверхностям шибера (**рис. 6**). Как известно, шибера затвор обеспечивает герметичность в положении «закрыто» преимущественно за счет самоуплотнения (герметизирующее усилие или контактное давление обеспечивается перепадом давления рабочей среды на затворе). Несимметричность положения деталей затвора влечет за собой образование в положении «закрыто» герметизирующего участка, имеющего

ширину b_{min} , меньшую контактной ширины b , необходимой для герметизации. Такое явление также приводит к возникновению негерметичности затвора.

Реализация 1 или 2 варианта образования негерметичности зависит от режима эксплуатации запорного устройства – «нормально открыто» или «нормально закрыто».

Вариант 3. Принцип действия данного запорного устройства при перекрытии рабочего потока предусматривает постепенное перекрытие проходного отверстия в процессе поступательного перемещения подвижной детали запорного органа. Как раз эта функция, которую можно назвать блокированием потока, т. е. снижением расхода протекающего загрязненного потока до достижимого минимума, и является принципиальной с позиций возникновения и развития отказа. Ранее такая функция в известных трибосистемах, описывающих запорные трубопроводные устройства, не выявлялась. Герметизирующие поверхности шибера (с входной стороны) при реализации функции блокирования потока подвергаются кратковременному (т. е. в течение периода срабатывания затвора) воздействию рабочего потока. За несколько циклов срабатывания изделия повреждения этих участков герметизирующих поверхностей достигают таких значений, при кото-

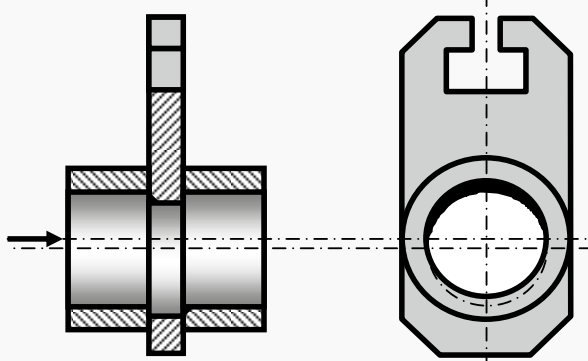


Рис. 5. Схема разрушения герметизирующих поверхностей деталей в полуоткрытом положении затвора

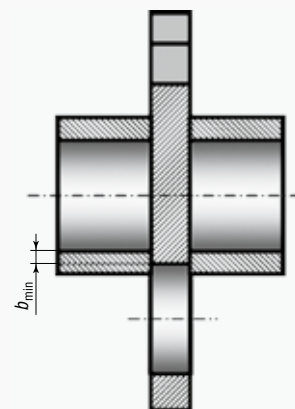


Рис. 6. Схема нарушения герметичности затвора вследствие недостаточной контактной ширины деталей

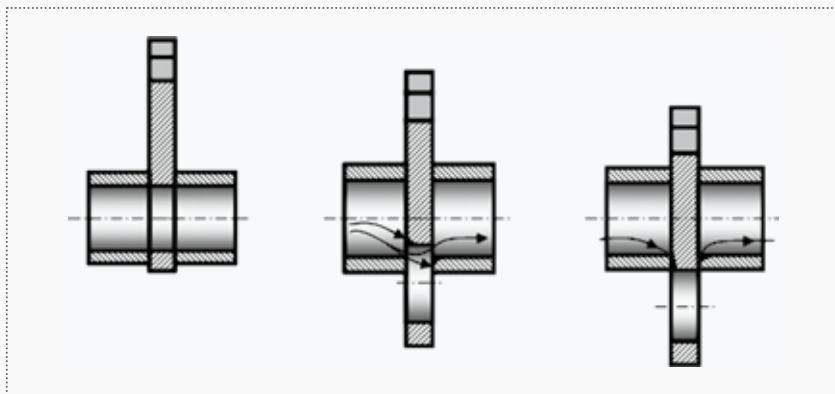


Рис. 7. Схема образования негерметичности шиберного затвора в течение циклов срабатывания

рых герметичность перекрытия нарушается (рис. 7).

Рассмотренные варианты являются достоверной причиной отмеченной негерметичности перекрытия рабочего потока. Поскольку проходное сечение негерметичного затвора в положении «закрыто», по которому происходит протечка среды, существенно мало по сравнению с сечением условного прохода, имеет место высокая скорость перетекания рабочей среды через затвор с входа на выход при существующем в трубопроводе перепаде давления рабочей среды. Поэтому наблюдаемые эрозионные разрушения (см. рис. 1а и 4) достигают величин, вызывающих функциональный отказ изделия, именно в положении затвора «закрыто». Следует отметить, что характер перекрытия потока шаровым краном практически не отличается от такового шиберной задвижкой.

В первых двух вариантах причина возникновения негерметичности затвора легко устранима. В третьем варианте необходимо целенаправленно воздействовать на свойства элементов системы конструктивными и другими методами (например, удалением мехпримесей из потока, что в рассматриваемых трубопроводах неосуществимо).

Декомпозиция рассматриваемой системы и анализ функций ее элементов позволяет определить конструктивный фактор воздействия на параметры изнашиваемого потоком изделия: *в конструкции должно быть предусмотрено, чтобы*

повреждаемые участки герметизирующих поверхностей деталей затвора не участвовали в его герметичном перекрытии. Экстраполяция данного положения на другие типы НГТУ загрязненных сред позволяет перейти к обобщенному **принципу разделения функций:**

в конструкции изделия детали или их поверхности, выполняющие основную или непосредственно связанную с ней функцию, не должны выполнять функции защиты от абразивной эрозии, которая должна быть возложена на другие поверхности или детали.

На основе данного принципа первые запатентованные технические решения модернизированного запорного узла фонтанной шиберной задвижки были предложены в виде разделения функций рабочих поверхностей шиберы [10] и в виде дополнительных деталей запорного узла в совокупности с разделением функций поверхностей [11].

При реализации полного разделения рабочих поверхностей шиберы (рис. 8) на блокирующую (защитную) и герметизирующую (функциональную) требовалось изготовление новой корпусной детали задвижки, что в условиях ремонтной базы Мосстрангаза было неосуществимым. Фактически удалось лишь изменить диаметр проходного отверстия шиберы и седла с 65 мм до 50 мм. При этом в пределах базовой корпусной детали рабочая часть шиберы несколько увеличилась и блокирующие поверхности были отделены от гер-

метизирующих известными из триботехники поперечными абразивоудаляющими канавками.

Опытный образец задвижки был испытан на скважине, получен интересный результат. По отзывам операторов, работающих с этой задвижкой, ее звук при работе отличался от обычной задвижки и отмечалось меньшее усилие на ручном приводе. Обследование разобранной задвижки показало локализацию эрозионного воздействия управляемого потока на блокирующих поверхностях и канавках (рис. 9). Отсюда были сделаны два полезных вывода:

- канавки не только счищают и удаляют абразивные загрязнения с контактных поверхностей, но и выполняют разгрузочную функцию при защемлении потока, т. е. изменяют газодинамическую ситуацию в окрестности изнашиваемых поверхностей;
- размер блокирующей поверхности в направлении рабочего хода шиберы может быть меньше требуемого размера двойного хода (см. рис. 8).

В результате после расчетов прочности, размерных цепей изделия и размеров разгрузочно-абразивоудаляющих канавок конструктивная схема модернизированного запорного узла (рис. 10) полностью вписалась в исходные габариты и прочие размеры задвижки. Результаты экс-

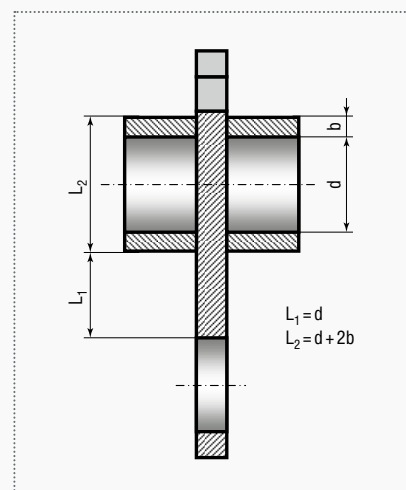


Рис. 8. Схема реализации полного разделения рабочих поверхностей шиберы

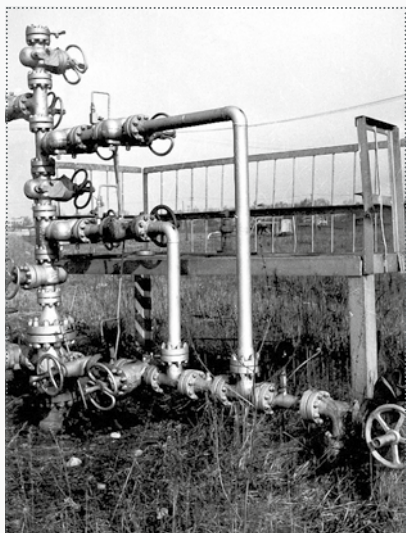


Рис. 9. Место эксплуатационных испытаний модернизированной фонтанной шиберной задвижки и характер влияния абразивоудаляющих канавок шибер

платационных испытаний модернизированных фонтанных задвижек заводского исполнения (совместного АО Алексинский завод «Тяжпромарматура», АО «Рыбинское конструкторское бюро моторостроения» и АО «Волжский машиностроительный завод»; ГПО «Воткинский завод»; ФГУП «Воронежский механический завод»; ОАО «Калужский турбинный завод») явились основанием рекомендации ПАО «Газпром» к использованию данного технического решения в продукции, поставляемой заводами на производственные объекты отрасли [12].

Даже в рассмотренном простейшем варианте реализации принципа разделения функций на шибере конструкция задвижки оказалась конкурентоспособнее предлагаемой в России американской задвижки с двойным седлом фирмы Foster [13].

Последующая модернизация задвижки в виде вышеупомянутого запатентованного технического решения [11] вследствие несколько более сложной реализации касалась

не только шибер, но и неподвижных седел изделия. До опытного образца модернизированного изделия данное техническое решение автором, естественно, доведено не было.

Суть изобретения сводилась к защите седел с применением дополнительных деталей. Ведь контактные кольцевые поверхности седел участвуют как в процессе блокирования потока, где в секторе защемления потока активно повреждаются, так и герметизации затвора (см. рис. 5). Поэтому согласно изложенному положению о разделении контактные поверхности поврежденных седел также не должны участвовать в выполнении функции герметизации, т. е. они должны быть удалены из зоны герметизации затвора. Поэтому шиберный затвор предложено

оснастить двумя дополнительными защитными шиберами, расположенными между неподвижными седлами и основным шибером и выполняющими функцию подвижных седел.

Порядок перемещения дополнительных деталей такого запорного узла сводится к следующему (рис. 11). На закрытие основной шибер с разгрузочно-абразивоудаляющими канавками при защищенных защитными шиберами седлах совершает рабочий ход до положения «закрыто» (положения 1–4), затем при перекрытом проходном отверстии поочередно в направлении рабочего хода основного шибер перемещаются защитные шиберы на расстояние, равное диаметру проходного отверстия плюс ширина контактного кольца неподвижного

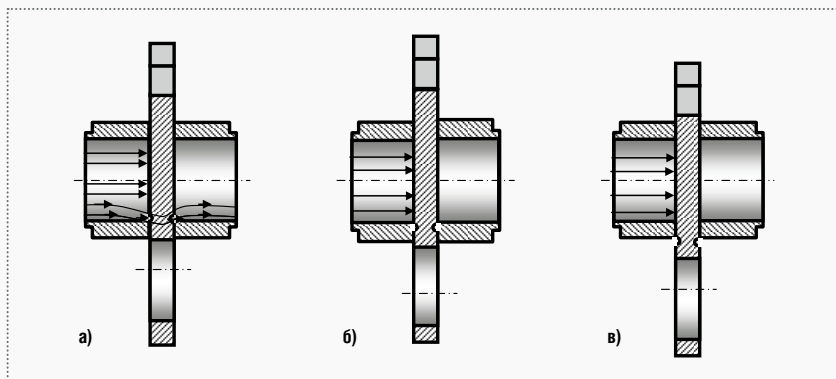


Рис. 10. Схема модернизированного шиберного затвора с разгрузочно-абразивоудаляющими канавками на этапах выполнения функции блокирования (а), ее завершения (б) и завершения выполнения функции герметизации (в)

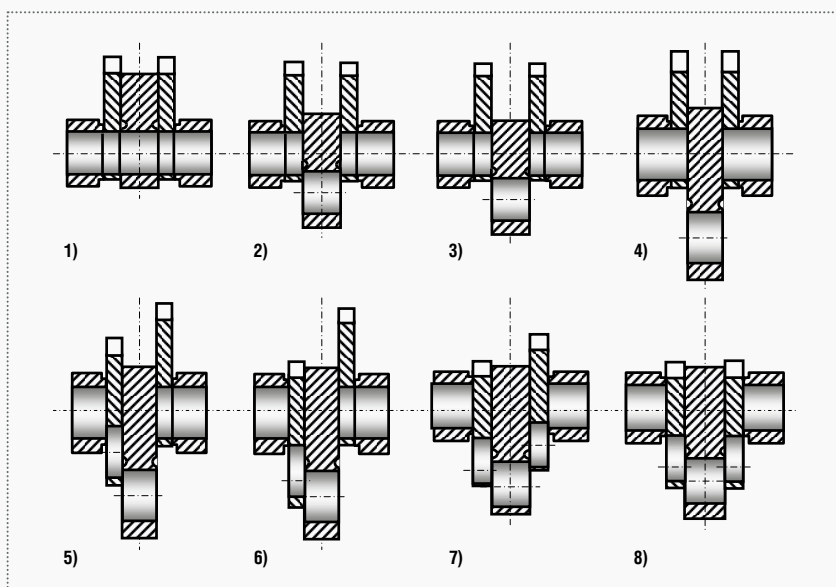


Рис. 11. Модернизированный шиберный затвор с дополнительными защитными шиберами

седла (положения 5–8). На открытие указанные детали запорного узла совершают перемещения в обратном порядке, т. е. поочередно – защитные шиберы при перекрытом проходном отверстии, затем – основной шибер осуществляет открытие проходного отверстия.

В результате поврежденные в процессе блокирования потока поверхности защитных шиберов, закрывающих неподвижные седла, удаляются из зоны герметизации, и в контакт с неповрежденным потоком поверхностями основного шибера и седел вступают неповрежденные потоком поверхности дополнительных шиберов. Таким образом осуществляется полная защита запорного узла шиберной задвижки от абразивной эрозии, поскольку движущийся поток абразивосодержащей рабочей среды в процессе перемещения основного и защитных шиберов не воздействует на герметизирующие поверхности седел. В процессе перемещения основного шибера движущийся поток воздействует на контактные поверхности защитных шиберов, а не на герметизирующие поверхности седел. При перемещении защитных шиберов поток остановлен и, следовательно, не агрессивен.

Конструкторская доработка данного технического решения требует решения интересной задачи проектирования механизма согласования движений шиберов в рассмотренной последовательности. И соответственно – проектирования нового корпуса задвижки, выполнения прочностных, точностных и прочих необходимых расчетов. В таком исполнении может быть получена реально долговечная износостойкая фонтанная шиберная задвижка.

Предложенное конструктивное разделение функциональных и защитных поверхностей и деталей затвора задвижки своей простотой и эффективностью реализации выгодно отличается от существующей реализации, за счёт технологических методов защитного поверхностного упрочнения или применения новых перспективных защитных материалов (например, технической керамики или композитов), и вместе с тем существенно повышает их эффективность (этот вопрос проработан, но выходит за рамки настоящей статьи).

Методологически разработанный принцип разделения функций в плане реализации представляется достаточно универсальным, поскольку явился основой изобре-

тения целого ряда долговечных НГТУ, даже с доказанной на практике эффективностью, но так и не получивших применения, которые могут оказаться полезными и в других отраслях промышленности (например, металлургии, горнодобывающей, химической и т. д.).

Актуализируемая Минпромторгом РФ проблема импортозамещения в отрасли нефтегазового машиностроения в аспекте рассмотренного в настоящей работе научного подхода в наибольшей степени соответствует полноценному толкованию термина «импортозамещение», т. е. реализации отечественных инноваций, а не только копирования зарубежных образцов трубопроводного оборудования с помощью иностранных станков и технологий.

Поскольку автор настоящей работы является всего лишь профессором, помимо учебной работы специализирующимся на прикладных науках и занимающимся по собственной инициативе изобретательством, без помощи специалистов и возможностей производственных предприятий довести изобретения до предпочитаемых сейчас готовых проектов и конкретных изделий и/или технологий НЕ МОЖЕТ!

☞ Список литературы

1. Материалы Международного Форума «Valve Industry Forum & Expo. Оборудование для критических условий эксплуатации». – Москва, ЦВК «Экспоцентр», 01–03 ноября 2016 г. – www.valve-forum.ru.
2. Справочник по триботехнике. Под общ. ред. Хебды М., Чичинадзе А.В. В 3 т. Т. 1. Теоретические основы. – М., «Машиностроение», Варшава ВКЛ, 1989, 400 с.
3. Балдаев Л.Г. Реновация и упрочнение деталей машин методами газотермического напыления. – М., Изд-во «КХТ», 2004, 134 с.
4. Каримов И. Оценку ставит эксперт: Анализ результатов диагностики нефтепромыслового оборудования на примере устьевого арматуры, отработавшей нормативный срок. // Арматуростроение, 2011, № 5, с. 83–85.
5. Садовский В.Н. Основания общей теории систем. – М., «Наука», 1974, 341 с.
6. Будински К. Дж. Испытания на износ. В сб.: Трибология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. Под ред. Белого В.А., Лудемы К., Мышкина Н.К. – М., «Машиностроение»; Нью-Йорк, «Аллerton пресс», 1993, с. 379–411.
7. Эрозия. Пер. с англ. Под ред. К. Прис. – М., «Мир», 1982, 464 с.
8. Николаев В.Н., Брук В.М. Системотехника: методы и приложения. – Л., «Машиностроение», Ленингр. отд-ние, 1985, 199 с.
9. Гессе Г. Игра в бисер. Пер. с нем. – М., Радуга, 1984, 594 с.
10. Пат. 2002151 Российская Федерация. Запорный узел.
11. Пат. 2463505 Российская Федерация. Запорный узел «ИГР».
12. Письмо ОАО «Газпром» главным конструкторам предприятий № 03/0800/2-648 от 09.02.2007 г.
13. Foster Valve Corporation. 6445 Burlington North, Texas 77092.48 p.



Russian Oil&Gas Industry Week

НАЦИОНАЛЬНЫЙ НЕФТЕГАЗОВЫЙ ФОРУМ

18–19 апреля 2017

Москва, ЦВК «Экспоцентр»

www.oilandgasforum.ru

17-я международная выставка

НЕФТЕГАЗ–2017



17–20 апреля 2017

Москва, ЦВК «Экспоцентр»

www.neftegaz-expo.ru

12+

Реклама

