

ment // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki - razvitiyu regionov Sibiri. Yubil. vyp. k 55-letiyu BrGU. Bratsk, 2012. P. 35-48.

14. Rykov S.P. Inelastic resistance in pneumatic tires. Modeling, evaluation, application. Modelirovanie, otsenka, prilozheniya: monogr. Bratsk: Izd-vo BrGU, 2015. 444 p.

УДК 66.025-987

DOI: 10.18324/2077-5415-2016-4-51-56

Расчетное и экспериментальное исследование линейно-упругого деформирования деталей бугельных разъемных соединений

В.В. Трутаева^a, В.К. Погодин^b, С.Ю. Трутаев^c

АО «ИркутскНИИХиммаш», ул. Академика Курчатова 3, Иркутск, Россия

^astanis79@mail.ru, ^bv.pogodin@himmash.irk.ru, ^cstas@himmash.irk.ru

Статья поступила 18.10.2016, принята 11.11.2016

Рассмотрены результаты расчетного и экспериментального исследований механизмов линейно-упругого деформирования деталей бугельных разъемных соединений. Установлено, что существующие аналитические методологические подходы к исследованию напряженно-деформированного состояния бугельных разъемных соединений не позволяют учитывать пространственный характер линейно-упругого деформирования деталей, а также многие эффекты работы бугельных разъемных соединений, например, такие как неравномерность распределения контактных давлений по ширине контакта, влияние трения на уплотнительных поверхностях и т. д. На примере расчетных исследований бугельного разъемного соединения Dy120 Py32МПа, установленного на химическом заводе АО «Ангарская нефтехимическая компания», показана целесообразность применения современных численных методов исследования напряженно-деформированного состояния, например метода конечных элементов. С использованием метода конечных элементов изучен механизм контактного взаимодействия деталей бугельного разъемного соединения на всех стадиях нагружения. Приведенные численные результаты подтверждены экспериментальными исследованиями опытного бугельного разъемного соединения, выполненными на стенде высокого давления АО «ИркутскНИИХиммаш». На основе полученных результатов предложены рекомендации по изменению конструкции бугельного разъемного соединения путем введения в классическую конструкцию дополнительного ограничительного кольца, наличие которого позволяет ограничить деформации уплотнительного кольца в радиальном направлении и обеспечить более оптимальные условия контактного взаимодействия деталей бугельного разъемного соединения при действии рабочего давления.

Ключевые слова: метод конечных элементов; напряженно-деформированное состояние; герметичность; бугельные разъемные соединения; контактное взаимодействие.

Calculating and experimental research of linear elastic straining of hub split joints details

V.V. Trutaeva^a, V.K. Pogodin^b, S.Y. Trutaev^c

JSC «IrkutskNIHimmash»; 3 Akademik Kurchtov St., Irkutsk, Russia

^astanis79@mail.ru, ^bv.pogodin@himmash.irk.ru, ^cstas@himmash.irk.ru

Received 18.10.2016, accepted 11.11.2016

The article deals with the results of calculating and experimental research of linear elastic straining mechanisms of hub split joints details. It was determined that current analytical and methodological approaches to hub split joints' stress-strain state examination do not allow to take into consideration the spatial nature of linear elastic straining of the details, and moreover, a lot of hub split joints operational effects like unevenness of contact pressure distribution across the contacting width, the friction influence on sealing surface etc. By the example of calculating research of Dy120 Py32MPa hub split joint installed at the chemical plant of JSC "Angarsk petrochemical company" the authors show the expediency of applying modern numerical methods for stress-strain state examination, for example finite-element method. This method helped to investigate the mechanism of contact interaction of hub split joints details at all of the loading stages. The results of the performed numerical research were confirmed by the results of experimental research of test hub split joint that was conducted on the high pressure stand of JSC "IrkutskNIHimmash". On the basis of these results the recommendations for changing the design of hub split joint were offered. A new model implies adding an extra distance ring to a classical model that allows to limit the straining of sealing ring in the radial direction and provides more optimal conditions of contact interaction of hub split joint details when under the operating pressure.

Key words: finite-element method; stress-strain state; impermeability; hub split joints; contact interaction.

Введение

В настоящее время многие промышленные предприятия химической, нефтехимической, нефтяной и

газовой промышленности идут по пути внедрения на действующих производствах более совершенных, надежных и технологичных конструкций разъемных со-

единений взамен морально устаревших. В частности, это касается замены фланцевых разъемных соединений оборудования высокого давления на более совершенные бугельные разъемные соединения (БРС).

О преимуществах и области применения БРС. Типовое БРС (рис. 1) включает в себя уплотнительное кольцо 1 и непосредственно сам бугель 2, размещаемый на концевых частях 3 сопрягаемых деталей оборудования и стягиваемый посредством шпилек или болтов 4. Существуют и другие варианты исполнения БРС, отличающиеся количеством секторов бугеля, типом и материалом уплотнительных колец, формой уплотнительных поверхностей, наличием дополнительных элементов соединения и т. д.

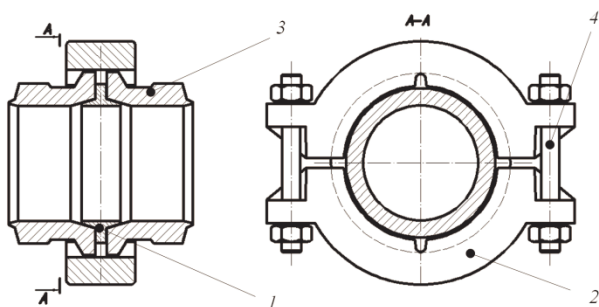


Рис. 1. Типовое бугельное разъемное соединение: 1 — уплотнительное кольцо; 2 — сектор бугеля; 3 — концевые части труб; 4 — крепежные детали

Основным преимуществом БРС перед фланцевыми разъемными соединениями является в разы меньшая металлоемкость. Так, например, для трубопровода диаметром 50 мм при рабочем давлении 35 МПа металлоемкость БРС приблизительно в 7 раз меньше стандартного фланцевого соединения [1].

Особенно оправданно применение БРС в условиях частых изменений температур, интенсивных динамических нагрузок, а также в случаях, когда требуется частая сборка (разборка) разъемных соединений или затруднен их монтаж. Это обусловлено прежде всего компактностью конструктивного исполнения БРС и простотой их монтажа, в том числе с использованием мобильных гайковертов [1]. Как правило, БРС применяются в соединениях деталей трубопроводов, деталей трубопроводов с трубопроводной арматурой, а также деталей трубопроводной арматуры между собой [2].

О недостатках существующих подходов и преимуществах метода конечных элементов при проектировании БРС. В зарубежной практике широкому распространению и внедрению БРС в различных отраслях промышленности, в т. ч. в химической и нефтегазовой отраслях, способствовали разработки специализированных компаний, таких как Grayloc Products, Ruston and Hornsby Ltd, Toa Valve Engineering Inc., Galperti Engineering, Vector International Limited, EATON Aerospace Group и др.

В России разработка и внедрение в промышленность бугельных разъемных соединений сильно ограничены прежде всего практически полным отсутствием нормативной базы, регламентирующей методические подходы к конструированию и расчету БРС. Наиболь-

шие успехи на данном направлении достигнуты отраслевым институтом химического и нефтяного машиностроения (АО «ИркутскНИИХиммаш») [1–4]. В последние десятилетия институтом разработано и внедрено в промышленность порядка 10 новых конструкций БРС, а также методик по их расчету и конструированию, в т. ч. принятых на национальном уровне [5; 6]. Указанные методические материалы основаны как на применении упрощенных аналитических подходов [2; 4; 7], так и на использовании современных численных методов, таких как метод конечных элементов [8–10].

По сравнению с классическими подходами к проектированию и расчету БРС [4; 11–14], преимуществом применения метода конечных элементов к исследованию работы БРС является возможность учета пространственного характера линейно-упругого деформирования его деталей, в том числе с учетом их контактного взаимодействия. Это позволяет получить корректную картину напряженно-деформированного состояния деталей, в том числе учесть такие особенности работы БРС, как неравномерность распределения контактных давлений по ширине контакта, влияние трения на уплотнительных поверхностях и т. д.

Результаты исследования механизмов линейно-упругого деформирования деталей БРС. Ниже продемонстрированы некоторые результаты исследования механизмов линейно-упругого деформирования деталей БРС Ду120 Ру32МПа с применением метода конечных элементов. Поверочные расчеты указанного БРС, спроектированного и изготовленного АО «ИркутскНИИХиммаш» [7] для замены фланцевых разъемных соединений технологических трубопроводов Ду120 Ру32МПа химического завода АО «Ангарская нефтехимическая компания» («АНХК») (рис. 2), выполнены с применением методических подходов [8].



Рис. 2. Бугельное разъемное соединение на параметры Ду120 Ру32 МПа, смонтированное на химическом заводе АО «АНХК»

Расчетное исследование линейно-упругого деформирования деталей рассматриваемого БРС выполнялось в объемной постановке с применением иерархии изопараметрических объемных конечных элементов [15; 16], реализованных в программной системе COMPASS (*COMPUter-aided Analysis and Synthesis of bearing Structures*) [17; 18]. Так, на рис. 3 а показаны поля эквивалентных напряжений, возникающих в секторе бугеля на стадии нагружения БРС рабочим давлением 32 МПа. Анализ представленных результатов показал, что максимальные напряжения на щеках сектора бугеля присутствуют в месте расположения U-образной выемки и составляют ≈ 120 МПа при затяжке и ≈ 200 МПа при рабочем давлении.

Для подтверждения возможности применения для решения рассматриваемых задач методических подходов [8], а также предложенной в [15; 16] иерархии изо-

параметрических объемных конечных элементов результаты поверочных расчетов сравнивались с результатами натурной тензометрии БРС Ду120 Ру32МПа. Схема размещения тензорезисторов на секторе бугеля во время испытаний БРС на рабочее давление 32 МПа показана на рис. 3 б. Сравнение результатов поверочных расчетов для указанной детали БРС с данными тензометрии представлено на рис. 3 в.

Как видно на графике, результаты проведенных расчетов хорошо коррелируют с результатами экспериментальных исследований. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превысило 5 %. Это свидетельствует о том, что используемые в [8] подходы и математические модели БРС позволяют достаточно точно моделировать фактическое напряженно-деформируемое состояние БРС на различных стадиях нагружения.

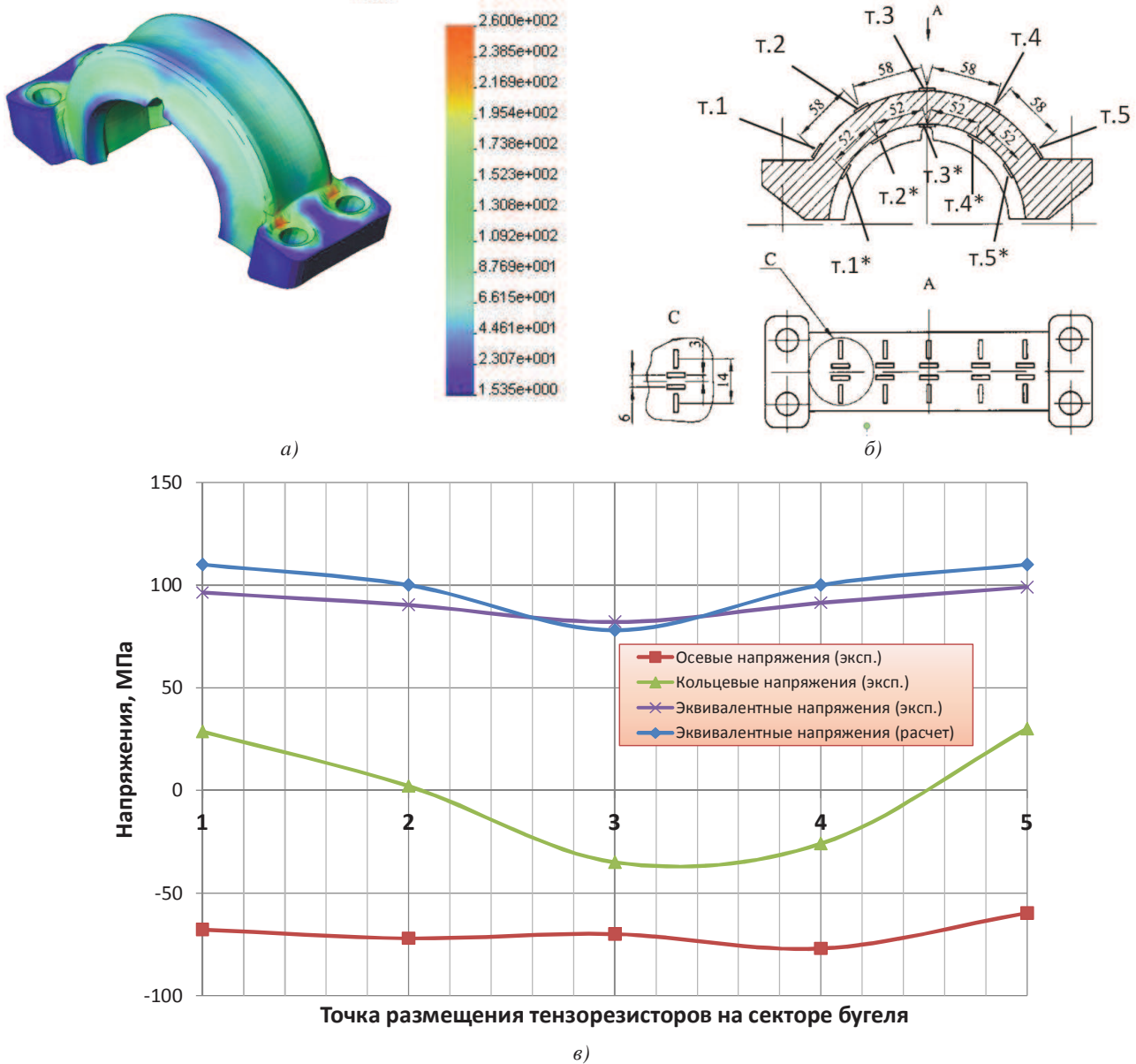


Рис. 3. Сравнение результатов численного моделирования и эксперимента: а — поля распределения эквивалентных напряжений в секторе бугеля при действии рабочего давления; б — схема размещения тензорезисторов на секторе бугеля; в — результаты обработки данных тензометрии и сравнение с результатами расчета

Результаты исследования механизмов контактного взаимодействия деталей БРС. При расчетных исследованиях контактного взаимодействия деталей БРС применялся специальный контактный элемент, реализованный в программе COMPASS, который позволяет рассматривать контактное взаимодействие деталей БРС как задачу о контакте упругих тел с дискретными односторонними связями. Как показано в работах [19–21], применение специфических контактных конечных элементов на участках предполагаемого контактного взаимодействия деталей позволяет учесть множество различных эффектов и в значительной степени приблизить решение задачи к поведению реального объекта, например, за счет учета шероховатостей

в зоне контакта, проскальзываний, нелинейного характера деформирования и т. д.

С использованием указанного инструментария в рамках проведенного расчетного исследования был исследован механизм контактного взаимодействия всех деталей БРС, в т. ч. наиболее важного узла, отвечающего за герметичность всего соединения — зоны взаимодействия концевых частей соединяемых деталей и уплотнительного кольца БРС при отсутствии радиального упора. На рис. 4 продемонстрировано распределение контактных давлений в указанной зоне на различных стадиях нагружения БРС, при затяжке шпилек во время сборки и при действии рабочего давления.

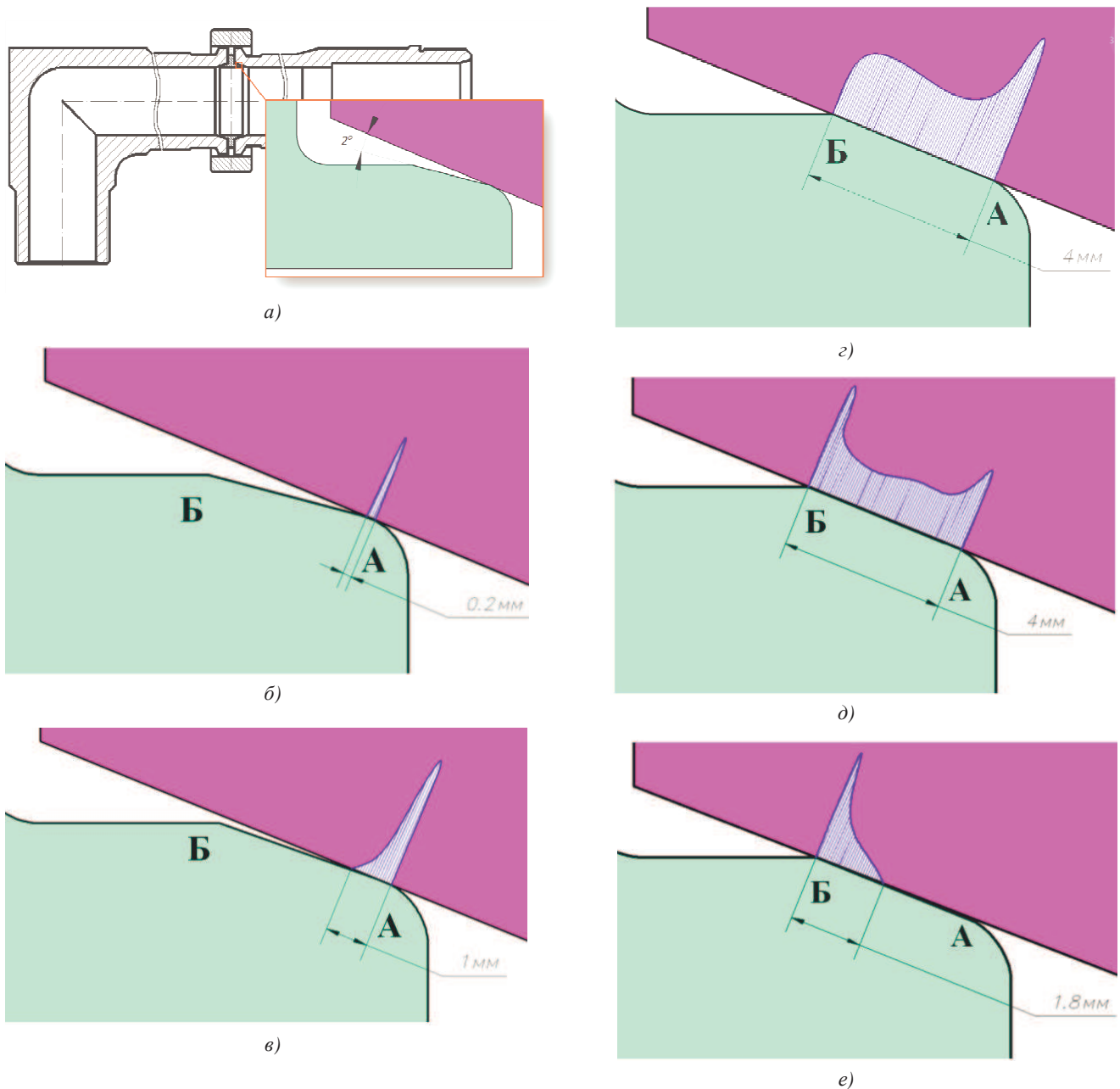


Рис. 4. Исследование механизма контактного взаимодействия деталей БРС: *a* — схема рассматриваемого узла БРС; *б* — эпюра контактного давления при затяжке шпилек; *в* — эпюра контактного давления при давлении 25 % от рабочего; *г* — эпюра контактного давления при рабочем давлении; *д* — эпюра контактного давления, характеризующая явление «перекатывания» контакта; *е* — эпюра контактного давления при потере контакта в первоначальной точке контакта (т. А)

На этапе затяжки шпилек БРС (усилие затяжки каждой из 4-х шпилек — 3 200 кгс) ширина контакта уплотнительного кольца и концевой части трубы пренебрежительно мала и составляет $\approx 0,2$ мм (рис. 4 б), при этом величина контактного давления в т. А составляет ≈ 240 МПа. На второй стадии нагружения, по мере роста давления уплотнительное кольцо упруго деформируется в направлении конусной поверхности ответной детали, вследствие чего ширина контакта увеличивается и составляет, например, при давлении, равном 25 % от рабочего, ≈ 1 мм (рис. 4 в). Наконец, при достижении рабочего давления в трубопроводе за счет упругой деформации уплотнительного кольца ширина контакта достигает максимальной величины, равной ширине уплотнительной поверхности кольца (4 мм). При этом контактное давление перераспределяется, как показано на рис. 4 г, и достигает максимума (≈ 360 МПа) в первоначальной точке (т. А) контакта.

С инженерной точки зрения, интерес представляет рассмотрение расчетного случая, приводящего к так называемому «перекачиванию» контакта. В рассматриваемой ситуации указанное явление может иметь место при дальнейшем повышении давления, например, до уровня пробного давления $P_{пр} = 1.5 P_{р}$. В этом случае будет иметь место перераспределение контактного давления по ширине контакта, показанное на рис. 4 д. Как видно на этом рисунке, контактное давление в первоначальной точке контакта (т. А) уменьшается и одновременно с этим возрастает в т. Б, что свидетельствует о «перекачивании» контакта между этими точками. В предельном случае, который может возникнуть, например, при более высокой податливости уплотнительного кольца, контактное давление в т. А будет стремиться к нулю, что при дальнейшем повышении внутреннего давления приведет к потере контакта в этой точке (рис. 4 е).

Для подтверждения справедливости и соответствия полученного (рис. 4) расчетным путем механизма контактного взаимодействия деталей БРС реальным условиям его эксплуатации были проведены дополнительные экспериментальные исследования в части изучения состояния деталей БРС после испытаний на стенде высокого давления АО «ИркутскНИИХиммаш». Так, на рис. 5 показано состояние металла на уплотнительной поверхности концевой части трубы после испытания БРС на рабочее и пробное давления.



Рис. 5. След от контакта с уплотнительным кольцом на металле концевой части трубы БРС

Как видно на рисунке, на конусной части детали, в зоне контактного взаимодействия с уплотнительным кольцом остался характерный след, ширина которого однозначно свидетельствует о контактировании дета-

лей при рабочих условиях по схеме, представленной на рис. 4 г, т. е. с шириной контакта 4 мм и неравномерным распределением контактных давлений по ширине контакта. Помимо этого обнаружены характерные следы скольжения в зоне контакта в осевом направлении, что свидетельствует о наличии перемещений губок уплотнительного кольца относительно уплотнительных поверхностей соединяемых деталей при «перекачивании» контакта (рис. 4 д) вследствие значительной податливости уплотнительного кольца в радиальном направлении.

С учетом полученных результатов расчетных и экспериментальных исследований установлена необходимость ограничения осевых деформаций деталей БРС и, соответственно, смещений уплотнительных поверхностей в зоне контакта. В этой связи рекомендовано внести изменения в конструкцию БРС и предусмотреть ограничение радиальных деформаций уплотнительного кольца за счет введения в конструкцию дополнительного ограничительного кольца (рис. 6). Ограничительное кольцо по отношению к уплотнительному кольцу устанавливается с зазором Δ , величина которого устанавливается расчетным путем и не превышает величину требуемой радиальной деформации уплотнительного кольца при действии рабочего давления.

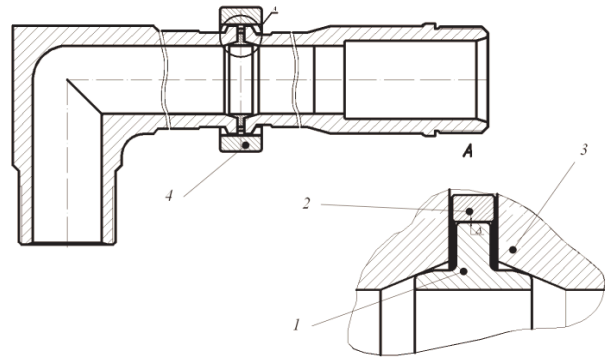


Рис. 6. Рекомендованная конструкция БРС: 1 — уплотнительное кольцо; 2 — ограничительное кольцо; 3 — концевые части труб; 4 — сектор бугеля

Выводы

На основе результатов проведенных исследований установлено, что существующие аналитические методологические подходы к исследованию напряженно-деформированного состояния БРС не позволяют учитывать пространственный характер линейно-упругого деформирования его деталей, а также многие эффекты работы БРС, например, такие как неравномерность распределения контактных давлений по ширине контакта, влияние трения на уплотнительных поверхностях и т. д. С учетом этого целесообразным является применение современных численных методов исследования напряженно-деформированного состояния, например метода конечных элементов. Так, проведенные расчетные исследования БРС $Dy120 P_{р}32MPa$, установленного на химическом заводе АО «АНХК», позволили изучить механизм контактного взаимодействия деталей соединения на всех стадиях нагружения, а результаты экспериментальных исследований указанного БРС, выполненных на стенде высокого давления АО «ИркутскНИИХиммаш», подтвердили корректность принятых подходов к математическому моделирова-

нию деталей БРС и условий их контактного взаимодействия. Результаты проведенных исследований позволили рекомендовать более совершенную конструкцию БРС на основе введения в классическую конструкцию дополнительного ограничительного кольца, наличие которого позволяет ограничить деформации уплотнительного кольца в радиальном направлении и обеспечить более оптимальные условия контактного взаимодействия деталей БРС при действии рабочего давления.

Литература

1. Погодин В.К., Разъемные соединения и герметизация в оборудовании высокого давления. Иркутск: НИИХиммаш, 2001. 405 с.
2. Погодин В.К. Разъемные соединения. Технология применения в оборудовании под избыточным давлением. В 2 т. Т. 1. Проектирование. Братск: Изд-во БрГУ, 2013. 366 с.
3. Погодин В.К., Махонькин Б.Н., Актуганов А.Н. Концепция обеспечения герметичности разъемных соединений оборудования высокого давления // Химическая техника. 2010. № 2. С. 15-17.
4. Погодин В.К., Верхозин Н.А., Кузнецов К.А. Разработка новых бугельных разъемных соединений взамен фланцевых // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 4. С. 140-147.
5. ГОСТ Р 55429 - 2013. Соединения бугельные разъемные. Конструкция, размеры и общие технические требования. Введ. 2013-12-01 / ВНИИММШ; НП СЦ НАСТХОЛ; ОАО «ИркутскНИИХиммаш. М.: Стандартиформ, 2013. 30 с.
6. ГОСТ Р 55430-2013. Соединения трубопроводов разъемные. Оценка технического состояния и методы испытаний. Безопасность эксплуатации. Введ. 2013-12-01 / ВНИИММШ; НП СЦ НАСТХОЛ. М.: Стандартиформ, 2013. 42 с.
7. Погодин В.К. О применимости бугельных соединений в оборудовании высокого давления // Химическая промышленность сегодня. 2009. № 8. С. 37-42.
8. Трутаева В.В. Методика оптимального проектирования деталей бугельных разъемных соединений высокого давления // Системы.Методы.Технологии. 2015. № 1 (25). С. 38-42.
9. Трутаева В.В., Трутаев С.Ю., Погодин В.К. Разработка методов оптимального проектирования разъемных соединений высокого давления // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2015. № 9. С. 22-25.
10. Trutaeva V.V., Pogodin V.K., Trutaev S.Y. Development of Methods of Optimal Design of High - Pressure Releasable Connections // Chemical and Petroleum Engineering. 2016. Vol. 51, № 9. P. 609-612.
11. Продан В.Д., Божко Г.В., Погодин В.К. Конструирование бугельного герметичного соединения // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2009. № 11. С. 23-26.
11. Продан В.Д. Герметичность разъемных неподвижных соединений машин и аппаратов химических производств. М.: МИХМ, 1984. 71 с.
12. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division I "Rules for Construction of. Pressure Vessels". 2007. 775 p.
13. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division II "Alternative Rules for Pressure Vessels". 2007. 978 p.
14. Преженцева В.В. Иерархия объемных конечных элементов с переменным числом узлов на ребрах // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2004. Т. 20, № 4. С. 179-180.
15. Преженцева В.В., Безделев В.В. Иерархия двумерных и трехмерных конечных элементов с переменным числом узлов в программной системе COMPASS // Вестн. ИГАСУ. 2005. Т. 8, № 2. С. 71-78.
16. Трутаева В.В., Погодин В.К., Безделев В.В. Применение программной системы COMPASS для расчета машиностроительных деталей и конструкций // Материалы III международной конференции «Проблемы механики современных машин». Улан-Удэ, 2006. Т. 3. С. 82-86.

17. Безделев В.В. Буклемишев А.В. Программная система COMPASS. Руководство пользователя. Иркутск: Иркут. гос. техн. ун-т, 2000. 120 с.

18. Лукашевич А.А. Решение контактных задач для упругих систем с односторонними связями методом пошагового анализа: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2011. 283 с.

19. Лукашевич А.А., Розин Л.А. О решении контактных задач строительной механики с односторонними связями и трением методом пошагового анализа // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 1 (36). С.75-81.

20. Пыхалов А.А., Милов А.Е. Контактная задача статического и динамического анализа сборных роторов турбомашин. Иркутск: ИрГТУ, 2007. 192 с.

References

1. Pogodin V.K. Split joints and sealing in high pressure equipment. Irkutsk: NIikhimmash, 2001. 405 p.
2. Pogodin V.K. Split joints. Application technology for over-pressure equipment. In 2 Vol. Vol.1. Engineering. Bratsk: Izd-vo BrGU, 2013. 366 p.
3. Pogodin V.K., Makhon'kin B.N., Aktuganov A.N. The concept of providing impermeability of high pressure equipment split joints // Khimicheskaya tekhnika. 2010. № 2. P. 15-17.
4. Pogodin V.K., Verkhosin N.A., Kuznetsov K.A. Development of new hub split joints instead of flanged joints // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2011. № 4. P. 140-147.
5. GOST R 55429 - 2013. Hub split joints. Design, sizes and general technical requirements. Vved. 2013-12-01 / VNIINMASH; NP STs NASTKhOL; ОАО «IrkutskNIikhimmash. M.: Standartinform, 2013. 30 p.
6. GOST R 55430-2013. Pipeline split joints. Technical state evaluation and testing methods. Operation safety. Vved. 2013-12-01 / VNIINMASH; NP STs NASTKhOL. M.: Standartinform, 2013. 42 p.
7. Pogodin V.K. About adaptability of hub joints in high pressure equipment // Chemical Industry Today. 2009. № 8. P. 37-42.
8. Trutaeva V.V. Optimal design methods of high pressure hub split joints details // Systems. Methods. Technologies. 2015. № 1 (25). P. 38-42.
9. Trutaeva V.V., Trutaev S.Yu., Pogodin V.K. Development of optimal design methods of high pressure split joints // Chemical and Petroleum Engineering. 2015. № 9. P. 22-25.
10. Trutaeva V.V., Pogodin V.K., Trutaev S.Y. Development of Methods of Optimal Design of High-Pressure Releasable Connections // Chemical and Petroleum Engineering. 2016. Vol. 51, № 9. P. 609-612.
11. Prodan V.D., Bozhko G.V., Pogodin V.K. Designing of bow tight joint // Chemical and Petroleum Engineering. 2009. № 11. P. 23-26.
12. Prodan V.D. Impermeability of fixed split joints of chemical plants machines and apparatuses. M.: MIKhM, 1984. 71 p.
13. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division I "Rules for Construction of. Pressure Vessels". 2007. 775 p.
14. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division II "Alternative Rules for Pressure Vessels". 2007. 978 p.
15. Prezhentseva V.V. The hierarchy of three-dimensional finite elements with variable number of nodes on the edges // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2004. Т. 20, № 4. P. 179-180.
16. Prezhentseva V.V., Bezdelev V.V. The hierarchy of two-dimensional and three-dimensional finite elements with variable number of nodes in the COMPASS program system // Vestn. NGASU. 2005. Т. 8, № 2. P. 71-78.
17. Trutaeva V.V., Pogodin V.K., Bezdelev V.V. Application of the COMPASS program system for calculation of machine parts and structures // Materialy III mezhdunarodnoi konferentsii «Problemy mekhaniki sovremennykh mashin». Ulan-Ude, 2006. Т. 3. P. 8-86.
18. Bezdelev V.V., Buklemishev A.V. The COMPASS program system. Rukovodstvo pol'zovatelya. Irkutsk: Irkut. gos. tekhn. un-t, 2000. 120 p.