

**В. Н. Сызранцев, д.т.н., проф. ТюмГНГУ; А. В. Белобородов, НИИ ПНО;  
К. В. Сызранцева, к.т.н., доц. ТюмГНГУ**

## **СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ДИАГНОСТИКИ УСТАЛОСТИ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ**

На сегодняшний момент промышленные предприятия, производящие продукцию для нефтегазовой отрасли, находятся в условиях, когда им приходится осваивать производство новых образцов продукции, способных конкурировать по техническим характеристикам с зарубежными аналогами. Это как нельзя более относится к предприятиям-производителям арматуры. В связи с чем, большую важность приобретают исследования, направленные на поиск путей, ведущих к сокращению времени подготовки производства без снижения качества продукции.

Экспериментальные исследования, связанные с доработкой изделий, отличаются высокой продолжительностью и трудоемкостью. Реализация их в полном объеме часто растягивается на годы, что в условиях лимита времени, отводимого на запуск продукции в производство, может отрицательно сказаться на функционировании предприятий. Однако, необдуманное сокращение объема экспериментальных исследований зачастую приводит к выпуску продукции, не удовлетворяющей заложенным на этапе конструирования характеристикам. В связи с возрастающими требованиями к сроку службы оборудования нефтегазовой отрасли все более важной характеристикой изделия, определяющей поведение в процессе эксплуатации, становится его прочностная надежность. Под прочностной надежностью обычно подразумевают отсутствие отказов, связанных с разрушением или с недопустимыми деформациями, или, в общем случае, с наступлением предельного состояния по одному из критериев работоспособности. Наиболее распространенной величиной оценки прочностной надежности является запас прочности, который вводится для того, чтобы обеспечить безопасную, надежную работу изделия и отдельных его частей, несмотря на возможные неблагоприятные отклонения действительных условий их работы от расчетных.

При определении запаса прочности изделия, а, следовательно, и при оценке его прочностной надежности, неизбежным является этап оценки напряженно-деформированного состояния (НДС), в ходе которого происходит выявление мест опасной концентрации напряжений и возникновения недопустимых деформаций. Для исследования НДС деталей трубопроводной арматуры в расчетной практике используются методы сопротивления материалов. Однако данные методы не позволяют рассчитывать величину местных напряжений (деформаций) вблизи зон приложения нагрузок или зон со сложной геометрией, в то время как именно эти зоны в подавляющем большинстве случаев, являясь концентраторами напряжений, определяют прочностную надежность конструкций [1]. В рамках вышеуказанной теории также не существует метода исследования напряжений в местах резкого изменения поперечного сечения деталей, в которых вследствие высокой концентрации напряжений возникают усталостные

трещины, являющиеся причиной выхода изделий из строя в процессе эксплуатации.

Вместе с тем, повысить точность расчетов на этапе определения НДС изделия можно путем внедрения в практику расчетов численных методов теории упругости, в частности методов конечных и граничных элементов [2]. Метод конечных элементов (МКЭ), как и другие численные методы, позволяет проводить расчет НДС для изделий с практически любой геометрической формой и способами нагружения, получить закон изменения НДС под воздействием меняющейся во времени нагрузки, учитывать различные геометрические (контактные взаимодействия, большие деформации) и физические (свойства материала) нелинейности [2, 3, 4, 5]. Повышение точности расчетов влечет за собой возможность создания оптимальной по своим прочностным характеристикам конструкции.

Метод конечных элементов, реализованный в различном программном обеспечении, уже достаточно продолжительное время используется для проведения расчетов напряженно-деформированного состояния и расчетного обоснования прочностной надежности оборудования и трубопроводов, используемых в атомной энергетике. В связи с потребностями развития и совершенствования оборудования объем использования данного программного обеспечения метода постоянно возрастает [6]. Вместе с тем, подобное программное обеспечение практически не используется в нефтегазовой отрасли, несмотря на существующую потребность в точной оценке надежности вновь создаваемого оборудования и остаточного ресурса эксплуатируемого. Это связано в первую очередь с отсутствием методических разработок в данном направлении, регламентирующих границы и способы применения данного программного обеспечения.

В настоящее время на кафедре «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности» Тюменского государственного нефтегазового университета развивается направление, связанное с разработкой методологии использования метода конечных элементов в процессе оценки прочностной надежности трубопроводной арматуры на этапе создания конструкторской документации. Для проведения расчетов используется универсальный программный комплекс ANSYS, позволяющий выполнять расчеты конструкций практически любой сложности (Рис. 1 и 2). На основании исследований, проведенных специалистами кафедры, разработаны расчетные схемы, позволяющие оценить прочностную надежность деталей арматуры в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации [7]. В данное время проводятся исследования, направленные на изучение влияния дополнительных нагрузок, к которым относят монтажные нагрузки, температурные деформации, гидравлический



*Д.т.н., профессор,  
заслуженный деятель науки РФ  
В. Н. Сызранцев*

Рис. 1. Конечноэлементная модель клиновой задвижки DN 300, PN 40 (ОАО «Икар»)

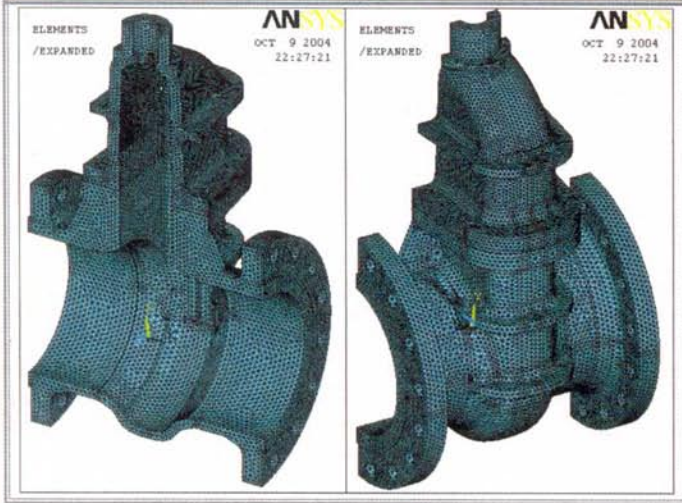
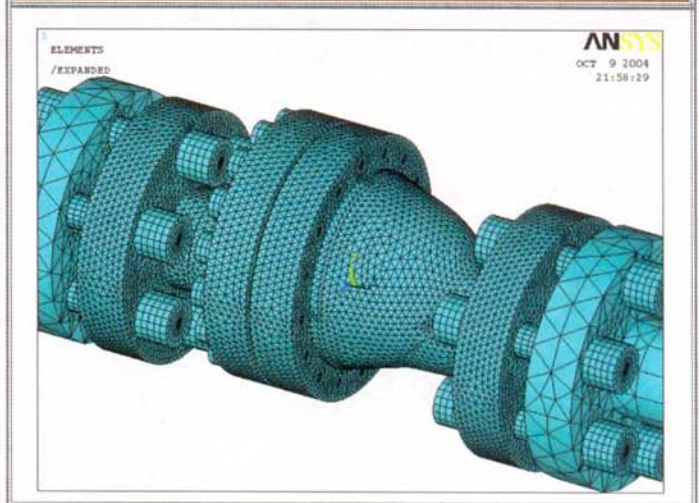


Рис. 2. Конечноэлементная модель обратного затвора DN 50, PN 320 (ОАО «Икар»)



удар и другие, не учитывающиеся при расчетах по существующим методикам [1], на НДС деталей, а, следовательно, прочностную надежность арматуры в целом [8].

Таким образом, на текущий момент специалистами кафедры отработаны методики расчета как отдельных деталей трубопроводной арматуры (Рис. 3), так и изделий в целом с учетом взаимного влияния деталей изделия друг на друга (Рис. 4). Помимо этого, существующие методики позволяют выполнять расчеты с учетом монтажных нагрузок (усилия, возникающие при затяжке крепежных деталей, несоосности магистральных фланцев и др.) и учитывать влияние гидравлических ударов (Рис. 5). Результаты выполненных на основании перечисленных методик расчетов являются основой для проведения оптимизации конструкций арматуры, направленной на повышение прочностной надежности.

Постоянно развивается сотрудничество с Курганским заводом трубопроводной арматуры ОАО «Икар», использующим результаты проведенных исследований при разработке своих изделий. С текущего учебного года студен-

ты кафедры выполняют дипломные проекты по оптимизации конструкций трубопроводной арматуры с использованием метода конечных элементов, задачи для которых ставятся совместно со специалистами завода.

Другим аспектом внедрения расчетов методом конечных элементов является сокращение времени подготовки производства в сочетании с сокращением производственных затрат. Это достигается за счет возможной замены традиционных методов моделирования и испытаний математическими (компьютерными), на основании вышеуказанных методов расчета [9, 10], что представлено на рис. 6. С внедрением методов математического моделирования и анализа исключается необходимость повторного создания опытных образцов и проведения их испытаний вследствие корректировки конструкции по результатам предыдущих испытаний, так как корректировка конструкции осуществляется по результатам моделирования, которое выполняется практически параллельно с разработкой конструкторской документации, а испытание опытных образцов носит верификационный характер [10].

Рис. 3. Поле распределения суммарных перемещений в крышке клиновой задвижки DN 100, PN 40 (ОАО «Икар») при нагружении рабочим давлением

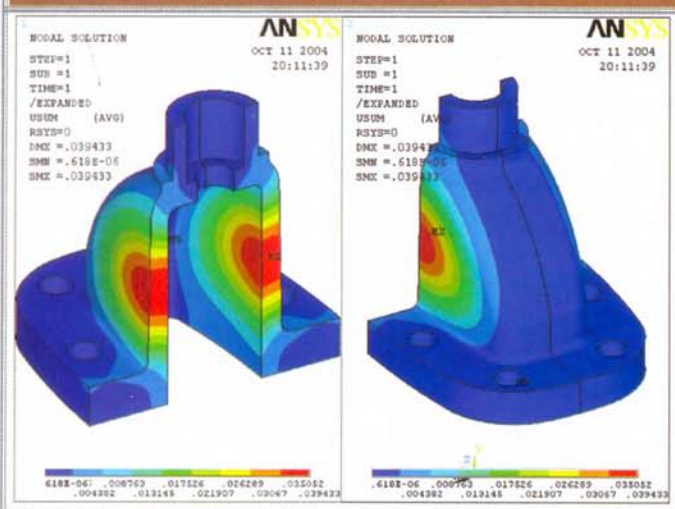
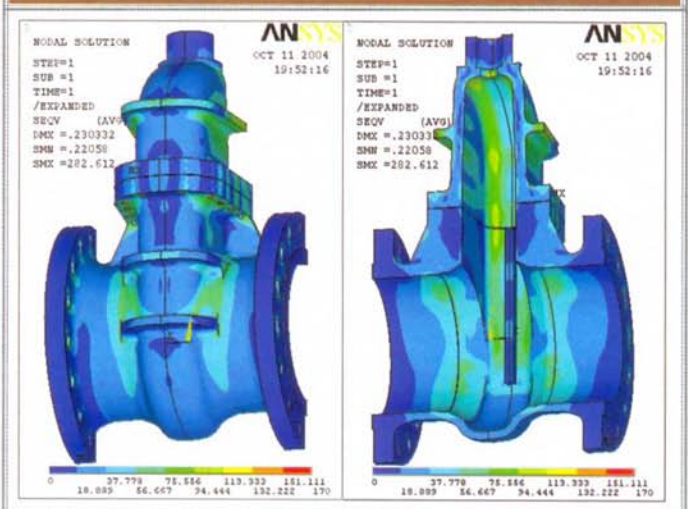
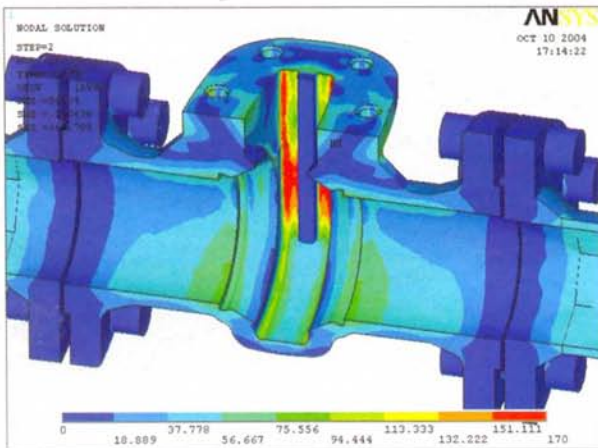


Рис. 4. Поле распределения эквивалентных напряжений в корпусных деталях клиновой задвижки DN 300, PN 40 (ОАО «Икар») при нагружении рабочим давлением



**Рис. 5. Поле распределения эквивалентных напряжений в корпусе клиновой задвижки DN 100, PN 40 (ОАО «Икар») с учетом монтажных нагрузок в случае прямого гидроудара**



Однако даже использование более совершенных и дающих более точные результаты методов расчета не позволит определять НДС изделия с необходимой точностью, если отсутствуют данные о нагрузках, воспринимаемых изделиями при эксплуатации. Для диагностики накопленных усталостных повреждений металлоконструкций в процессе эксплуата-

ции и восстановления истории нагружения наиболее перспективными являются методы, основанные на использовании датчиков усталости. Среди датчиков усталости в практике экспериментальных исследований различных деталей и несущих систем машин распространение получили датчики деформаций интегрального типа (ДДИТ), разработанные в середине 80-х годов XX века группой ученых, возглавляемой В.Н. Сызранцевым [11]. ДДИТ представляют собой безбазовые датчики, изготавливаемые из металлической фольги, получаемой гальваническим или иным способом [11, 13]. Под действием циклических деформаций на поверхности ДДИТ появляются «темные пятна» (внешний эффект), одновременно структура датчика изменяется, — в нем возникают зерна измененной структуры (внутренний эффект), увеличивающиеся в размерах с ростом числа циклов нагружения (Рис. 7). Момент возникновения первых «темных пятен» и первых зерен измененной структуры датчика деформаций интегрального типа, а также их плотность и размеры хорошо коррелируют с числом циклов и амплитудой циклических деформаций, что позволяет использовать их для восстановления истории нагружения деталей. В рамках одного из развиваемых научных направлений был разработан и реализован в практике экспериментальных исследований ряд методик восстановления нагруженности элементов трансмиссий в условиях натурных (ходовых) испытаний машин на основе расшифровки информации, получаемой с помощью ДДИТ, «состыкованной» с результатами численного расчета напряженно-деформированного состояния исследуемых мест МКЭ [12, 13].

Таким образом, вторым путем, ведущим к повышению точности оценки прочностной надежности трубопро-

**Рис. 6. Жизненные циклы изделий**

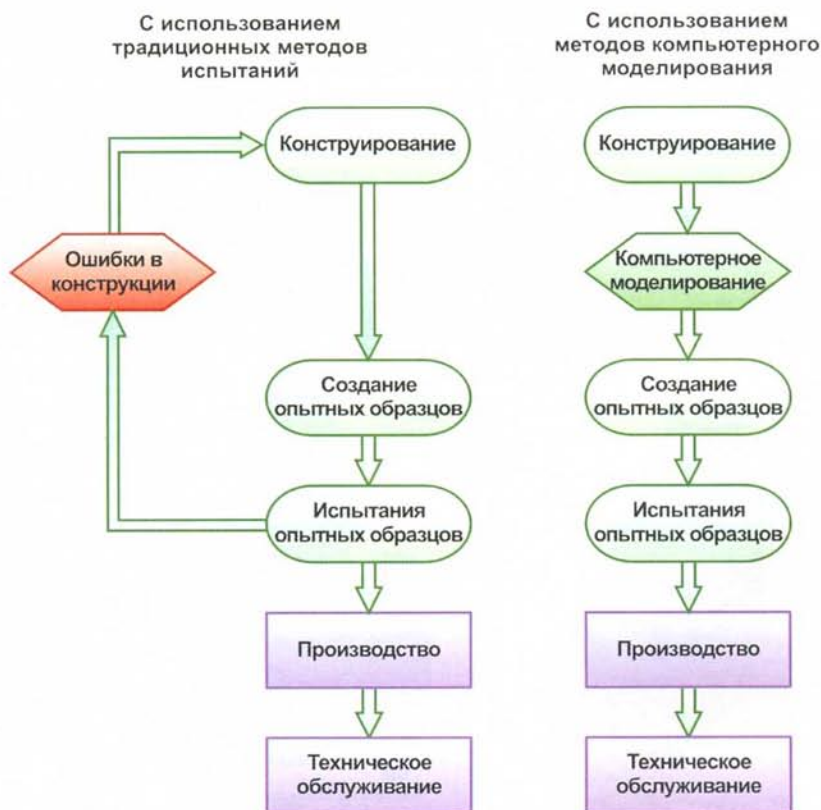


Рис. 7. Реакция ДДИТ при напряжении 250, 133 МПа при различном числе циклов нагружения



число циклов  
нагружения:  $N = 0$



число циклов  
нагружения:  $N = 10$  тыс.



число циклов  
нагружения:  $N = 20$  тыс.



число циклов  
нагружения:  $N = 30$  тыс.



число циклов  
нагружения:  $N = 40$  тыс.



число циклов  
нагружения:  $N = 50$  тыс.

водной арматуры, является восстановление реальной нагруженности изделий в процессе их эксплуатации. В связи с этим на кафедре «МОНИГП» ведутся работы в двух взаимосвязанных направлениях:

- создание методики, позволяющей на основе анализа НДС методом конечных элементов определять оптимальные места расположения датчиков деформаций интегрального типа для восстановления нагруженности арматуры в процессе эксплуатации;
- разработка расчетно-экспериментальных методик, позволяющих восстановить историю нагружения арматуры в процессе ее эксплуатации по реакции ДДИТ, что позволит создать расчетные схемы, максимально приближенные к реальным условиям эксплуатации.

Список использованных источников

1. Гуревич Д. Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры М.-Л.: «Машиностроение», 1964, 832 с., с ил.
2. Сызранцев В. Н., Сызранцева К. В. Расчет напряженно-деформированного состояния деталей методами конечных и граничных элементов: Монография. — Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2000. 111с.
3. Басов К. А. ANSYS в примерах и задачах/ Под общ. ред. Д. Г. Красковского. — М.: КомпьютерПресс, 2002. 224 с.: ил.
4. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. — М.: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.
5. Чигарев А. В., Кравчук А. С., Смалюк А. Ф. ANSYS для инженеров: Справ. пособие. М.: Машиностроение-1, 2004. 512 с. Шабров Н. Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей. — Л.: Машиностроение, 1983. 212 с., ил.
6. Сеницын Е. Н. Программное обеспечение расчетов на прочность оборудования и трубопроводов (расчеты

напряженно-деформированного состояния и оценки прочности) // Прочность и надежность нефтегазового оборудования: Доклады научно-технического семинара, Москва, 19-20 сентября 2000 г. — ЦНИИАтоминформ, 2001. С. 18—22.

7. Syzrantsev V. N., Syzrantseva K. V., Beloborodov A. V. Using Finite Element Analyzing for calculation of stress-strain conditions of wedge gate valves bodies // Engineering mechanics 2003: Proceedings of National conference with international participation. 2003, Svatka, Czech Republic. P. 324—325.

8. Белобородов А. В. Исследование влияния нагрузок, возникающих при монтаже трубопроводной арматуры, на ее напряженно-деформированное состояние // Проблемы развития ТЭК Западной Сибири на современном этапе: труды Международной научно-технической конференции. Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. С. 122—125.

9. Christenson B. DesignSpace 6.0 Highlights //Ansys Solutions. — 2001. — Volume 3. Number 2. P. 12—16.

10. Fietkiewicz B.J., DeGroot R.J. Integrated Product Development at Modine Manufacturing //Ansys Solutions. — 2001. — Volume 3. Number 3. P. 6—8.

11. Сызранцев В. Н., Голофаст С. Л. Измерение циклических деформаций и прогнозирование долговечности деталей по показаниям датчиков деформаций интегрального типа. — Новосибирск: Наука, 2004. 206 с.

12. Сызранцева К. В. Методическое и программное обеспечение измерения напряжений в деталях машин датчиками деформаций интегрального типа: Дис. ...канд. техн. наук. — Курган, 1998. 154 с.

13. Сызранцев В. Н., Голофаст С. Л., Сызранцева К. В. Диагностика нагруженности и ресурса деталей трансмиссий и несущих систем машин по показаниям датчиков деформаций интегрального типа. — Новосибирск: Наука, 2004. 188 с.