

УДК 622.242.2:861.3

С.Г. Абрамян, С.Н. Савеня, А.П. Ушаков

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ «PipEst» ДЛЯ ОЦЕНКИ РЕСУРСА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Рассмотрены различные методы оценки состояния дефектных участков с использованием современных технологий трехмерного нелинейного моделирования, которые могут быть реализованы в условиях предприятий газовой промышленности.

Now a gas pipeline is characterized by a high degree of their physical deterioration in conditions of constant influence of external environment.

The deterioration of a status of pipelines reduces reliability of deliveries of gas and petroleum, increases quantity of failures with heavy ecological, economic and social consequences.

Article considers various methods of a rating of a status of defective sites, with use of modern technologies of three-dimensional nonlinear modeling, which can be realized in conditions of the enterprises of gas industry.

Конструкции систем магистральных трубопроводов имеют, как правило, топологически сложную разветвленную структуру и находятся при эксплуатации в условиях многофакторного нагружения и агрессивного воздействия окружающей среды [1, 2, 3].

Транспортные трубопроводные системы Российской Федерации сложились, в основном, в период с 1960 по 1980 гг. в результате развития добычи газа и нефти за счет освоения месторождений Западной Сибири. Таким образом, подавляющее большинство из них находятся в эксплуатации уже свыше 20...30 лет. Уже в 1999 г. [4] из всех трубопроводов общей сети Единой системы газоснабжения Российской Федерации около 30 % достигли условного нормативного предела — 33 лет, почти 20 % газопроводов работало на пониженных давлениях транспортируемого газа.

В современных условиях дефицита инвестиций в ТЭК строительство новых трубопроводных систем ограничено. Только в газовой индустрии за последние 8...10 лет удельные капиталовложения, направляемые на прирост добычи и транспортирования природного газа, снизились примерно вдвое [5, 6, 7]. Поэтому для обеспечения необходимого наращивания объемов потребляемых развитыми промышленными странами энергоресурсов развитие трубопроводного транспорта осуществляется, главным образом, в следующих направлениях [8, 3]:

достройка, расширение пропускной способности действующих магистральных трубопроводов и их оснащение необходимым оборудованием [9, 10];

загрузка имеющихся трубопроводных систем до их максимальной проектной производительности [8, 3];

первоочередная реконструкция наиболее критических участков трубопроводных сетей [7, 11],

В то же время, происходит интенсивное старение элементов конструкции действующих трубопроводных систем, ухудшаются технические характеристики трубопроводов и оборудования. [12, 4]. Хроники аварий, ежемесячно публикуемые в издаваемых Росгортехнадзором научно-производственных журналах, свидетельствуют о том, что в настоящее время

среди всех зарегистрированных серьезных промышленных инцидентов разрывы труб в трубопроводных системах высокого давления, сопровождаемые возгоранием транспортируемого продукта, составляют абсолютное большинство. С аналогичными проблемами сталкивается большинство зарубежных компаний, эксплуатирующих магистральные трубопроводы. [13, 14]

Таким образом, не снижающееся количество аварий, а также реальная угроза возникновения в промышленных зонах мира, и прежде всего в России, техногенных катастроф (крупномасштабных каскадных аварий с тяжелыми последствиями), инициированных разрушением магистральных трубопроводов высокого давления, транспортирующих опасные жидкости и газы, наглядно свидетельствуют, что обеспечение безопасности эксплуатации трубопроводных систем остается одной из наиболее актуальных задач трубопроводного транспорта [13, 7, 4]. В последнее время возрастает значение еще одной важной проблемы увеличения пропускной способности трубопроводной сети за счет повышения максимального допускаемого рабочего давления с учетом реального технического состояния трубопроводов и соблюдением требований безопасной эксплуатации [13, 15, 11].

Для решения вышеперечисленных проблем требуется своевременная реконструкция и модернизация наиболее критических участков эксплуатирующихся трубопроводных систем [8, 3]. Основными задачами, возникающими при проведении реконструкции и модернизации, являются: адекватная оценка технического состояния трубопроводов; анализ безопасности их эксплуатации; ранжирование участков трубопроводов по срокам их ремонта или замены; назначение для каждого участка максимального безопасного давления в предремонтный период [16—18, 8].

Точность ранжирования по степени опасности участков протяженной трубопроводной системы зависит, прежде всего, от адекватности оценки фактической прочности каждого ее участка с учетом его реального технического состояния и индивидуальных особенностей конструкции. В свою очередь, адекватность этих оценок определяется возможностями расчетного математического аппарата, применяемого при анализе напряженно-деформированного состояния (НДС) трубопроводной системы (как всей трубопроводной конструкции в целом, так и каждого из составляющих ее элементов) при действии всех эксплуатационных (нормативных и ненормативных) и аварийных нагрузок [17—23, 11, 8, 6].

Как известно [1, 13, 18, 21, 24], одной из основных причин снижения несущей способности и разрушения магистральных трубопроводов является появление локальных дефектов стенок трубы в процессе строительства и эксплуатации. В настоящее время все типы локальных дефектов стенок труб, встречающиеся на магистральных трубопроводах, определены и классифицированы. Соответствующую информацию можно найти, например, в [1, 20, 8] и др. На основании анализа публикаций по данному вопросу, в [20], в частности, показано, что наиболее распространенным типом выявляемых при технической диагностике дефектов на магистральных газопроводах являются поверхностные дефекты стенок труб, среди которых преобладают коррозионные повреждения.

Регулярно публикуемые в последние годы результаты технических инспекций многих участков МГ, проводимые российскими газотранспортными

предприятиями, подтверждают справедливость сделанного в [20] вывода. Например, согласно [22], в течение 1992—2002 гг. на газопроводах ООО «Мострансгаз» из всех обнаруженных с помощью внутритрубной диагностики, признанных опасными и устраненных дефектов большинство составили коррозионные повреждения (57 %), а также вмятины и гофры (30 %).

Кроме поверхностных дефектов, опасными локальными повреждениями стенок труб, которые могут стать причиной аварий на магистральных трубопроводах, являются [25—27, 19] технологические дефекты (расслоения, закаты и т. п.) и различные дефекты сварных швов.

Разработанная сотрудниками ЦВТМ ВНИЭФ вычислительная технология «PipEst» предназначена для комплексной оценки состояния и повышения безопасности объектов трубопроводного транспорта ТЭК [23, 24, 28]. Она основывается:

- на численном анализе работоспособности и эффективности средств технической диагностики;

- трехмерном нелинейном численном анализе прочности участков трубопроводов по данным технической диагностики без упрощений в геометрии дефектов с учетом многофакторного нагружения;

- моделировании разрушения трубопровода;

- моделировании воздействия на трубопроводы пожаров;

- детальном численном анализе воздействия поражающих факторов аварии на человека и прилегающие объекты.

Ранжирование дефектных участков трубопроводов по степени опасности осуществляется по результатам комплексного численного анализа [29, 23, 24, 28, 30].

В соответствии с вышеизложенным, структуру технологии «PipEst» можно представить в виде следующих основных блоков:

- анализа работоспособности и эффективности технической диагностики трубопроводных систем;

- нелинейного прочностного анализа трубопроводных конструкций;

- моделирования и прогнозирования вредных воздействий на население, промышленный персонал и окружающую среду от аварий на объектах трубопроводного транспорта [28].

Все блоки взаимосвязаны между собой. Как правило, результаты применения одного из них подготавливают исходные данные для применения других блоков.

Структура вычислительной технологии была сформирована и модифицирована в результате ее многолетнего применения для решения практических задач газовой и нефтяной промышленности [24].

Предлагаемый метод ранжирования дефектных участков трубопроводов с использованием вычислительной технологии «PipEst» основывается на комплексном подходе к оценке степени опасности дефектного трубопровода. То есть заключение о состоянии исследуемого участка трубопровода и сроках его безопасной эксплуатации дается не только с учетом результатов прочностного анализа [23, 24, 28].

В качестве исходных данных для проведения ранжирования используется информация, содержащаяся в соответствующей строительной и эксплуатационной документации, результаты технической диагностики, сводки ме-

теоретических наблюдений, информация, включенная в GIS, результаты геологических изысканий и т.д. [13, 30, 23].

Для повышения информативности и полноты, получаемых при ранжировании результатов, методами численного моделирования осуществляется оценка степени достоверности данных технической диагностики [2, 28].

Адекватное моделирование предусматривает учет всех возможных воздействий на исследуемый трубопровод от внутреннего давления транспортируемых газов при различных режимах работы газотранспортной сети [23].

На первом шаге ранжирования численными методами анализируется чувствительность и точность измерения размеров дефектов СД, применяемых при обследовании конкретного трубопровода. По результатам такого анализа данные внутритрубной дефектоскопии дополняются вероятностными оценками погрешностей измерений геометрии дефектов. Это дает возможность при прочностном анализе моделировать различные сценарии разрушения трубопровода в зависимости от вида и характера дефектов и изменений нагруженности [23, 24].

На втором шаге метода ранжирования с помощью ГДС анализируется весь диапазон изменения режима транспорта газов с точки зрения уточнения величины и динамики изменения нагрузок на стенки трубопровода от внутреннего давления транспортируемых продуктов. Это позволяет существенно уточнить исходные данные, необходимые для прочностного анализа дефектных участков газопровода [24].

На третьем шаге выполняется трехмерный нелинейный численный анализ прочности участков трубопроводов без упрощений в геометрии дефектов и с учетом всех действующих нагрузок. Как отмечалось в [23, 24, 28, 30], прочностной анализ трубопроводных систем ТЭК по вычислительной технологии «PipEst» производится на основании расчетов НДС трубопроводов с помощью МКЭ и моделирования их разрушения при различных видах воздействия. При этом прочностной анализ включает в себя следующие основные этапы:

- расчеты НДС участков трубопроводов по балочным конечно-элементным моделям с учетом всех силовых факторов, действующих на трубопровод в процессе эксплуатации [1, 24];

- выявление наиболее нагруженных участков трубопроводной конструкции [12, 3];

- определение сил и моментов, действующих на границах участков [27, 28];

- уточненный расчет НДС опасных участков с использованием оболочечных и объемных конечно-элементных моделей; анализ несущей способности опасных участков трубопровода на основе критериев теории прочности и разрушения;

- ранжирование опасных участков трубопровода [1, 13, 23].

Оценка возможности разрушения трубопровода производится по следующим критериям:

- по запасам прочности (согласно нормативной документации) [12, 29];

- по несущей способности (согласно нормативной документации) [1, 3];

- по моделям упруго-пластического разрушения [27, 2, 23].

В результате прочностного анализа отбирается группа наиболее опасных (с точки зрения прочности) дефектных участков трубопроводов. Как правило,

при практическом применении метода таких участков в одном газотранспортном предприятии может быть от нескольких десятков до нескольких сотен. Реальная ремонтоспособность газотранспортного предприятия составляет, как правило, не более двух десятков участков в год. Исходя из этого, производится дополнительное ранжирование внутри отобранной группы участков трубопроводов по степени их опасности с точки зрения тяжести последствий из аварийного разрушения [29, 23, 24, 28].

Поэтому на четвертом шаге метода ранжирования с помощью технологий численного моделирования, описанных в [24], анализируется тяжесть последствий аварийного разрушения дефектных участков трубопровода для людей и окружающей среды. Сравнение результатов прочностного анализа и зон аварийного поражения позволяет установить последовательность ремонта или замены дефектных участков трубопровода по степени их опасности.

Глубина использования метода ранжирования может изменяться в зависимости от задач, стоящих перед специалистами, эксплуатирующими газопроводы или контролирующими их состояние. Так, например, одной из основных задач, стоящих перед эксплуатационным персоналом является оценка опасности дефектного участка газопровода на месте обнаружения дефекта (например, при экскавации МГ) [18, 3]. Для решения этой задачи в ООО «НПО ВНИИЭФ-ВОЛГОГАЗ» В.В. Алешиным, С.В. Фотиным и В.В. Кобяковым под руководством Г.С. Клишина был разработан мобильный аппаратно-программный комплекс (АПК) [28]. Он может размещаться в автомобиле и позволяет оценивать опасность дефекта непосредственно на месте его обнаружения.

Внедрению технологии и повышению точности моделирования и прогнозирования ресурса трубопроводных систем будет способствовать:

- создание высокоточных внутритрубных дефектоскопов, обладающих на порядок большей степенью разрешения в оценке дефектов (например, комплекс КВД «Газавтоматика») [12, 8, 29];

- создание и накопление «банка» диагностической информации на всех стадиях «жизни» трубопровода [12, 3];

- внедрение интеллектуальных вставок и приборно-диагностических комплексов [2, 32];

- учет изменений характеристик грунтов [6, 3];

- применение моделирования при любом значительном изменении условий «труба — окружающая среда» и тем более при возникновении аварий и пожаров в непосредственной близости к трубопроводам [30, 23];

- картографическое совмещение трасс трубопроводов и геоструктур с учетом потенциальной опасности по геодинамическим признакам (применение ГИС-технологий) [16—18, 8];

- уточнение местоположения активных разломов [22];

- ландшафтное микробиологическое районирование опасных зон [4];

- организация стресс-коррозионного мониторинга с использованием различных физико-химических, химических и биологических методов [9, 14, 15, 32];

- прогресс в компьютерных технологиях, создание и внедрение быстродействующих ЭВМ на двудерных процессорах последнего поколения [28].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ANSI/ASME B31G — 1991. Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines (A Supplement to ASME B31 Code for Pressure Piping). ASME, New York.
2. Киченко С.Б. Метод оценки степени опасности локальных дефектов на поверхности трубопроводов // Безопасность труда в промышленности. 2001. № 6. С. 9—11.
3. Нургалиев Д.М. Сущность и принципы классификации дефектов типа «коррозионная язва» на допустимые и недопустимые как способ выбора критерия для оценки необходимости ремонта поврежденных коррозией участков трубопровода / Д.М. Нургалиев, А.В. Митрофанов, С.Б. Киченко М. : ВНИИОЭНГ НТЖ «Защита от коррозии и охрана окружающей среды». 1997. № 3. С. 2—7.
4. Митрофанов А.В. Принципы прогнозирования работоспособности подземных трубопроводов по результатам электрометрических и внутритрубных обследований / А.В. Митрофанов, С.Б. Киченко // Практика противокоррозионной защиты. 2000. № 4(18). С. 18—32.
5. Новиков В.Ф. Зависимость коэрцитивной силы малоуглеродистых сталей от одноосных напряжений (часть 1) / В.Ф. Новиков, Т.А. Яценко, М.С. Бахарев // Дефектоскопия. 2001. № 11. С. 51—57.
6. Мужижский В.Ф. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций подземных сооружений и сосудов, работающих под давлением / В.Ф. Мужижский, Б.Е. Попов, Г.Я. Безлюдько // Контроль. Диагностика. 2000. № 9. С. 48—50.
7. Седых А.Д. Коммерческое страхование в газовой промышленности : методические рекомендации для использования в практической деятельности предприятий / под общим научным руководством / А.Д. Седых и В.В. Иваника. Ч. 2. М. : ОАО «Газпром», 1998. 166 с.
8. Диагностика технического состояния газопроводов : стандарт предприятия. Методика комплексного обследования участков магистральных газопроводов по результатам пропуска внутритрубного дефектоскопа. СТП 8828-160-01. Ухта, 2001.
9. Рекомендации по оценке работоспособности участка газопроводов с поверхностными повреждениями. М. : ВНИИГАЗ, 1996.
10. Руководство по анализу результатов внутритрубной инспекции и оценке опасности дефектов. ВРД 39-1.10-001-99. М. : ВНИИГАЗ, 1999.
11. Руководство по эксплуатации средств противокоррозионной защиты подземных трубопроводов. Т. 1. М. : ВНИИГАЗ, 1986.
12. Инструкция по освидетельствованию, отбраковке и ремонту труб в процессе эксплуатации и капитального ремонта линейной части магистральных газопроводов. М. : ВНИИГАЗ, 1991.
13. Анализ результатов диагностики магистральных газопроводов дефектоскопами высокого разрешения для выявления стресс-коррозионных повреждений / В.А. Канайкин, Б.В. Патраманский, В.Е. Лоскутов и др. // Опыт эксплуатации и технической диагностики магистральных газопроводов с дефектами КРН : материалы совещания ОАО «Газпром» (г. Югорск, октябрь 2001 г.). М. : ИРЦ Газпром, 2002.
14. Правила технической эксплуатации магистральных газопроводов. ВРД 39-1.10-006-2000. М. : ИРЦ Газпром, 2000.
15. Методика экспертной оценки относительного риска эксплуатации линейной части магистральных газопроводов / Ю.Н. Аргасов, В.И. Эрстов, В.Д. Шапиро и др. М. : ИРЦ Газпром, 1995.
16. Икусов А.Е. Оценка ущерба от аварий на линейной части газопроводов ГТС. // Транспорт и подземное хранение газа. 2001. № 3.
17. Лазерная система для определения коррозионных повреждений на наружной поверхности вскрытых трубопроводов // Трубопроводный транспорт нефти. 1998. № 2.
18. Методическое руководство по оценке коррозионного растрескивания под напряжением / Д.Е. Марр, Т. Каннитхэм, М. Джонсон, А. Брайтон // Нефтегазовые технологии. 1998. № 4.
19. Обследование и ремонт магистральных газопроводов, подверженных КРН / Ф.Г. Тухбатуллин, З.Т. Галиуллин, С.В. Карпов и др. // Обз. Информ. Сер. : Ремонт трубопроводов. М. : ИРЦ Газпром, 2001.
20. Арабей А.Б. Анализ основных достижений в диагностике КРН за 1999—2000 гг. / Опыт эксплуатации и технической диагностики магистральных газопроводов с дефектами КРН : материалы совещания ОАО «Газпром» (г. Югорск, октябрь 2001 г.). М. : ИРЦ Газпром, 2002.

21. Тухбатуллин Ф.Г. Результаты работы ООО «ВНИИГАЗ» по проблеме КРН / Ф.Г. Тухбатуллин, З.Т. Галиуллин // Опыт эксплуатации и технической диагностики магистральных газопроводов с дефектами КРН : материалы совещания ОАО «Газпром» (г. Югорск, октябрь 2001 г.). М. : ИРЦ Газпром, 2002.
22. Методические рекомендации по количественной оценке состояния магистральных газопроводов с коррозионными дефектами, их ранжирования по степени опасности и определению остаточного ресурса. ВРД 39-1.10-004-99. М. : ИРЦ Газпром, 2000.
23. Концепция методического руководства по оценке риска магистральных нефтепроводов / Ю.В. Лисин, А.Ю. Верушин, М.В. Лисанов и др. // Трубопроводный транспорт нефти. 1997. № 12.
24. Состояние проблемы стресс-коррозии в странах СНГ и за рубежом // Сер.: Защита от коррозии оборудования в газовой промышленности / Т.К. Сергеева, Е.П. Турская, Н.П. Михайлов, А.И. Чистяков. М. : ИРЦ Газпром, 1997. 101 с.
25. Parkins R.M., Blanchard W.K., Dalanty B.D. Transgranular Stress Corrosion Cracking of High-Pressure Pipelines Corrosion // Pipelines J. 1994. № 5. P. 394—402.
26. Мокроусов С.Н. О состоянии технической безопасности магистральных нефтепродуктопроводов // Сборник трудов Международной конференции «Безопасность трубопроводов». Москва, 17—21 сентября 1995. М. : ИАЭ, 1995. С. 12—21.
27. Оперативная информация об авариях, происшедших на предприятиях, подконтрольных Госгортехнадзору России : редакционная статья // Безопасность труда в промышленности. 2001. № 12. С. 14.
28. Оперативная информация об авариях, происшедших на предприятиях, подконтрольных Госгортехнадзору России. Редакционная статья // Безопасность труда в промышленности. 2002. № 3. С. 22.
29. Дедиков Е.В. Стратегия РАО «Газпром» по снижению выбросов вредных веществ в атмосферу // Материалы Научно-технического совета РАО «Газпром». Саратов, 13—15 мая 1997 года. М. : ИРЦ «Газпром», 1997. С. 3—9.
30. Селезнев В.Е. Применение программных комплексов ANSYS и LS-DYNA для анализа осколочного поражения при авариях на газопроводах / В.Е. Селезнев, В.В. Алешин // Сборник трудов Второй конференции пользователей программно-математического обеспечения CAD-FEM GmbH (Москва, 25—26 апреля 2002 года) / под ред. А.С. Шадского.
31. Селезнев В.Е. Методы и технологии численного моделирования газопроводных систем / В.Е. Селезнев, В.В. Алешин, Г.С. Клишин ; под ред. В.Е. Селезнева. М. : КомКнига, 2005. 323 с.
32. Селезнев В.Е. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов / В.Е. Селезнев, В.В. Алешин, С.Н. Прялов : под ред. В.Е. Селезнева. М. : КомКнига, 2005. 490 с.
33. Численный анализ прочности подземных трубопроводов / под ред. В.Е. Селезнева. М. : КомКнига, 2002. 360 с.

© Абрамян С.Г., Савеня С.Н., Ушаков А.П., 2007

Поступила в редакцию в 2007 г.