ТЕХНОЛОГИИ НЕФТИ И ГАЗА
научно-технологический журнал

№3(80) 2012

Главный редактор
Б. П. ТУМАНЯН

Научно-редакционный совет
К. С. БАСНИЕВ
А. И. ВЛАДИМИРОВ
А. И. ГРИЦЕНКО
А. Н. ДМИТРИЕВСКИЙ
О. Н. КУЛИШ
А. Л. ЛАПИДУС
Н. А. МАХУТОВ
И. И. МОИСЕЕВ
В. А. ХАВКИН

Журнал издается в Российском государственном университете нефти и газа им. И. М. Губкина

СОДЕРЖАНИЕ

20 ЛЕТ В МИРЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ПРОБЛЕМ (ИЗ ИСТОРИИ НТП ТРУБОПРОВОД) 3

ПРОЧНОСТЬ ТРУБОПРОВОДОВ И АППАРАТОВ

В. Я. Магалиф, А. В. Матвеев

НОВЫЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ РОССИЙСКИХ НОРМ ПО РАСЧЕТУ НА ПРОЧНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ 6

В. Я. Магалиф, Е. Е. Шапиро

РЕГУЛИРОВКА ПРУЖИН УПРУГИХ ОПОР КАК ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ 11

В. Я. Магалиф

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРУБОПРОВОДЫ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ 15

А. Н. Краснокутский, А. И.Тимошкин

МЕТОДИКИ РАСЧЕТОВ СОСУДОВ И АППАРАТОВ И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ В ПРОГРАММЕ ПАССАТ 21

А. Н. Краснокутский, А. И. Тимошкин

ПРОБЛЕМЫ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ УЗЛОВ ВРЕЗКИ 28

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

А. В. Бабенко, Т. Н. Гартман, Л. Б. Корельштейн

РАСЧЕТ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ДВУХФАЗНОГО ГАЗО-ЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ РАЗВЕТВЛЕННЫХ ТРУБОПРОВОДАХ 33

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ, ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЯ, ЭЛЕКТРООБОГРЕВ

И. Е. Татаринцева, С. Ю. Лисин

АЛЬБОМЫ ТИПОВЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ИХ ИНТЕГРАЦИЯ С ПРОГРАММОЙ «ИЗОЛЯЦИЯ» 38

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

А. Д. Притужалов

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ БЕЗ ОСТАНОВКИ 46

А. Д. Притужалов

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЬЕЗОАКСЕЛЕРОМЕТРОВ МАГНИТНОЙ СБОРКИ 48

А. Д. Притужалов, Н. Л. Капитонов, А. В. Воронцов, А. М. Капитонов

КОНТРОЛЬ УТЕЧЕК В ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЕ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ 50

ИНЖЕНЕРНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Т. В. Кузнецова, А. Н. Краснокутский

ОПЫТ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРАНСФЕРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ 54

А. И. Тимошкин, О. В. Полозова, Е. Е. Шапиро

АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЯМИ И МАТЕРИАЛАМИ В МОНТАЖНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ 56

А. З. Миркин, П. А. Капылов

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАО «ИПН» 60

Директор по информации
Н. П. ШАПОВА

Редактор
Ю. Н. КУЗЬМИЧЕВА

Верстка
В. В. ЗЕМСКОВ

Подготовка материалов
Т. С. ГРОМОВА,
Н. Н. ПЕТРУХИНА

Ответственный секретарь
О. В. ЛЮБИМЕНКО

Адрес редакции:
111116, Москва,
ул. Авиамоторная, 6
Тел./факс: (495) 361-11-95
e-mail: oilgas@gubkin.ru,
tng98@list.ru

Интернет: http://www.nitu.ru

При перепечатке любых материалов ссылка на журнал «Технологии нефти и газа» обязательна

№3(80) 2012

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средствам массовой коммуникации
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-16415 от 22.09.2003 г.

ISSN 1815-2600

Включен в перечень изданий Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ

Подписной индекс в каталоге агентства «Роспечать» 84100

Тираж 1200 экз.

Редакция не несет ответственности за достоверность информации в материалах, в том числе рекламных, предоставленных авторами для публикации

Материалы авторов не возвращаются

Отпечатано ООО «Стринг»
E-mail: String_25@mail.ru

20 лет в мире инженерных проблем (из истории НТП Трубопровод)

Научно-техническое предприятие Трубопровод создано в марте 1992 г. на базе организованной в 1972 г. лаборатории трубопроводных систем института «ВНИПИнефть». В 70–80-х годах прошлого века лаборатория стала одним из ведущих в СССР коллективов экспертов в области расчета, автоматизации проектирования и оптимизации технологических трубопроводов, центром взаимодействия и обмена опытом ведущих специалистов страны.

Основные кадры лаборатории сформировали ядро НТП Трубопровод и продолжили работу над прикладными программами для расчетов и проектирования трубопроводных систем, проведения исследований прочности и вибраций трубопроводов. Уход коллектива в «самостоятельное плавание» в непростых условиях формирующегося рынка дал возможность значительно расширить круг исследуемых задач и потенциальных клиентов. При этом научные и методические разработки в области гидравлических и тепловых расчетов трубопроводов (в том числе транспортирующих двухфазные газо-жидкостные потоки), расчета и проектирования тепловой изоляции, проектирования систем аварийного сброса, расчета теплофизических свойств и фазового равновесия транспортируемых продуктов получили интенсивное развитие, а разработанные на их основе современные программы «Гидросистема», «Изоляция», «Предклапан», «СТАРС» заняли ведущее положение на российском рынке.

В 1999 г. к коллективу НТП Трубопровод присоединились специалисты института Гипрокаучук в области расчета прочности трубопроводов. В НТП Трубопровод их опыт и знания нашли широкое и активное применение, а семейство программ «СТАРТ» получило необходимые ресурсы для развития и превратилось в ведущий современный инструмент прочностного расчета и анализа не только технологических трубопроводов, но и тепловых сетей, магистральных трубопроводов, трубопроводов обвязки нефтегазовых месторождений.

В 2003 г. линейка программных продуктов НТП Трубопровод была дополнена программами расчета прочности сосудов и аппаратов «Пассат» и расчета прочности штуцеров «Штуцер-МКЭ». Программы быстро получили широкое признание и распространение на рынке России и СНГ. Весьма востребованными также оказались услуги коллектива их разработчиков по выполнению расчетных исследований нестандартных аппаратов и оборудования с помощью собственных специализированных программ и таких программных инструментов общего назначения как ANSYS.

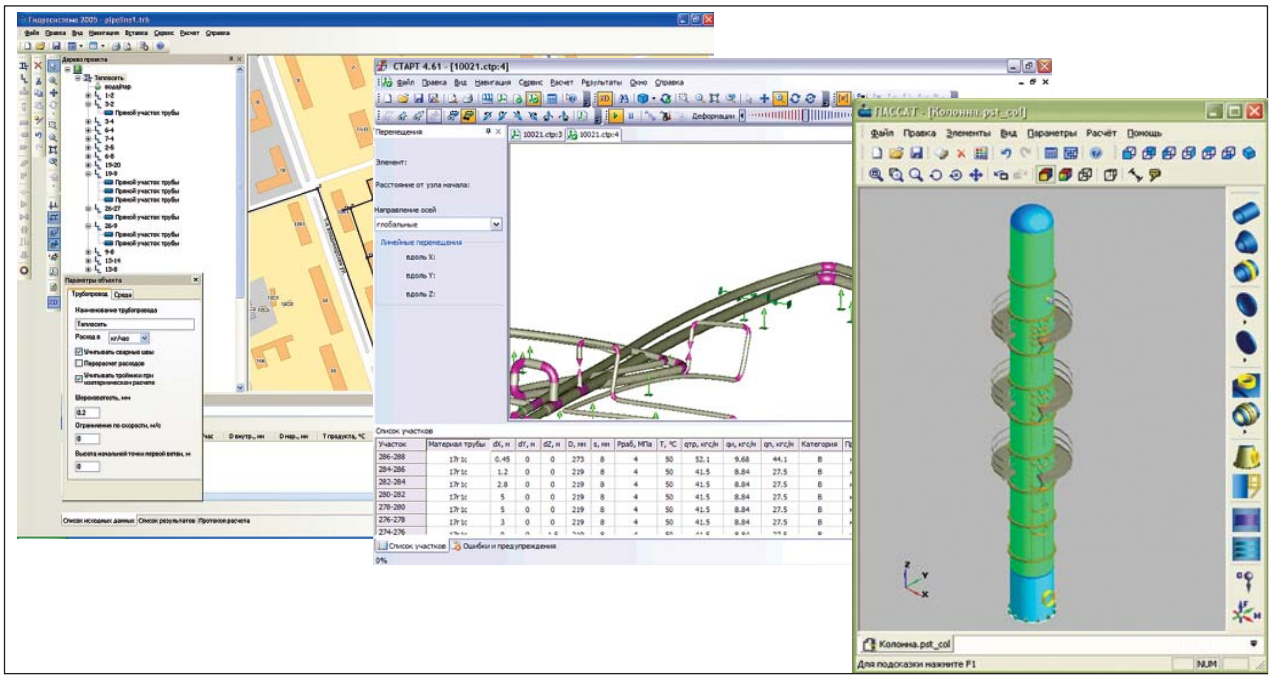
Специалисты НТП Трубопровод внесли также большой вклад во внедрение в России и СНГ современных систем трехмерного проектирования технологических установок. Совместно с ведущими западными разработчиками, такими как Intergraph, Bentley Systems, CEA, AVEVA, Autodesk, и их российскими партнерами — ведущими дистрибьюторами на рынке САПР, НТП Трубопровод участвовал в локализации и адаптации систем графического проектирования к условиям России, создании баз данных российских элементов трубопроводов и оборудования, обучении специалистов и практическом внедрении данных систем. Большое внимание уделялось и уделяется интеграции собственных расчетных программ между собой и с различными графическими системами.

В 2011 г. в продолжение работ в этом направлении НТП Трубопровод выпустил новый программный продукт — систему СУБД Проект — автоматизирующую выпуск текстовой проектной документации по трубопроводам на основе интеллектуального создания классов трубопроводных материалов. Система может использоваться как самостоятельно, так и совместно с различными системами графического трехмерного проектирования технологических установок.

На сегодняшний день ООО «НТП Трубопровод» — ведущий разработчик и поставщик программного обеспечения для инженерных расчетов оборудования и трубопроводов в самых различных отраслях.

Пять программ имеют сертификаты соответствия ГОСТ Р. Большинство программ НТП Трубопровод являются стандартом де-факто в странах СНГ в области профильных расчетов. Среди пользователей программ — крупнейшие и авторитетные проектные, научно-исследовательские и экспертные организации. Общее число пользователей превышает 1500 компаний.

В последние годы выпущены также английские версии программной системы «СТАРТ», про-



грамм Гидросистема, «ПАССАТ», Штуцер-МКЭ, которые нашли своих пользователей в странах Европейского Союза и Ближнего Востока.

Распространение, внедрение и поддержка программ, организация обучения пользователей проводятся НТП Трубопровод с использованием широкой сети партнеров — ведущих разработчиков и экспертов России и других стран в области САПР. В их числе такие компании (группы компаний), как Consistent Software Distribution, Csoft, АСКОН, Softline, Инфарс, Бюро САПР, Неолант, ЗАО "АСПО", ООО ЦПС (Россия и другие страны СНГ), Аркада (Украина), АйТи Центр (Беларусь), IN RE (страны Балтии), DIN GOST TUV (Германия и другие страны Европы и Ближнего востока), Paviath Engineering Solution (Индия). НТП Трубопровод постоянно работает над развитием своей партнерской сети для расширения географического и отраслевого распространения своих программ, повышения качества обслуживания пользователей.

Накопленный исследовательский и расчетный опыт пригодился для проведения экспертизы промышленной безопасности технической документации на отечественное и импортное оборудование, поставляемое предприятиям нефтеперерабатывающей, нефтехимической, нефтегазовой отраслей. На основании лицензии Ростехнадзора экспертная деятельность ведется специалистами НТП Трубопровод постоянно с 1995 г.

За годы экспертной деятельности выполнено множество заключений промышленной безопасности на отечественное и импортное оборудование для нефтепереработки, нефтехимии, химии, нефтяной и газовой отраслей промышленности, в том числе для таких крупнейших проектов, как Сахалин-1 и Сахалин-2. Наши заказчики экспертизы промышленной безопасности – это более 100 Российских и зарубежных компаний, в том числе крупнейшие международные компании: ABB, Exxon, Foster Wheeler, Linde, UOP и др.

С 1997 г. проводятся работы по обследованию находящегося в эксплуатации оборудования и трубопроводов методами неразрушающего контроля и определению остаточного ресурса, с выдачей рекомендаций по дальнейшей эксплуатации. Заказчики этих работ — Московский НПЗ, Сыктывкарский НПЗ, Афипский НПЗ, Монди Бизнес Пейпа Сыктывкарский ЛПК и другие предприятия.

В 1994 г. ООО «НТП Трубопровод» совместно с рядом фирм-партнеров и ведущих специалистов нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности учредило дочернюю проектную фирму ЗАО «Инженерно-промышленная нефтехимическая компания» (ЗАО «ИПН»). ЗАО «ИПН» специализируется в области проектирования и строительства «под ключ» новых и реконструкции действующих технологических производств нефтеперерабатывающей, нефтехимической и химической промышленности, включая объекты общезаводского хозяйства. За эти годы ЗАО «ИПН» выполнило свыше 100 различных проектов, в том числе по развитию Антипинского, Московского, Омского НПЗ, является генеральным проектировщиком таких крупных

промышленных производств, как Афипский НПЗ, ЗАО «Краснодарский нефтеперерабатывающий завод — Краснодарэконефть», Калининградский нефтехимический комплекс. При этом ЗАО «ИПН» активно использует в своей работе программные и методические разработки НТП Трубопровод, что расширяет возможности ЗАО «ИПН» и создает специалистам НТП Трубопровод дополнительные возможности для опытной эксплуатации своих разработок.

Огромный опыт наработан специалистами НТП Трубопровод и ЗАО «ИПН» в области проектирования и экспертизы трансферных трубопроводов от ректификационных печей к колоннам. Комплексный подход к проблеме включает всесторонний анализ вновь проектируемых, существующих и реконструируемых трубопроводов, включая их детальный прочностной расчет, тепловой и гидравлический расчет двухфазного течения, предотвращение и устранение вибраций.

Помимо практической работы, наши высококвалифицированные специалисты активно занимаются научной деятельностью и разработкой нормативно-методических документов, сотрудничая при этом с ведущими специалистами России и мира.

Выпущены стандарты по расчетам на прочность и вибрацию технологических трубопроводов, сосудов и аппаратов, тепловых сетей, по требованиям к устройству и эксплуатации технологических трубопроводов.

В 2010 г. вышла книга для инженеров-механиков, студентов и аспирантов технических ВУЗов, посвященная основам монтажного проектирования химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств.

НТП Трубопровод активно участвует в работе международных организаций, разрабатывающих наиболее сложные аспекты проектирования систем аварийного сброса (DIERS User Group) и взаимодействия программ технологических расчетов (ассоциация CAPE-OPEN Laboratories Network).

Сотрудниками ООО «НТП Трубопровод» опубликовано более 250 научных работ, в том числе за рубежом.

В 2007 г. в НТП Трубопровод была внедрена система управления качеством. В 2008 г. она была сертифицирована в системе ГОСТ Р ИСО 9001–2008 и в международной системе AFNOR на соответствие требованиям стандарта ISO 9001:2008.

На сегодняшний день НТП Трубопровод обладает внушительным кадровым потенциалом. Среди его сотрудников 20% кандидатов наук.

НТП Трубопровод активно работает с ВУЗами страны по подготовке молодых специалистов, предоставляя свои программы на льготных условиях для использования студентами, аспирантами и преподавателями профильных кафедр. Сотрудники ООО «НТП Трубопровод» преподают в таких ведущих университетах, как МВТУ им. Баумана и РХТУ им. Менделеева, руководят дипломными работами выпускников. Коллектив постоянно пополняется молодыми высококвалифицированными специалистами. Преемственность поколений, передача опыта и знаний молодым талантливым специалистам-энтузиастам являются залогом дальнейшего успешного развития и позволяют НТП Трубопровод с оптимизмом смотреть в будущее.

Новый этап развития российских норм по расчету на прочность технологических трубопроводов

В. Я. Магалиф, А. В. Матвеев

ООО «НТП Трубопровод» разработало проект нового стандарта по расчету на прочность технологических трубопроводов. В стандарте существенно расширены границы применимости по расчетному давлению и температуре, учтены особенности оценки прочности трубопроводов из цветных металлов (титана, меди, алюминия) и полимерных материалов, добавлен раздел по оценке устойчивости подземных и надземных трубопроводов, а также раздел по оценке прочности трубопроводов при сейсмических воздействиях.

В статье приведены особенности оценки прочности «криогенных» трубопроводов, трубопроводов из цветных металлов и полимерных материалов. Также рассмотрены проблемы потери продольной устойчивости, которые нашли свое отражение в проекте стандарта.

Ключевые слова: технологические трубопроводы, новые российские нормы, расчет на прочность, продольная устойчивость, высокое давление, сейсмические воздействия, криогенные трубопроводы, трубопроводы из цветных металлов, трубопроводы из полимерных материалов.

Нормативные документы, также как и программы по расчету на прочность трубопроводов постоянно развиваются и совершенствуются (рис. 1).

В 1986 г. ВНИИмонтажспецстроем впервые было издано пособие по расчету на прочность технологических стальных трубопроводов (дополнение к СН 527-80). В 1994 г. вышли «Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических стальных трубопроводов» РТМ 38.001–94 [1], утвержденные Минтопэнерго России и согласованные с Госгортехнадзором РФ. Организацией-разработчиком стандарта являлась ВНИПИнефть. За основу документа были взяты пособия к СН 527-80 и стандарт РТМ 24.038.08–72 [2], разработанный ЦКТИ им. И. И. Ползунова в 1972 г.

Необходимость создания специального нормативного документа по расчету на прочность технологических трубопроводов была обусловлена спецификой технологических трубопроводов, которые характеризуются повышенной опасностью транспортируемых сред (коррозионная активность, взрыво- и пожароопасность, токсичность), широким диапазоном изменения рабочих параметров (температур, давлений), разнообразием возможных механизмов разрушения в результате статических, циклических и динамические воздействий.

В 2002 и 2007 гг. Российской ассоциацией экспертных организаций техногенных объектов повышенной опасности «Ростехэкспертиза» последовательно были выпущены два новых стандарта СТП 09-04-20 [4] и СА 03-003-07 [5]. Стандарты были разработаны в ООО «НТП Трубопровод» и отражали опыт расчета трубопроводов на прочность, накопленный за годы применения РТМ 38.001–94 [1], реализованного в программе «СТАРТ». Отдельные положения СА потребовалось привести в соответствие с «Правилами устройства и безопасной эксплуатации

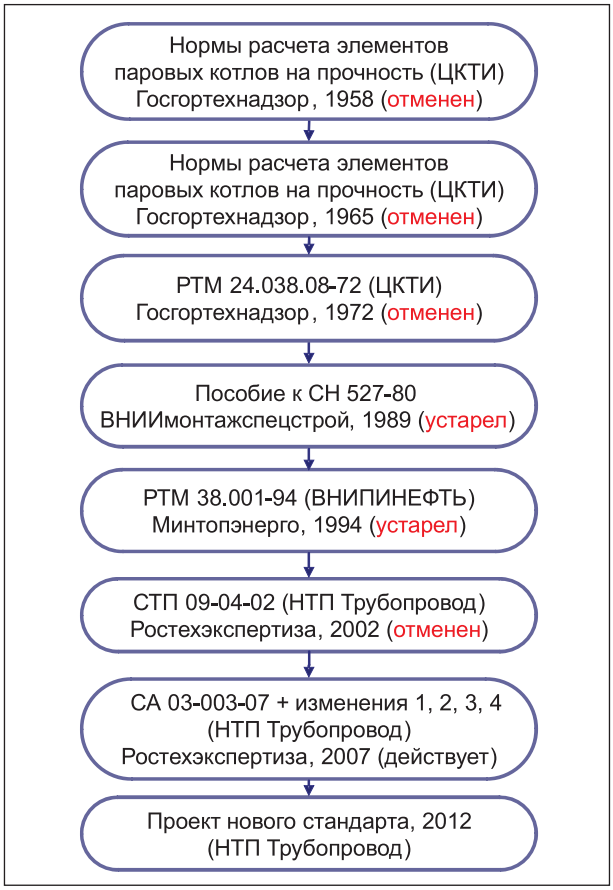


Рис. 1. **История развития норм по расчету на прочность технологических трубопроводов**

технологических трубопроводов, ПБ 03-585-03» [3], СА 03-005–07 [6] и другими нормативными документами по расчету на прочность, введенными в действие после 1995 года. Была также проведена гармонизация с нормами США ASME B31.3 [7]. Изменены методики расчета отводов и тройников: добавлена методика расчета на изгиб тройников и врезок с накладками, которая отсутствовала в РТМ 38.001–94 [1], устранены замеченные неточности, добавлены требования по расчету вакуумных трубопроводов.

В настоящее время большинство организаций руководствуются СА 03-003–07, но некоторые продолжают пользоваться устаревшим РТМ 38.001–94, считая его статус более «высоким», хотя это не так — оба документа согласно действующему законодательству не являются обязательными и носят рекомендательный характер.

Несмотря на юридическую путаницу, на сегодняшний день документ СА 03-003–07 [5] является наиболее современным, и для расчета технологических трубопроводов на прочность мы рекомендуем использовать именно его.

Для технологических трубопроводов характерно многообразие конструктивного исполнения и условий эксплуатации:

- изготовление как из стали, так и из цветных металлов и их сплавов, а также из полимерных материалов;
- работа при рабочих температурах от очень низких (–269°С) до очень высоких (700°С); как при внутреннем избыточном давлении, так и при наружном (вакуумные трубопроводы);
- способность испытывать различные воздействия в зависимости от места расположения: внутри сосудов, аппаратов и печей, в закрытых помещениях, на наружных установках и эстакадах, под землей в закрытых каналах и непосредственно в грунте (так называемая бесканальная прокладка).

Выпущенные ранее нормативные документы РТМ 38.001–94 [1] и СА 03-003–07 [5], к сожалению, не охватывали всего этого многообразия. Они распространялись только на стальные трубопроводы, с рабочими температурами –70…+700°С и давлением –0,1…+10 МПа, прокладываемые на опорах (так называемые «воздушные»). Естественно, такая ситуация вызывала неудовлетворенность многих специалистов.

К настоящему времени в ООО «НТП Трубопровод» разработан проект нового стандарта по расчету на прочность технологических трубопроводов, который существенно расширяет область применения. По сравнению с СА 03-003–07 [5] в новом стандарте введены следующие изменения:

- расширены границы избыточного внутреннего давления (трубопроводы с давлением свыше 10 МПа);
- добавлен раздел по расчету прочности криогенных трубопроводов с рабочей температурой от –269°С;
- учтены особенности оценки прочности трубопроводов из цветных металлов (титана, меди, алюминия) и полимерных материалов;
- добавлен раздел по оценке устойчивости как подземных, так и надземных трубопроводов;
- приведена методика определения отбраковочных толщин;
- содержатся требования по расчету трубопроводов, защемленных в грунте (так называемая бесканальная прокладка);
- приведена методика расчета переходов, косых врезок и косых тройников (в которых ответвление не перпендикулярно магистральной части);
- включен раздел по оценке прочности трубопроводов при сейсмических воздействиях;
- усовершенствована методика расчета вакуумных трубопроводов;
- содержится много уточнений, отражающих опыт, накопленный в НТП «Трубопровод» за время эксплуатации СА 03-003-07 [5].

На некоторых наиболее важных моментах остановимся отдельно.

Расчеты на прочность трубопроводов высокого давления

Область применения стандартов СА 03-003–07 [5] (п. 1.1.1) ограничена давлением 10 МПа. Для расширения области применения авторами были изучены отдельные положения стандарта РД 10-249–98 [8], который распространяется на паропроводы с давлением свыше 10 МПа. Многолетний опыт эксплуатации паропроводов, работающих при давлениях до 38 МПа, спроектированных согласно этому стандарту, подтвердил его высокую надежность. Потребовалось внести изменения, касающиеся специфики технологических трубопроводов.

В новом стандарте не существует формального ограничения по расчетному давлению, но ограничено соотношение толщины стенки к наружному диаметру $(s - c)/D_a \le 0{,}25$. В случае, когда данное соотношение не выполняется, распределение кольцевых и радиальных напряжений по толщине стенки приобретает нелинейный

характер, и используемые в документе формулы не могут быть использованы. Для определения толщины стенки в этих случаях следует пользоваться нормативными документами, учитывающими данную особенность [9]. К сожалению в [9] отсутствуют методы расчета отводов, тройников и переходов на изгиб при высоких давлениях. На сегодняшний день это поле для дальнейшего нормотворчества.

Криогенные трубопроводы

СА 03-003–07 [5] распространяется на трубопроводы с рабочими температурами не ниже –70°С (п. 1.1.1). Для расширения области применения использованы отдельные положения стандарта [10] и справочника [11]. Как известно, механические свойства металлов и сплавов существенно меняются с понижением температуры: повышаются прочностные характеристики (предел прочности, предел текучести, предел усталости) и снижаются показатели пластичности (относительное удлинение и укорочение при растяжении и сжатии, ударная вязкость). Некоторые металлы при понижении температуры переходят к хрупкому разрушению без заметной пластической деформации.

В новом стандарте для криогенных трубопроводов введены следующие изменения:

- учитывается низкотемпературное упрочнение металла труб, деталей трубопровода и сварных швов;
- исключена методика расчета предельного давления для отводов, допускавшая ограниченное развитие упругопластических деформаций и заменена на альтернативную, без соответствующих допущений (металл отчасти теряет свои пластические свойства);
- при расчете эквивалентных напряжений наряду с четвертой теорией прочности (наибольшей удельной потенциальной энергии формоизменения), которая применяется в основном для пластичных материалов, используется первая теория прочности (максимального главного напряжения), которая, как известно, лучше себя зарекомендовала для хрупких материалов;
- изменены критерии прочности для тройников и отводов: добавлены ограничения напряжений от всех воздействий в рабочем состоянии, отсутствовавшие для трубопроводов, работающих при средних и высоких температурах;
- в методику расчета на циклической прочности добавлен учет низкотемпературного упрочнения.

Трубопроводы из цветных металлов и полимерных материалов

СА 03-003-07 [5] распространяются только на трубопроводы из стали. Однако в технологических трубопроводах химической, фармацевтической, пищевой и других отраслей промышленности применяются также трубы из цветных металлов и полимерных материалов, которые обладают преимуществами по сравнению со стальными трубами: повышенной коррозионной стойкостью, меньшей массой и т. д.

Трубопроводы из полимерных материалов характеризуются нелинейной зависимостью напряжений от деформаций (не соблюдается закон Гука), а также значительной ползучестью под действием постоянной нагрузки и температуры. Поэтому подходы к расчету на прочность трубопроводов из таких материалов значительно отличаются от расчета трубопроводов из стали.

Трубопроводы из цветных металлов характеризуются более низкими допускаемыми напряжениями, имеют другие физико-механические характеристики (модуль упругости, коэффициент линейного расширения, коэффициенты усреднения и релаксации напряжений), а также параметрами циклической прочности.

В новом стандарте содержатся требования к расчету на прочность трубопроводов из алюминия, меди, титана и их сплавов, а также трубопроводов из полимерных материалов.

Продольная устойчивость трубопроводов

В новом стандарте содержится требования по обеспечению продольной устойчивости трубопроводов от силовых (несамоуравновешенных) воздействий, таких как: вес трубопровода, продукта и изоляции, распорные усилия от давления.

На рис. 2, *а* показана схема трубопровода, в котором потеря устойчивости вызвана действием распорных усилий от внутреннего давления в осевом неразгруженном компенсаторе. Процесс потери устойчивости в этом случае ничем не ограничен, происходит мгновенно и, как правило, приводит к разрушению компенсатора.

Для предотвращения перекоса осевого компенсатора необходимо устанавливать две направляющих опоры с каждой стороны такого компенсатора, либо мертвой опоры. Но этого недостаточно для обеспечения устойчивости трубопровода - выпучивание может произойти на длинном прямом участке, в случае, если продольное усилие превышает критическое (рис. 2, *б*). Для предотвращения такой ситуации

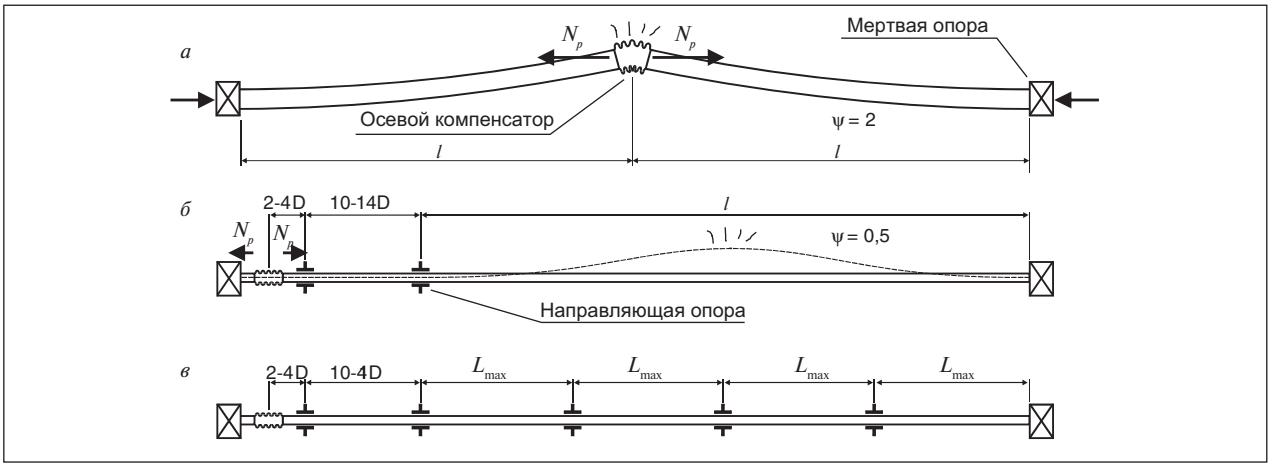


Рис. 2. **Формы потери устойчивости трубопровода от силовых воздействий (распорных усилий в сильфоном компенсаторе)**

необходимо расставлять в трубопроводе опоры с шагом, который определяется расчетом (рис. 2, *в*).

Проверка продольной устойчивости трубопровода от деформационных (самоуравновешенных) воздействий, таких как температурные удлинения, смещение опор и монтажная растяжка, имеет некоторую специфику.

На рис. 3, *а* показана схема выпучивания трубопровода, вызванного температурными расширениями. В этом случае потеря устойчивости трубопровода не приводит к разрушению, выпучивание происходит постепенно, по мере возрастания температуры и прекращается после завершения нагрева.

Выполнение условий устойчивости от деформационных воздействий необходимо по следующим соображениям:

- конструктивным: при выпучивании вероятно разуплотнение фланцевых соединений

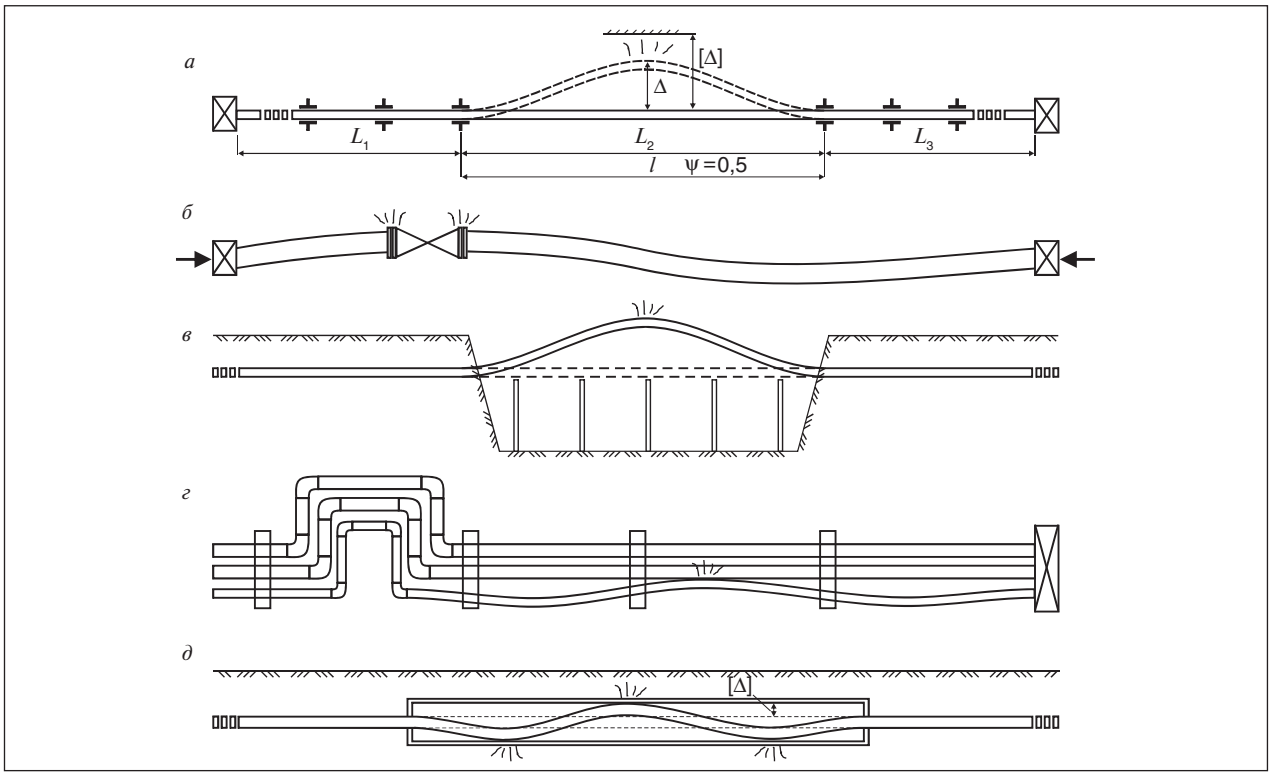


Рис. 3. **Потеря устойчивости трубопровода от деформационных воздействий (температурных расширений)**

(рис. 3, *б*), трубопровод может подняться над промежуточными опорами (рис. 3, *в*), вследствие чего могут возникнуть сильные вибрации трубопровода от присоединенного оборудования или вибрации в ветровом потоке;

• технологическим: связанными с возможными нарушениями гидравлического режима;

• эстетическим: внешний вид потерявшего устойчивость трубопровода показан на рис. 3, *г*.

Вместо условия обеспечения устойчивости трубопровода от деформационных воздействий в отдельных случаях может быть использовано условие ограничения максимальных прогибов, которые не должны

• превышать величину зазора [D] между трубой и близлежащими конструкциями: стенкой канала, соседними трубами, строительными конструкциями и т. д. (рис. 3, *д*);

• противоречить эстетическим требованиям (рис. 3, *а*).

Литература

1. РТМ 38.001–94 Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических стальных трубопроводов.
2. РТМ 24.038.08–72 Расчет трубопроводов энергетических установок на прочность.
3. ПБ 03-585–03 Правила устройства и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов.
4. СТП 09-04-20 Расчеты на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов.
5. СА 03-003–07 Расчеты на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов.
6. СА 03-005–07 Технологические трубопроводы нефтеперерабатывающей, нефтехимической и химической промышленности. Требования к устройству и эксплуатации.
7. ASME B31.3 ASME code for pressure piping, B31. Chemical plant and petroleum refinery piping.
8. РД 10-249-98 Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды.
9. РД РТМ 26-01-44–78 Детали трубопроводов на давление свыше 10 до 100 МПа.
10. ОСТ 26-04-2585–86 Техника криогенная и криогенно-вакуумная. Сосуды и камеры. Нормы и методы расчета на прочность, устойчивость и долговечность сварных конструкций.
11. *Малков М. П.* Справочник по физико-техническим основам криогеники. — М.: Энергоатомиздат, 1985.

V. Y. Magalif, A. V. Matveev

A New Stage of Russian Codes for Process Piping Stress Analysis

NTP Truboprovod has developed a new draft code for process piping stress analysis. The code significantly extended the range of applicability. The limits of design pressure and temperature values are expanded. Pipelines made of nonferrous metals (titanium, copper, aluminum) and plastics are taken into account. The sections on evaluation the stability of buried and aboveground pipelines and buried pipeline stress analysis, as well as seismic analysis are added.

The paper presents the features of cryogenic piping strength analysis, nonferrous metals and plastics piping. Also, the longitudinal stability problems are discussed.

Key words: *piping, new Russian code, stress analysis, longitudinal stability, high pressure, seismic loads, cryogenic piping, nonferrous metals piping, plastics piping.*

Инженерное программное обеспечение

СТАРТ, Ресурс	Расчеты на прочность трубопроводов, определение остаточного ресурса
ПАССАТ, Штуцер-МКЭ	Расчеты на прочность сосудов, аппаратов, узлов врезки
Гидросистема	Гидравлический и тепловой расчет и выбор диаметров трубопроводов
Предклапан	Расчет и выбор предохранительных клапанов
Изоляция	Расчет и проектирование тепловой изоляции
Старс, Simulis	Расчет теплофизических свойств и фазовых равновесий продукта
СУБД-ПРОЕКТ	Управление материалами и формирование проектных документов

ООО «НТП Трубопровод»
Москва, ул. Плеханова, 7
тел. +7 (495) 225-9435
e-mail: info@truboprovod.ru
http://www.trubopdovod.ru

Регулировка пружин упругих опор как задача оптимизации

В. Я. Магалиф, Е. Е. Шапиро

Регулировка пружин упругих опор представляет собой один из способов искусственного регулирования напряжений в трубопроводе. Нулевые прогибы от веса в местах расположения упругих опор не обеспечивают минимальных напряжений. При такой регулировке пружин напряжения, обусловленные весом трубопровода, могут оставаться значительными. Регулировка по критерию минимума напряжений позволяет полнее реализовать резервы несущей способности трубопроводов с опорно-подвесными системами. Определение допустимых диапазонов изменения нагрузки для каждой упругой опоры обеспечивает снижение трудоемкости регулировки пружин при проведении пуско-наладочных работ и мониторинга их упругой работы в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: трубопровод, упругие опоры, регулировка пружин.

Регулировка пружин упругих опор предназначена для того, чтобы приблизить упругую работу трубопровода к работе невесомой пружины, компенсирующей собственные температурные расширения. Цель регулировки обычно состоит в достижении нулевых прогибов от веса трубопровода в местах установки опор. Однако эффект невесомости может быть достигнут только при условии непрерывного опирания. Если же опоры расположены на некотором расстоянии друг от друга (как это обычно имеет место), то над опорами и в пролетах возникают напряжения, обусловленные изгибом. Характерным примером может служить многопролетная неразрезная балка, нагруженная равномерно-распределенной нагрузкой q. Изгибающие моменты в сечениях такой балки над промежуточными опорами зависят от длины пролетов и, как правило, значительно превышают моменты в пролетах.

При дискретной расстановке опор наилучшим способом нейтрализации веса, по-видимому, будет такая регулировка, которая обеспечит минимальные напряжения. Поясним это на простейшем примере. На рис. 1, *а* приведена расчетная модель симметричной двухпролетной балки, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой q (собственным весом). На рис. 1, *б* представлена эпюра изгибающих моментов. Наибольший изгибающий момент имеет место над средней опорой (в точке B):

$$M_1^B = -\frac{ql^2}{8}.$$

Реакции в крайних опорах (точки A и C)

$$R_1^A = R_1^C = \frac{3}{8}ql.$$

Теперь представим себе, что опора в точке B (двухсторонняя вертикальная связь) смещается по вертикали на величину δ (рис. 1, *в*). Эта осадка дает дополнительные опорный момент и реакции в крайних опорах (рис. 1, *г*)

$$M_2^B = \frac{3EI}{l^2}\delta; \quad R_2^A = R_2^C = \frac{3EI}{l^3}\delta.$$

Из сопоставления эпюр изгибающих моментов на рис. 1, *б* и *г*, видно, что с помощью изменения величины смещения δ можно изменять значения изгибающих моментов. Оптимальным, по-видимому, будет вариант, когда изгибающий

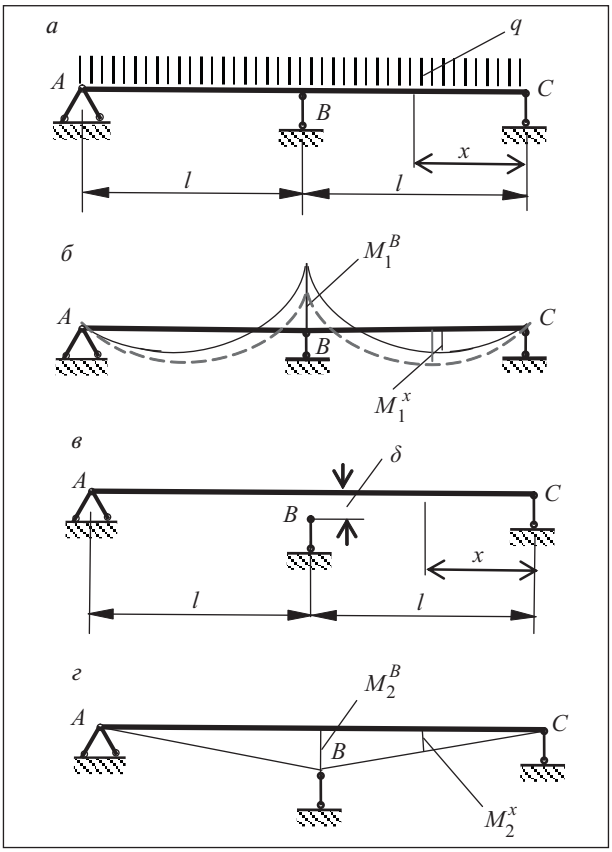


Рис. 1. **Работа двухпролетной балки**

момент на опоре в точке B уравняется с наибольшим изгибающим моментом в пролете (на рис. 1, *а* эта эпюра показана пунктиром). Изгибающий момент в пролете (в силу симметрии можно ограничиться вычислениями только для правого пролета)

$$M_{1,2}^{x} = -\frac{3}{8}qlx + \frac{3EI\delta}{l^3}x - qx\left(l - \frac{x}{2}\right),$$

где x — расстояние от точки C до рассматриваемого сечения $0 \le x \le l$ (рис. 1, *а*).

Возьмем производную этой функции по переменной x и приравняем ее нулю. Получаем максимальное значение изгибающего момента в пролете:

$$M_{\max}^{x} = -\frac{q}{2}\left(-\frac{5}{8}l + \frac{3EI\delta}{l^3 q}\right).$$

Его нужно приравнять к опорному моменту:

$$M^{B} = ql\left(-\frac{l}{8} + \frac{3EI\delta}{l^3 q}\right).$$

В результате решения уравнения $M^{B} = M_{\max}^{x}$, находим такое значение δ, при котором напряжения изгиба в балке $\sigma_{изг} = M/W$, нагруженной распределенной нагрузкой интенсивностью q (кг/м), будут сведены к минимуму. На рис. 1, *б* соответствующая эпюра изгибающих моментов показана пунктиром.

Таким образом, создавая дополнительные усилия за счет изменения отметки опирания в точке B, мы можем регулировать напряжения. Очевидно, что если наибольшие напряжения окажутся меньше допускаемых, то значений δ, будет множество.

На рис. 2 та же задача представлена в несколько ином виде. Однопролетная балка нагружена равномерно распределенной нагрузкой и сосредоточенной силой P, направленной вертикально вверх. Эта сила представляет собой нагрузку, создаваемую регулировкой пружин упругой опоры. При прогибе в точке B равном нулю (традиционный подход к определению P), изгибающий момент сечении балки будет равен опорному моменту M_1^{B} (рис. 1). Соответственно при прогибе δ, найденного из условия $M^{B} = M_{\max}^{x}$, будем иметь значение P, при котором максимальные напряжения изгиба в балке станут наименьшими. Если минимум напряжений будет отвечать условию

$$\frac{|M^{B}|}{W} - \sigma_0 = \frac{1}{2W}|l(ql - P)| - \sigma_0 \le 0,$$

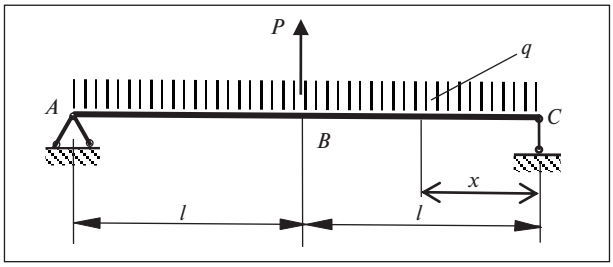


Рис. 2. **Эквивалентная схема нагружения однопролетной балки**

где σ_0 — допускаемое напряжение, то для силы P существует диапазон ее возможного изменения

$$ql + \frac{2W\sigma_0}{l} > P > ql - \frac{2W\sigma_0}{l},$$

при котором напряжения не превысят допускаемые.

В общем виде задачу можно сформулировать так. Дан пространственный трубопровод с упругими опорами, действие которых на трубопровод представлено в виде сосредоточенных сил $P_1, P_2, \ldots, P_n$ (рис. 3). Требуется:

- во-первых, найти значения этих сил, обеспечивающих минимальные напряжения в трубопроводе от весовой нагрузки,
- во-вторых, если при найденных значениях наибольшие напряжения окажутся меньше допускаемых, то для каждой силы надо определить диапазон ее возможного изменения, при котором напряжения от весовой нагрузки не превысят допускаемые.

Решение задачи минимума напряжений

Выделим конечное число поперечных сечений на прямолинейных участках трубопровода $s = 1, 2, \ldots, m$. Для каждого сечения формула продольных напряжений, обусловленных изгибом

$$\sigma_s = \frac{M_s}{W_s} + \frac{N_s}{F_s} \quad (s = 1, 2, \ldots, m),$$

где M_s — момент в сечении s; N_s — продольная сжимающая сила; W_s и F_s — момент сопротивления изгибу и площадь сечения.

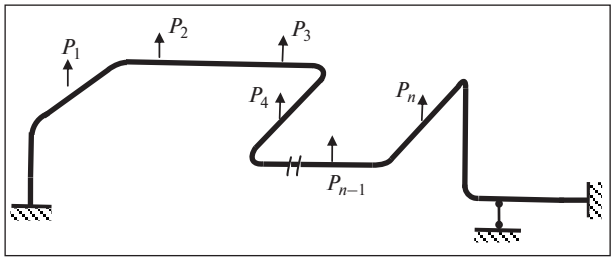


Рис. 3. **Трубопровод с упругими опорами**

Приложим к трубопроводу единичные силы по направлению P_i (i = 1, 2, …, n) и рассчитаем трубопровод на действие каждой такой силы по отдельности. Тогда напряжения в любом выделенном сечении s можно представить линейными функциями от независимых P_1, P_2, ..., P_n

$$\sigma_s(P) = \sum_{i=1}^{n} \frac{M_{si}}{W_s} P_i + \sum_{i=1}^{n} \frac{N_{si} P_i}{F_s}$$

$$(i = 1, 2, ..., n;\ s = 1, 2, ..., m).$$

Наша цель состоит в нахождении минимума функции $\max\sigma_s(P)$. Поскольку эта функция является выпуклой, задача имеет единственное решение и его можно получить численными методами (например, методом хорд). Если в результате все значения наибольших напряжений в трубопроводе окажутся меньше допустимого значения σ_0, то можно для каждой силы P_i найти допустимый диапазон ее изменения при условии, что наименьший из всех допустимых диапазонов будет максимально большим.

Нахождение диапазона допустимых значений для P_i

Поскольку ни одно их значений $\sigma_s(P)$ не должно превышать σ_0, получаем следующую систему неравенств, ограничивающую область поиска

$$V_s(P) = \sigma_s(P) - \sigma_0 \le 0 \quad (s = 1, 2, ..., m). \qquad (3)$$

Поставленной задаче можно дать наглядную геометрическую интерпретацию. Пусть дано n-мерное евклидово пространство P_1, P_2, ..., P_n, в котором выделена выпуклая область V, задаваемая неравенствами (3). В эту область нужно вписать параллелепипед со сторонами, параллельными осям координат, так, чтобы наименьшая его сторона $2l_i$ была максимальной.

Сначала впишем в область V куб со сторонами, параллельными осям координат, и максимальной стороной.

Так как область V является выпуклой, то для того, чтобы куб лежал внутри области необходимо и достаточно, чтобы каждая вершина находилась внутри или на границе этой области. Если задавать куб набором чисел (p_1, p_2, …, p_n, p_{n+1}), в котором (p_1, p_2, …, p_n) — координаты центра куба в n-мерном пространстве, а p_{n+1} — полусторона куба, то координатами его вершин в n–мерном пространстве будут ($p_1 \pm p_{n+1}$, $p_2 \pm p_{n+1}$, …, $p_n \pm p_{n+1}$), где p_{n+1} берутся с возможными комбинациями знаков «+» и «–».

Координаты вершин в векторной форме

$$\bar{p} + \bar{l}_j,$$

где $\bar{p} = p_1, p_2, \ldots, p_n$; $\bar{l} = (\pm p_{n+1}, \ldots, \pm p_{n+1})$, j = 1, 2, …, 2^n.

Условие, что все вершины куба принадлежат области V, имеет вид

$$W_{ij}(p_1, p_2, \ldots, p_{n+1}) = V_i(\bar{p} + \bar{l}_j) \le 0,$$

$$(i = 1, \ldots, m;\ j = 1, \ldots 2^n). \qquad (4)$$

Область W_{ij} в (n+1)-мерном пространстве является выпуклой в силу выпуклости функций V_i.

Если теперь ввести целевую функцию

$$U(p_1, p_2, \ldots, p_{n+1}) = p_{n+1},$$

то задача сведется к нахождению максимума функции $U(\bar{\Phi})$ на множестве W_{ij}, которое задается ограничениями

$$W_{ij}(\Phi) \le 0 \ (i = 1, 2, ..., m; j = 1, 2, ..., 2^n).$$

Мы получили типичную задачу выпуклого программирования, решаемую численными методами.

Возьмем для наглядности n = 2 (рис. 4). Сечением тела W плоскостью p_3 = 0 (в общем случае p_{n+1} = 0), будет тело V. Если $p^{(1)} > p^{(2)} > 0$, то проекция сечения тела W плоскостью $p_3 = p^{(1)}$ на плоскость $p_3 = p^{(2)}$ лежит внутри сечения тела W плоскостью $p_3 = p^{(2)}$. Поэтому тело W представляет собой «холм» с основанием V. Максимум функции $U(\bar{\Phi})$ достигается в вершине этого «холма». Процесс последовательных приближений состоит в том, чтобы двигаясь к вершине «холма», постоянно проверять условия пересечения с границей тела W до тех пор, пока максимум не будет достигнут.

На базе полученного куба можно построить несколько параллелепипедов, вершины которых не выходят за границы области V.

С практической точки зрения, чем больше допустимый диапазон, тем лучше. Это снижает

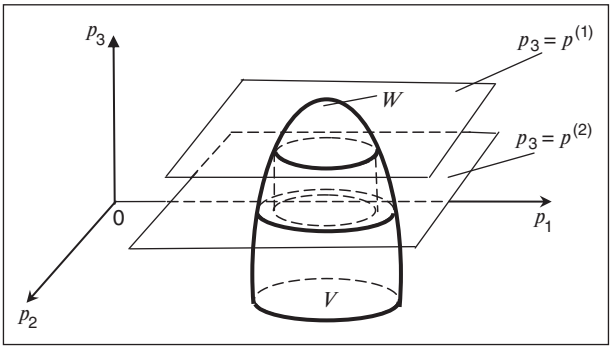


Рис. 4. **Геометрическое представление двумерной задачи**

трудоемкость регулировки пружин при проведении пуско-наладочных работ и упрощает процесс мониторинга их упругой работы в процессе эксплуатации. Поэтому весьма актуальной является задача «растяжки» куба до параллелепипеда, лежащего в той же области.

Эта задача решается с помощью перебора вариантов. Берется сторона n-мерного куба и растягивается до границ выпуклой области V; затем по очереди растягиваются все остальные его стороны. После этого берется следующая сторона, и вся процедура повторяется. В результате получается $n!$ параллелепипедов с разными диапазонами для P_1, P_2, …, P_n. Какой из полученных вариантов принять, зависит от особенностей конструкции конкретного трубопровода. При наличии большого числа равноценных вариантов можно предложить следующий формальный критерий. По каждому параллелепипеду подсчитывается сумма отношений допустимого диапазона Δ_i к среднему в этом диапазоне значению нагрузки p_i. Параллелепипед, у которого эта сумма окажется самой большой, и есть наилучший.

$$\max_j \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta_i}{p_i} \quad (j = 1,\ 2,\ \ldots,\ n!).$$

Выводы

1. Регулировка пружин упругих опор представляет собой один из способов искусственного регулирования напряжений в трубопроводе.

2. Нулевые прогибы от веса в местах расположения упругих опор не обеспечивают минимальных напряжений. При такой регулировке пружин напряжения, обусловленные весом трубопровода, могут оставаться значительными.

3. Регулировка по критерию минимума напряжений позволяет полнее реализовать требование «невесомости» для нагретого до расчетной температуры трубопровода.

4. Определение допустимых диапазонов изменения нагрузки для каждой упругой опоры обеспечивает снижение трудоемкости регулировки пружин при проведении пуско-наладочных работ и мониторинга их упругой работы в процессе эксплуатации.

V. Y. Magalif, E. E. Shapiro

Adjusting the Spring Hangers as the Optimization Problem

Adjusting the spring hangers is one of the ways for artificial control of pipeline stresses. Zero displacements from the weight loads in the spring hanger locations method does not provide the minimum stress. With this spring hander adjustment method the pipeline stresses from the weight loads can be very large. Spring hanger adjustment by minimum stresses criterion allows to realize the reserves of strength capacity more effectively. Determination of the allowable load range for each spring hanger provides reduced complexity during adjustment work and monitoring of pipeline during the operation.

Key words: *pipeline, spring hangers, adjusting spring hangers.*

Инженерные расчеты любой сложности

Анализ и устранение вибраций оборудования технологических установок

Комбинированный расчет трансферного трубопровода (гидравлика и прочность)

Прочностные расчеты трубопроводов и оборудования

Теплогидравлические расчеты трубопроводов и аппаратов

Моделирование технологических процессов, расчет ТФС и ФР веществ

ООО «НТП Трубопровод»
Москва, ул. Плеханова, 7
тел. +7 (495) 225-9435
e-mail: info@truboprovod.ru
http://www.trubopdovod.ru

Технологические трубопроводы из полимерных материалов

В. Я. Магалиф

Преимуществом трубопроводов из полимерных материалов является небольшой вес и высокая коррозионная стойкость, а недостатком – более низкие механические характеристики. Трубопроводы делятся на жесткие, которые работают как геометрически неизменяемые стержневые системы, и гибкие, работающие по принципу гибкого шланга. Механическая прочность зависит от срока службы и режима эксплуатации. Расчетные сопротивления сжатию и изгибу определяются по эталонным кривым длительной прочности, полученным на основе лабораторных испытаний. Несущая способность оценивается по условиям прочности и жесткости (допустимой овализации). Приведены области применения для различных групп и категорий технологических трубопроводов.

Ключевые слова: технологические трубопроводы, полимерные материалы, области применения, оценка прочности.

Конструкции трубопроводов из полимерных материалов имеют неоспоримые преимущества:

- низкие, по сравнению с металлами, производственные расходы на изготовление труб и деталей и минимальные потребности в их чистовой обработке,
- небольшой удельный вес,
- хорошие тепло- и электроизоляционные свойства,
- стойкость против коррозии.

К недостаткам относятся более низкие, по сравнению с металлами, характеристики прочности и неспособность противостоять высоким температурам. В полимерных трубопроводах допускается кратковременное повышение температуры транспортируемой среды не более, чем до 100°С при ограниченной продолжительности ее действия 100 ч за весь срок службы трубопровода.

Некоторые конструкторы ошибочно считают полимеры дешевыми заменителями металлов, тогда как стоимость, например, тонны полипропилена или поливинилхлорида, более чем в два раза выше стоимости чугуна и стали. Но энергозатраты на производство полимерных труб и деталей существенно ниже, чем при их изготовлении из традиционных материалов.

Трубопроводы из полимерных материалов делятся на жесткие, которые работают как геометрически неизменяемые стержневые системы, и гибкие, работающие по принципу гибкого шланга. Трубопроводы из полиэтилена диаметром до 120 мм могут быть как жесткими, так и гибкими, а более 120 мм — как правило, жесткими. Полипропилен и поливинилхлорид менее пластичны по сравнению с полиэтиленом. Модуль упругости полипропилена выше в 2 раза, а поливинилхлорида — в 10 раз. Поэтому трубопроводы из этих материалов диаметрами более 50 мм конструируют жесткими.

И еще одна классификация — трубопроводы надземные и подземные в каналах, прокладываемые на опорах или непрерывном жестком основании (в лотках) и подземные, защемленные в грунте.

Для технологических трубопроводов рекомендуется использовать трубы и детали, изготовленные по Государственным стандартам и техническим условиям заводов-изготовителей, из следующих полимерных материалов:

PE — полиэтилен,
PE -RT — полиэтилен теплостойкий,
PE -X — сшитый полиэтилен,
PP-R — полипропилен рандомсополимер,
PP-B — полипропилен блоксополимер,
PP-H — полипропилен гомополимер,
PP- RCT— полипропилен рандом статический сополимер пропилена с этиленом,
PB — полибутен,
PVC-C тип II — поливинилхлорид хлорированный тип II.

В табл. 1 приводятся сравнительные характеристики труб из различных полимерных материалов, применяемых в системах отопления.

Трубопроводы из полимерных труб не допускается применять для транспортировки чрезвычайно и высокоопасных веществ 1 и 2 классов опасности, а также веществ, к которым материалы труб химически нестойки. Рекомендуемый перечень веществ, к которым полимерные материалы химически стойки приведен в приложении 1 к СН 550–82 [2].

Механическая прочность и твердость полимерных материалов зависит от срока службы и режима эксплуатации. Допускаемые напря-

Табл. 1. **Сравнительные характеристики труб из различных материалов, применяемых в системах отопления (данные ООО «Изосталь»)**

Параметр	Материал				
	PE	PP-R	PB	PE-X	PE-RT тип II
Допускаемое напряжение в стенке трубы для 5-го класса эксплуатации (срок службы 50 лет), МПа	Не применяется при $T_{раб}$ > 50°C	1,9	4,3	3,24	2,88
Минимальная толщина стенки трубы диаметром 110 мм для 5-го класса эксплуатации с $P_{макс}$ =0,6 МПа, мм	–	15,0	7,2	9,3	10,4
Модуль упругости, при T=20°C МПа	500	1000	400	600-700	650
Способ соединения	–	Сварка	Сварка	Компрессионные фитинги	Сварка и компрессионные фитинги

жения рассчитываются по эталонным кривым длительной прочности, полученным на основе лабораторных испытаний. ГОСТ Р 52134–2003* содержит эталонные кривые длительной прочности для всех рекомендуемых выше материалов труб. Некоторые кривые состоят из двух участков (ломаные кривые).

На рис. 1 приведены эталонные кривые длительной прочности (в логарифмических шкалах) для труб из полипропилена марки PP-R 80, которые применяются для напорных трубопроводов. Начиная с температуры 70°C и выше, кривые состоят из левой и правой части, которые стыкуются в точках перелома. Напряжения, соответствующие этим точкам, приведены в табл. 2.

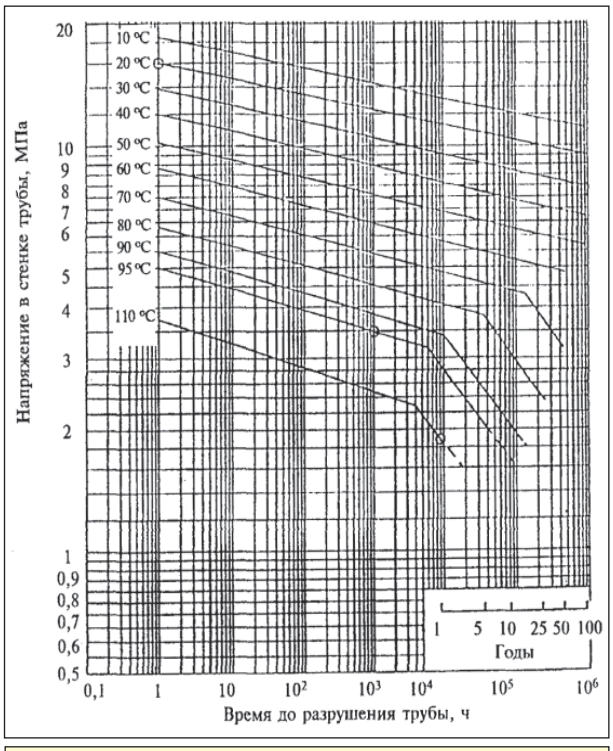


Рис. 1. **Эталонные кривые длительной прочности для труб из полипропилена PP-R 80**

Для расчетной температуры T_i < 70°C и левой части кривой при $T_i \geq$ 70°C справедлива зависимость

$$\lg(t_i) = 55{,}725 - 9484{,}1\lg(K_i\,s_i)/(T_i + 273) + 25502{,}2/(T_i + 273) + 6{,}39\lg(K_i\,s_i),$$

а для правой части кривой при $T_i \geq$ 70°C

$$\lg(t) = -19{,}98 + 9507/(T_i + 273) - 4{,}11\lg(K_i\,s_i).$$

Здесь t_i — время непрерывного действия температуры T_i, которое труба может выдержать без разрушения, ч; σ_i — напряжение в стенке трубы при температуре T_i, МПа; K_i — расчетный коэффициент запаса прочности при температуре T_i, принимаемый по следующим данным: при $T_{раб}$ — 1,5, при $T_{макс}$ — 1,3; при $T_{авар}$ — 1,0.

Срок службы трубопровода определяется суммарным временем его работы при температурах $T_{раб}$, $T_{макс}$ и $T_{авар}$:

$T_{раб}$ — рабочая температура или комбинация температур (когда рабочих температур несколько);

$T_{макс}$ — максимальная рабочая температура, действие которой ограничено во времени. Как правило, это температура имеет суммарную продолжительность до 10% от срока службы трубопровода и характеризует допустимое крат-

Табл. 2. **Границы применимости эталонных кривых длительной прочности для PP-R 80**

T_i, °C	$K_i\,\sigma_i$
70	4,31
75	4,07
80	3,84
90	3,41
100	3,01

ковременное повышение $T_{раб}$. В том случае, когда рабочих температур несколько (комбинация температур), $T_{макс}$ будет одна, ибо она представляет собой кратковременное повышение наибольшей рабочей температуры;

$T_{авар}$ — аварийная температура, возникающая в аварийных ситуациях при нарушениях в работе систем регулирования. Принимается равной 100 часам независимо от расчетного срока службы трубопровода.

Например, 5-й класс эксплуатации систем высокотемпературного отопления, приведенный выше в табл. 1, согласно ГОСТ Р 52134–2003* предусматривает работу трубопровода из полимерных материалов в течение 50 лет при соблюдении следующего температурного режима эксплуатации:

$T_{раб}$ = 20°С – 14 лет,
$T_{раб}$ = 60°С – 25 лет,
$T_{раб}$ = 80°С – 10 лет,
$T_{макс}$ = 90°С – 1 год,
$T_{авар}$ = 100°С – 100 ч.

В частном случае, когда трубопровод работает при постоянной расчетной температуре, допускаемое напряжение определяется только для одного значения $T_{раб}$ в течение всего срока службы.

Суммарное повреждение TYD, %/ч, рассчитывается по формуле

$$TYD = \Sigma a_i / t_i,$$

где a_i — назначенное время действия температуры T_i за весь срок службы трубопровода,%.

Срок службы трубопровода является величиной, обратной TYD и обычно вычисляется в годах

$$\tau = \frac{100}{TYD \cdot 24 \cdot 365{,}25} = \frac{1}{TYD \cdot 87{,}66}.$$

Пример определения σ трубопровода из пропилена PP- R 80.

Трубопровод служит для транспортировки этиленгликоля. Срок службы 25 лет или $219 \cdot 10^3$ ч. Из них:

• работа при температуре $T_{раб}$ = 60°С составляет a_1 = 97% времени,

• работа при аварийной температуре $T_{авар}$ = 90°С в течение 100 ч

$$a_3 = \frac{100}{219 \cdot 10^3} \cdot 100 = 0{,}046\%,$$

• работа при максимальной температуре $T_{макс}$ = 70°С составляет a_2 = 100 – 97 – 0,046 = 2,954%.

Напряжение в стенке трубы определяется по эталонным кривым (рис. 1) с помощью последовательных приближений.

***Начальное приближение:* σ = 3,3 МПа**. Расчетные напряжения составляют

при T_1 = 60°С: $K_1\sigma_1 = 1{,}5 \cdot 3{,}3 = 4{,}95 > 4{,}82$ МПа,

при T_2 = 70°С: $K_2\sigma_1 = 1{,}3 \cdot 3{,}3 = 4{,}29 < 4{,}31$ МПа,

при T_3 = 100°С: $K_3\sigma_1 = 1{,}0 \cdot 3{,}3 = 3{,}3 < 3{,}41$ МПа.

В правой части неравенств — граничные значения для σ_1, определяемые для PP-B 80 по табл. 1. Напряжения при температуре T_1 = 60°С относятся к эталонной кривой, которая не имеет точки перелома (первая зависимость), при температурах T_2 = 70°С и T_3 = 90°С расчетные напряжения находятся справа от точки перелома (вторая зависимость). Подставляя T_i и $K_i\sigma_i$ в уравнения для соответствующих кривых, получаем

$t_1 = 3{,}26 \cdot 10^5$ ч, $t_2 = 1{,}35 \cdot 10^5$ ч, $t_3 = 0{,}12 \cdot 10^5$ ч.

Повреждаемость

$$TYD = \frac{a_i}{t_i} = \frac{97}{3{,}26 \cdot 10^5} + \frac{2{,}954}{1{,}35 \cdot 10^5} + \frac{0{,}046}{0{,}12 \cdot 10^5} = 32{,}32 \cdot 10^{-5}\ \%/\text{ч}.$$

Срок службы

$$\tau = \frac{1}{TYD \cdot 87{,}66} = \frac{1}{32{,}32 \cdot 10^{-5} \cdot 87{,}66} = 35{,}3 > 25 \text{ лет}.$$

***Второе приближение:* σ = 3,4 МПа:**

при T_1 = 60°С: $K_1\sigma_2 = 1{,}5 \cdot 3{,}4 = 5{,}1 > 4{,}82$ МПа,

при T_2 = 70°С: $K_2\sigma_2 = 1{,}3 \cdot 3{,}4 = 4{,}42 > 4{,}31$ МПа,

при T_3 = 90°С: $K_3\sigma_2 = 1{,}0 \cdot 3{,}4 = 3{,}4 < 3{,}41$ МПа.

Подставляя значения T_i и $K_i\sigma_2$ в соответствующие уравнения, получаем

$t_1 = 1{,}688 \cdot 10^5$ ч, $t_2 = 0{,}801 \cdot 10^5$ ч, $t_3 = 0{,}0211 \cdot 10^5$ ч.

Повреждаемость

$$TYD = \frac{97}{1{,}688 \cdot 10^5} + \frac{2{,}954}{0{,}801 \cdot 10^5} + \frac{0{,}046}{0{,}0211 \cdot 10^5} = 63{,}33 \cdot 10^{-5}\ \%/\text{ч}.$$

Срок службы

$$\tau = \frac{1}{63{,}33 \cdot 10^{-5} \cdot 87{,}66} = 18{,}0 < 25 \text{ лет}.$$

***Третье приближение:* σ = 3,35 МПа:**

при T_1 = 60°С: $K_1\sigma_3 = 1{,}5 \cdot 3{,}35 = 5{,}03 > 4{,}82$ МПа,

при T_2 = 75°С: $K_2\sigma_3 = 1{,}3 \cdot 3{,}35 = 4{,}35 > 4{,}31$ МПа,

при T_3 = 100°С: $K_3\sigma_3 = 1{,}0 \cdot 3{,}35 = 3{,}35 < 4{,}01$ МПа.

Получаем

$t_1 = 2{,}291 \cdot 10^5$ ч, $t_2 = 1{,}071 \cdot 10^5$ ч, $t_3 = 0{,}113 \cdot 10^5$ ч.

Повреждаемость

$$TYD = \sum \frac{a_i}{t_i} = \frac{97}{2{,}291 \cdot 10^5} + \frac{2{,}954}{1{,}071 \cdot 10^5} + \frac{0{,}046}{0{,}113 \cdot 10^5} = 45{,}5 \cdot 10^{-5} \ \%/\text{ч}.$$

Срок службы

$$\tau = \frac{1}{45{,}5 \cdot 10^{-5} \cdot 87{,}66} = 25{,}07 \text{ лет} \approx 25 \text{ лет}.$$

При сроке службы 25 лет напряжение в стенке трубопровода не должно превышать 3,35 МПа.

Определенное таким образом напряжение для заданного режима эксплуатации и срока службы трубопровода является нормативным длительным сопротивлением разрушению материала $R^н$. В этом состоит одна из специфических особенностей подхода к определению предела прочности полимерных труб по сравнению с металлическими.

Допустимое давление в трубопроводе рассчитывается по известной формуле

$$[P] = \frac{2sR}{(D-s)},$$

которую можно представить также в виде

$$[P] = \frac{2R}{(D-s)/s} = \frac{2R}{SDR-1},$$

где R — расчетное сопротивление материала труб, МПа (кг/см²); SDR — безразмерная величина, численно равная отношению номинального наружного диаметра трубы к номинальной толщине стенки

$$SDR = \frac{D}{s}.$$

В принятой в настоящее время международной классификации маркировка труб производится по сериям «S». Каждой серии S соответствует определенное SDR. Такая классификация в 2003 году введена и в России государственным стандартом ГОСТ Р 52134–2003* [2]. Между S и SDR установлено однозначное соответствие

$$SDR = 2S + 1.$$

Таким образом, мы получаем еще один вариант формулы для допустимого давления

$$[P] = \frac{R}{S}.$$

Вернемся к нашему примеру, в котором для срока службы 25 лет номинальное допускаемое напряжение составило σ = 3,35 МПа. Пусть наружный диаметр трубопровода из пропилена PP-R 80 D = 110 мм. Требуется определить допустимое давление. Выберем трубу 5-й серии (S = 5, SDR = 11). Имеем

$$[P] = \frac{2 \cdot 3{,}35}{11-1} = \frac{3{,}35}{5} = 0{,}67 \text{ МПа} = 6{,}7 \text{ кг/см}^2.$$

Согласно ГОСТ Р 52134–2003 получаем толщину стенки 10 мм.

Если допускаемое расчетное давление должно быть больше, чем 6,7 кг/см², нужно увеличить толщину стенки. Для серии S = 3,2 (SDR = 7,4), например, имеем

$$[P] = \frac{2 \cdot 3{,}25}{7{,}4-1} = \frac{3{,}25}{3{,}2} = 1 \text{ МПа} = 10 \text{ кг/см}^2.$$

Толщина стенки для этой серии равна s = 15,1 мм.

Расчетная толщина стенки трубы определяется по формуле

$$s' = \frac{PD}{2R+P} = \frac{PD}{SDR\ (2R+P)},$$

где R — расчетное сопротивление МПа, (кг/см²), определяемое ниже; P — расчетное давление в трубопроводе, МПа, (кг/см²).

Расчетное сопротивление материала труб R, МПа (кг/см²) определяется по формулам:

а) для надземного трубопровода и трубопровода, проложенного в подземном канале:

$$R_1 = R^н K_y K_c,$$

где $R^н$ — нормативное сопротивление, численно равное номинальному допускаемому напряжению σ, рассчитанному по эталонным кривым длительной прочности для заданного режима и срока службы (пример определения рассмотрен выше), МПа (кг/см²); K_y — коэффициент условий работы трубопровода, принимается по табл. 3; K_c — коэффициент прочности соединения труб, принимается по табл. 4.

б) для поземного трубопровода, защемленного в грунте

$$R_2 = K_n R,$$

где K_n — коэффициент условий прокладки, принимаемый 0,8 — для трубопроводов, прокладываемых в местах, труднодоступных для рытья траншеи в случае его повреждения; 0,9 — для трубопроводов, прокладываемых под усовершенствованными покрытиями; 1,0 — для остальных трубопроводов.

Табл. 3. **Коэффициент условий работы K_y**

Группа транспортируемых веществ	Транспортируемые вещества	Категория трубопровода	Температура, °С	Материал		
				PE-RT	PP-R, PP-R-ST, PP-B	PVC- C тип II
А	Умеренно опасные вещества класса 3	II	20	0,6	0,6	0,6
Б	Горючие газы (ГГ), кроме сжиженных углеводородных (СУГ),	II	30	0,6	0,6	0,6
			40	0,5	0,45	0,4
	Легковоспламеняющиеся жидкости (ЛВЖ),	III	50	–	0,4	0,4
	Горючие жидкости (ГЖ)	IV	60	–	0,3	0,4
В	Трудногорючие (ТГ) и негорючие (НГ)	V	Независимо	1,0		

Табл. 4. **Коэффициент прочности соединений труб и деталей из различных материалов**

Способ соединения	K_c			Примечание
	PE-RT	PP-R, PP-R-ST, PP-B	PV-C- C тип II	
Контактная сварка встык:				Для литых деталей $K_c = 1$
для соединения труб и соединительных деталей	1,0	1,0	–	
для изготовления тройников равнопроходных прямых и сегментных отводов	0,7	0,7	–	
для изготовления тройников равнопроходных косых и неравнопроходных прямых	0,4	0,4	–	
Контактная сварка враструб для соединения труб и соединительных деталей	1,0	1,0	–	

Коэффициенты Пуассона μ при температуре до 40°С должны приниматься равными для труб:

- из полиэтилена 0,44–0,46,
- из полипропилена 0,40–0,42,
- из поливинилхлорида 0,35–0,38.

Для труб, транспортирующих вещества с температурой свыше 40°С, величину коэффициента Пуассона допускается принимать равной 0,5.

Оценка несущей способности трубопровода осуществляется от нагрузок и воздействий в рабочем состоянии, соответствующем расчетному давлению P и расчетной температуре T, за которую которая обычно принимается $T_{раб}$ (максимальное значение $T_{раб}$, когда рабочих температур несколько). Для определения перемещений, нагрузок на опоры и места присоединения трубопровода к аппаратам дополнительно используется вариант нагружения в режиме гидроиспытаний.

Для надземных трубопроводов и подземных в канале несущая способность определяется условием прочности

$$\left.\begin{array}{l} y_{кц} \le \dfrac{P(D-s)}{2s} = \dfrac{P}{2}(SDR-1) \\ \sigma_{экв} \le R_1 \end{array}\right\}.$$

Для подземных трубопроводов бесканальной прокладки:

- несущая способность по условиям прочности

$$\left.\begin{array}{l} y_{кц} \le \dfrac{P(D-s)}{2s} = \dfrac{P}{2}(SDR-1) \\ \sigma_{экв} \le R_2 \end{array}\right\},$$

для гибких трубопроводов (шлангов) второй критерий не используется;

- несущая способность по условиям жесткости — допустимой овализации поперечного сечения (укорочения вертикального диаметра)

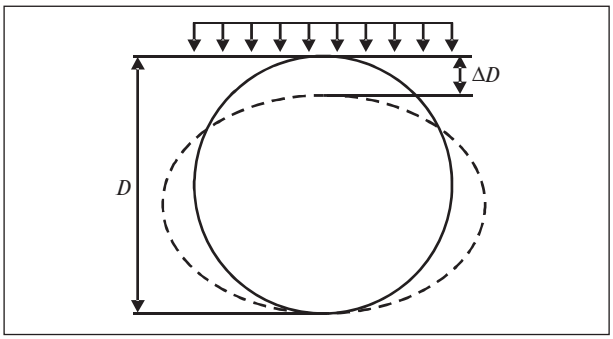


Рис. 2. **Овализация трубы под действием давления грунта**

$$\varepsilon = \frac{\Delta D}{D} \cdot 100\% \le [\varepsilon].$$

Здесь $y_{кц}$ — среднее окружное напряжение от внутреннего давления в сечении трубы, МПа; y — расчетное напряжение в сечении трубы, МПа; D — номинальный наружный диаметр трубы, мм; s — номинальная толщина стенки трубы, мм; $\varepsilon = \Delta D/D$ — относительная вертикальная деформация наружного диаметра трубы (рис. 2); ΔD — вертикальное сплющивание трубы, мм; $[\varepsilon]$ — предельно допустимая овализация поперечного сечения трубы, принимаемая для труб из полиэтилена 5%, полипропилена — 4%, поливинилхлорида — 3,5%.

Дополнительно должна проверяться устойчивость круглой формы поперечного сечения для подземного трубопровода бесканальной прокладки, в том числе при возможности его всплытия в результате действия грунтовых вод и отсутствия внутреннего давления.

Расчетные значения продольных усилий, возникающих в трубопроводе при изменении температуры, без учета компенсации температурных деформаций и трения скольжения (в промежуточных опорах или при непрерывном опирании), определяются по формуле

$$N_t = \alpha \Delta T E_0 F,$$

где α — коэффициент линейного расширения, мм/мм град (для полиэтилена — $2{,}2 \cdot 10^{-4}$, для полипропилена — $1{,}5 \cdot 10^{-4}$, для поливинилхлорида — $0{,}8 \cdot 10^{-4}$); ΔT — расчетный температурный перепад, °С; F — площадь поперечного сечения трубы, см^2; E_0 — модуль ползучести материала при растяжении, МПа (кг/см^2), принимается по данным завода-изготовителя в зависимости от расчетного срока службы трубопровода и величины σ ($R^н$). Для полипропилена PP–R при $R^н$ = 2,0 Н/мм^2 данные приведены в [6].

Расчетные величины продольных перемещений определяются от максимального повышения температуры (положительный температурный перепад) и внутреннего давления, а также возможного понижения температуры до 0°С при отсутствии внутреннего давления.

При отрицательной температуре полимерные материалы становятся хрупкими, при этом наблюдается повышенная склонность к растрескиванию. Поэтому отрицательная температура монтажа при расчете на прочность должна приниматься не ниже минус 10°С.

Методы оценки прочности технологических трубопроводов из полимерных материалов включены в новую редакцию СТО ООО «НТП Трубопровод».

Литература

1. *Уиллоуби Д. А.* Полимерные трубы и трубопроводы. — СПб.: Профессия, 2010.
2. СН 550–82. Инструкция по проектированию технологических трубопроводов из пластмассовых труб.
3. ГОСТ Р 52134–2003*. Трубы напорные из термопластов и соединительные детали к ним для систем водоснабжения и отопления. Общие технические условия.
4. НПО «Пластик» Михимпрома СССР. Пособие по проектированию трубопроводов из пластмассовых труб (к СН 550–82). — М.: Стройиздат, 1984.
5. СП 40–102–200. Проектирование и монтаж трубопроводных систем водоснабжения и канализации из полимерных материалов.
5. *Бухин В. Е.* Применение труб из полимерных материалов // Трубопроводы и экология. — 2007. — №3.
6. SIMONA, Engineering Manual for Piping Systems, Tech. info, 2010.

V. Y. Magalif

Plastics Process Piping Stress Analysis

The advantages of polymeric materials pipelines are the low weight and high corrosion resistance. The disadvantages are lower mechanical properties. Pipelines can be divided into hard, which work as a geometrically invariable rod system and flexible who work by the principle of flexible hose. The mechanical strength depends on service life and regime of operation. Estimated compressive strength and bending strength are determined by reference to long-term strength curves obtained from laboratory tests. Load carrying capacity is evaluated on the strength and stiffness conditions. The application range for different groups and categories of process piping is given.

Key words: *process piping, plastics piping, stress analysis.*

Методики расчетов сосудов и аппаратов и их реализация в программе ПАССАТ

А. Н. Краснокутский, А. И.Тимошкин

В статье рассматриваются методики и нормативные документы по расчету прочности и устойчивости сосудов, аппаратов и их элементов, и особенности их реализации в разработанной ООО «НТП Трубопровод» программе ПАССАТ. Особое внимание уделяется методам расчета на сейсмические воздействия, а также другим инженерным методам расчета (метод конечных элементов, метод Релея—Ритца, и др).

Ключевые слова: программа ПАССАТ, сосуд, аппарат, колонна, теплообменник, расчет прочности и устойчивости, методика расчета, стандарт, ветровая нагрузка, сейсмические воздействия, собственная частота колебаний, метод конечных элементов, метод Релея—Ритца.

Программа ПАССАТ предназначена для расчета прочности и устойчивости сосудов, аппаратов и их элементов с целью оценки несущей способности в рабочих условиях, а также в условиях испытаний и монтажа.

Расчет аппарата (сосуда, теплообменника) — сложный многоэтапный процесс, в котором производятся многочисленные расчеты, связанные с физическими параметрами сосуда, условиями эксплуатации, требованиями нормативно-технической документации (НТД).

Расчеты, производимые программой ПАССАТ, по типу норм и методик, а так же их роли в анализе прочностного состояния, можно разделить на следующие виды:

Методики, установленные нормативно-техническими документами (НТД) — ГОСТ Р 52857.XX-2007 [1], СТО-СА-03.003–2009 [2], EN 13445-3 [6], ASME Section VIII [9] и пр. Если для расчета элементов конструкции в ПАССАТ предусмотрено несколько методик, пользователь может выбрать требуемый нормативный документ на этапе редактирования элемента. Программа автоматически проводит контроль исходных данных на согласованность и соответствие ограничениям методик.

Общие инженерные и вычислительные методы, в том числе лежащие в основе некоторых методик нормативных документов — метод Релея, метод конечных элементов и др.

Вспомогательные расчеты и методы, позволяющие из конструкционных параметров сосуда (аппарата) и условий нагружения автоматически определить ряд величин, которые являются исходными для расчетов по нормативным документам. Примеры таких величин – расчетные длины; массы, как отдельных элементов, так и всего сосуда (аппарата); параметры критического сечения опорной обечайки; объем заполнения сосуда по высоте налива; параметры трубных решёток и т. д. Для определения величин используются как простые, но трудоёмкие при ручном счете вычисления, так и итерационные алгоритмы. К этому виду расчетов следует также отнести балочную

Программа ПАССАТ — стандарт де-факто в России и странах СНГ в области расчетов сосудов, аппаратов и теплообменников на прочность и устойчивость.

Удобство работы с программой, включая интуитивно понятный интерфейс, встроенную базу материалов и стандартных элементов, графическое трехмерное представление модели, автоматический расчет большинства параметров сделало «ПАССАТ» ведущей программой в РФ и странах СНГ. На сегодняшний день активными пользователями программы являются более 150 предприятий России, среди которых: НИИхиммаш (Москва), Петрохим Инжиниринг, ИркутскНИИхиммаш, Ленгипронефтехим, Нефтехимпроект, ВНИПИгазодобыча, ВНИПИнефть (Пермь), ЛУКОЙЛ-Нижегороднинефтепроект, Нижнекамскнефтехим, ТюменНИИгипрогаз, НИАП, Новгородский ГИАП, Ангарскнефтехимпроект, Волгограднефтемаш, Саянскхимпласт, Рязанская нефтеперерабатывающая компания, Гипрогазоочистка (Москва), ФосАгро, Самараоргсинтез, Казаньоргсинтез, Уралоргсинтез, Аммофос, Каустик, ЭМАльянс (Таганрог), Газпромнефть-ОНПЗ (Омск) и др.

конечно-элементную модель, которая используется для автоматического определения взаимного влияния соседних элементов конструкции, а так же для расчета перемещений и моментов.

Нормативные документы

Основные методики, используемые в программе ПАССАТ, соответствуют требованиям **ГОСТ Р 52857.XX–2007** [1].

Это семейство стандартов определяет нормы и методики основных видов расчетов: расчет обечаек (цилиндрических и конических), различных видов плоских и эллиптических днищ и крышек, укрепления отверстий, элементов теплообменных аппаратов, сосудов и аппаратов с рубашками, фланцевых соединений, а так же учет различных факторов и воздействий — внутреннего и внешнего давления, нагрузки на ортогональные штуцеры, опорные нагрузки на обечайку и днище, малоцикловые нагрузки, агрессивность среды и др.

Стоит отметить, что для расчетов ветровых и сейсмических воздействий, а также расчет на прочность элементов аппаратов колонного типа применяются ГОСТ Р 51273–99 [3] и ГОСТ Р 51274–99 [4].

ГОСТ Р 52857.XX–2007 является обобщением и уточнением 32 созданных ранее нормативно-технических документа: ГОСТов, ОСТов, РД, РТМ. В ПАССАТе реализованы как расчеты по новому сборнику ГОСТов , так и по предыдущим НТД.

Стандарт **СТО-СА-03.003-2009** по расчету на прочность и устойчивость горизонтальных и вертикальных аппаратов от сейсмических воздействий [2] разрабатывался специалистами ООО «НТП Трубопровод» и ОАО «СПбАЭП» в течение двух лет. Он обобщает ряд исследований и нормативов, и является единственным нормативом по сейсмическому расчету сосудов и аппаратов, учитывающему поведение жидкости внутри аппарата.

В отличие от аналогичных западных нормативов СТО-СА-03.003–2009 достаточно подробно описывает методику расчета. В нем изложены требования к определению расчетных нагрузок с учетом воздействия землетрясений, приведены критерии оценки прочности и устойчивости. Достаточное внимание уделено расчету опор и анкерных болтов.

Для сейсмического анализа сосудов используется линейно-спектральный метод. При землетрясении инерционная нагрузка на резервуары и их НДС определяются с помощью спектров коэффициентов динамичностей (спектров ответа) и величин максимальных сейсмических ускорений. Для этого применяется метод модальной суперпозиции, при котором любой искомый отклик системы (усилие, перемещение, реакция и т.д.) представляется некоторой комбинацией соответствующих модальных откликов.

В общем случае рассматривается содержащаяся в сосудах жидкость со свободной поверхностью. При расчете нагрузок в условиях землетрясения для частично заполненных жидкостью сосудов анализируются совместные колебания жидкости и сосуда. Здесь используется подход, при котором выделяются импульсивная и конвективная составляющие вынужденного движения жидкости при горизонтальном сейсмическом воздействии. При этом корпус сосуда считается недеформируемым (рис. 1).

Импульсивная составляющая соответствует связанным (синфазным) колебаниям корпуса сосуда и некоторой части содержащейся в нем жидкости. Конвективная составляющая соответствует низкочастотным колебаниям оставшейся части жидкости относительно корпуса сосуда. Таким образом, учитываются как минимум две формы колебаний для каждого из горизонтальных направлений (одна форма описывает импульсивную составляющую, другая – конвективную) и, по крайней мере, одна форма колебаний в вертикальном направлении.

В расчетной модели резервуара моделируется инерционная сила F_i, действующая на импульсивную массу M_i, расположенную на высоте

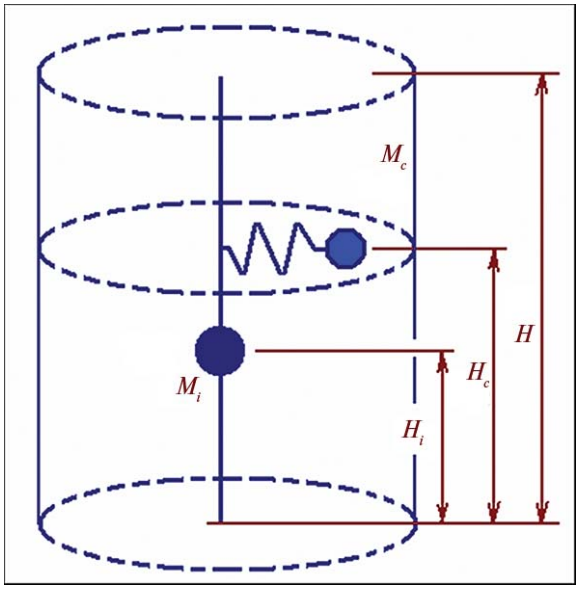


Рис. 1. **Расчетная модель вертикального цилиндрического резервуара с жидкостью**

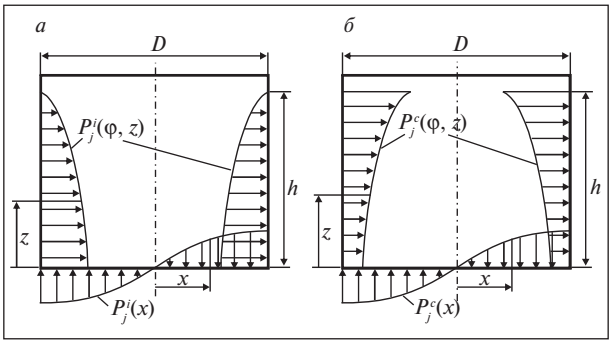


Рис. 2. **Импульсивное (*а*) и конвективное (*б*) гидродинамическое давление на стенки и днище сосуда**

H_i. Равнодействующая конвективного давления, действующая на высоте H_c, в механической модели резервуара моделируется инерционной силой F_c. Конвективная масса считается связанной со стенками резервуара через некоторую конечную жесткость.

Гидродинамическое давление на стенки и днище сосуда при сейсмическом воздействии в горизонтальной плоскости ($j = \{X, Y\}$) раскладывается на импульсивную $P_j^i(\varphi, z)$ и конвективную $P_j^c(\varphi, z)$ составляющие (рис. 2), где z — вертикальная координата, отсчитывающаяся от нижней точки сосуда.

Суммарное значение давления на днище сосуда от импульсивной и конвективной массы определяется по формуле

$$P_j(x) = \sqrt{P_j^i(x)^2 + P_j^c(x)^2}.$$

Любые полученные отклики системы (давление, усилие, напряжение, перемещение и т. д.) от различных форм колебаний системы следует суммировать как корень квадратный из суммы квадратов (ККСК) для получения полного результирующего отклика:

$$S_j = \sqrt{S_{j,1}^2 + S_{j,2}^2 + \ldots},$$

где $S_{j,k}$ — отклик системы по k-ой форме колебаний системы при воздействии в направлении $j = \{X, Y, Z\}$ (как от импульсивных, так и конвективных масс).

Полный отклик S с учетом сейсмического воздействия вдоль осей X, Y и Z вычисляется по методу ККСК:

$$S = S_{\text{ст}} \pm \sqrt{S_X^2 + S_Y^2 + S_Z^2},$$

или по методу 100-40-40:

$$S = \begin{cases} S_{\text{ст}} \pm S_X \pm 0.4 S_Y \pm 0{,}4 S_Z \\ S_{\text{ст}} \pm 0{,}4 S_X \pm S_Y \pm 0{,}4 S_Z \\ S_{\text{ст}} \pm 0{,}4 S_X \pm S_Y \pm 0{,}4 S_Z \end{cases},$$

где S_X, S_Y и S_Z — отклики системы на компоненты землетрясения вдоль осей X, Y и Z соответственно. Отклики должны быть не только одноименными, но и полученными для одних и тех же точек системы; $S_{\text{ст}}$ — отклик от статических воздействий в рабочих условиях.

Для сосудов категорий IIs и IIIs при расчете допускается положение, что на изделие одновременно действуют сейсмические нагрузки в вертикальном и одном из двух взаимно перпендикулярных горизонтальных направлений (принимают наиболее неблагоприятное для изделия направление) с учетом воздействия рабочих нагрузок. При этом полный отклик допускается определять по формуле:

$$S = \max(S_{\text{ст}} \pm S_X \pm S_Z;\ S_{\text{ст}} \pm S_Y \pm S_Z).$$

По методике **EN 13445-3** [6] рассчитываются эквивалентные осевые перемещения компенсатора с учетом угловых и поперечных деформаций кожуха при расчете сильфонного (линзового) компенсатора кожухотрубчатого теплообменного аппарата (рис. 3).

Общее эквивалентное перемещение в компенсаторе $\Delta x = |\Delta x_F| + |\Delta x_M| + |\Delta x_Q|$.

Стандарт Ассоциации «Ростехэкспертиза» **СА 03-004–07** [5] на расчет сосудов и аппаратов на прочность и устойчивость — первая попытка обобщить отечественную нормативную документацию по расчету сосудов и аппаратов (ГОСТ Р 52857.XX–2007 вышли через два года после СА 03-004–07).

Помимо расчетов, описанных в ГОСТ Р 52857.XX–2007, СА содержит методики, заимствованные из западных и отечественных нормативных документов для тех видов расчетов, которые не освещены в должной мере, например, расчет узлов врезки по WRC 107/297 [7, 8] или расчет аппарата колонного типа на резонансное вихревое возбуждение.

Для расчета некоторых элементов конструкции нет готовых методик: в нормативных документах рекомендуется использовать «методы строительной механики».

Таковым, например, является расчет крыши резервуара. В модуле «Резервуары» (появится в новой версии ПАССАТ) такой (автоматический) расчет реализован посредством метода конечных элементов. Крыша моделируется прямоугольными оболочечными элементами.

Обобщенные методы

Как уже упоминалось, ПАССАТ использует общие инженерные методы, направленые на автоматическое определение расчетных величин сложных конструкций.

Например, для определения изгибающих моментов и сил над и между седловыми опорами горизонтального аппарата, а также опорных нагрузок в вертикальных аппаратах используется метод конечных элементов. За счет использования универсальной балочной модели конструкция аппарата, количество и расположение опор может быть (в отличие от условий методики стандарта) произвольным.

Более подробно мы остановимся на методе Релея — Ритца [10], используемого для определения периода колебаний в расчете аппаратов колонного типа от ветровых и сейсмических нагрузок. Его использование позволило отказаться от чрезмерного упрощения при приведении аппарата колонного типа к модели с 2–3 участками для расчета по стандартной методике.

В качестве расчетной схемы колонного аппарата принимается консольный упруго защемленный стержень (рис. 4).

Аппарат по высоте разбивается на n участков постоянного поперечного сечения, при этом высота участка $h_i \le 10$ м. Количество элементов в расчетной схеме определяется автоматически и зависит от количества участков колонны с постоянным сечением, а также количества сосредоточенных масс (тарелок, насадок, обслуживающих площадок, лестниц, опор трубопроводов и др.).

Распределенные нагрузки от веса i-го участка колонны (включая изоляцию и рабочую среду) рассматриваются как сосредоточенные силы G_i, приложенные в центрах тяжести каждого из участков, а сосредоточенные массы G_{ik} прикладываются к краю i-го участка. Весовые нагрузки прикладываются вертикально, а ветровая P_i и сейсмическая S_i нагрузки — горизонтально. При эксцентричном действии нагрузки (от трубопроводов, площадок, лестниц и пр.) прикладываются соответствующие изгибающие моменты M_i.

Для аппаратов с произвольным количеством участков период собственных колебаний:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\sum(G_i y_i^2 + G_{ik} y_{ik}^2)}{g\sum(G_i y_i + G_{ik} y_{ik})}},$$

где $y_i(y_{ik})$ — перемещение i-го элемента только от весовой нагрузки G_i (G_{ik}), которая прикладывается в направлении, нормальном относительно оси аппарата (рис. 5).

Для определения линии прогиба расчетная схема представляет горизонтальный упруго защемленный стержень с жесткостными характеристиками сечений аппарата, нагруженный силами тяжести элементов аппарата.

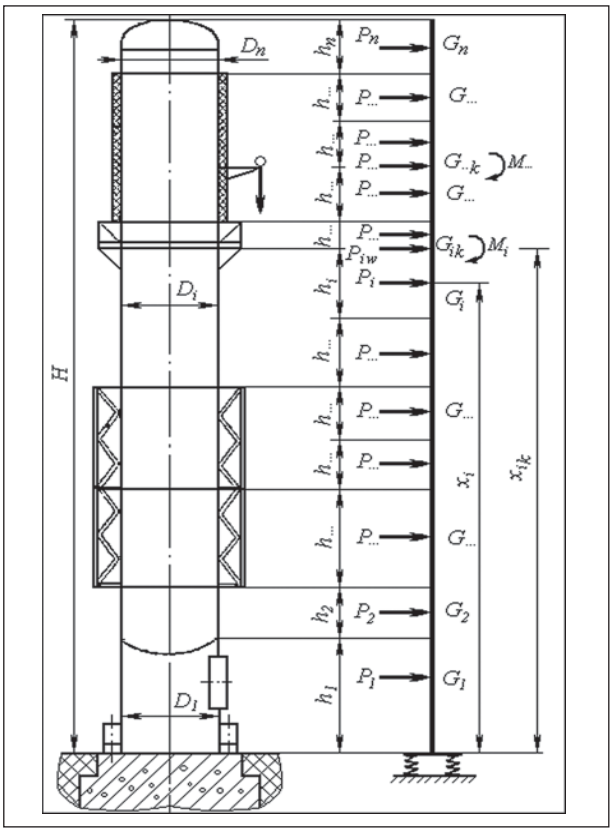


Рис. 4. **Расчетная схема аппарата колонного типа**

Перемещение центра тяжести каждого элемента определяется нагрузкой и расположением элемента.

Для определения линии прогиба весовые нагрузки от цилиндрической обечайки, изоляции или футеровки (при их наличии), а также веса жидкости принимаются распределенными, а нагрузки от внешних и внутренних устройств (площадки, группы тарелок, насадки и др.) — сосредоточенными.

Начальный угол поворота у основания аппарата:

$$\theta_0 = \frac{M_0}{C_F I_F},$$

$$M_o = \sum_{i=1}^{n}(G_i x_i + G_{ik} x_{ik}),$$

где M_o — суммарный изгибающий момент у основания аппарата; C_F — коэффициент сжатия неравномерности грунта, определяется по данным инженерной геологии.

Перемещение у основания колонны y_{ok} =0.

Нагрузки, действующие на i-ый элемент (i = 1, n – 1) со свободного конца определяются сосредоточенной силой G_{ik} (при их наличии), а

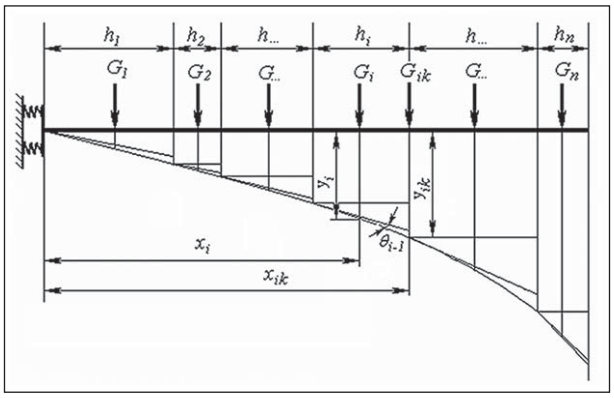


Рис. 5. **Расчетная схема для определения периода колебаний**

также перерезывающей силой и изгибающим моментом от последующих элементов:

$$Q_i = G_{ik} + \sum_{l=i+1}^{n} (G_l + G_{lk}),$$

$$M_{Gi} = \sum_{l=i+1}^{n} \left(G_l (h_l - h_{ik}) + G_{lk} (h_{lk} - h_{ik})\right).$$

Для последнего n-го элемента $Q_n = 0$, $M_{G_m} = 0$.

Для определения перемещений y_i (y_{ik}) в местах приложения соответствующих нагрузок G_i (G_{ik}) первоначально определяются силы и изгибающие моменты, действующие на каждый элемент, начиная с последнего.

Линейные и угловые перемещения в элементах аппарата определяются для цилиндрической обечайки (i-го элемента) в ее центре тяжести и на конце под действием распределенной и сосредоточенной нагрузки, а также изгибающего момента.

Вспомогательные расчеты

Традиционная сложность применения нормативных документов для практических расчетов заключается в необходимости определить множество вспомогательных исходных величин. К ним относятся:

- расчетная (приведенная) длина как гладкой обечайки, так и с кольцами жесткости;
- вес аппарата;
- определение опорных нагрузок;
- характеристики колец жесткости, включая эффективный момент инерции и пластический момент сопротивления поперечного сечения;

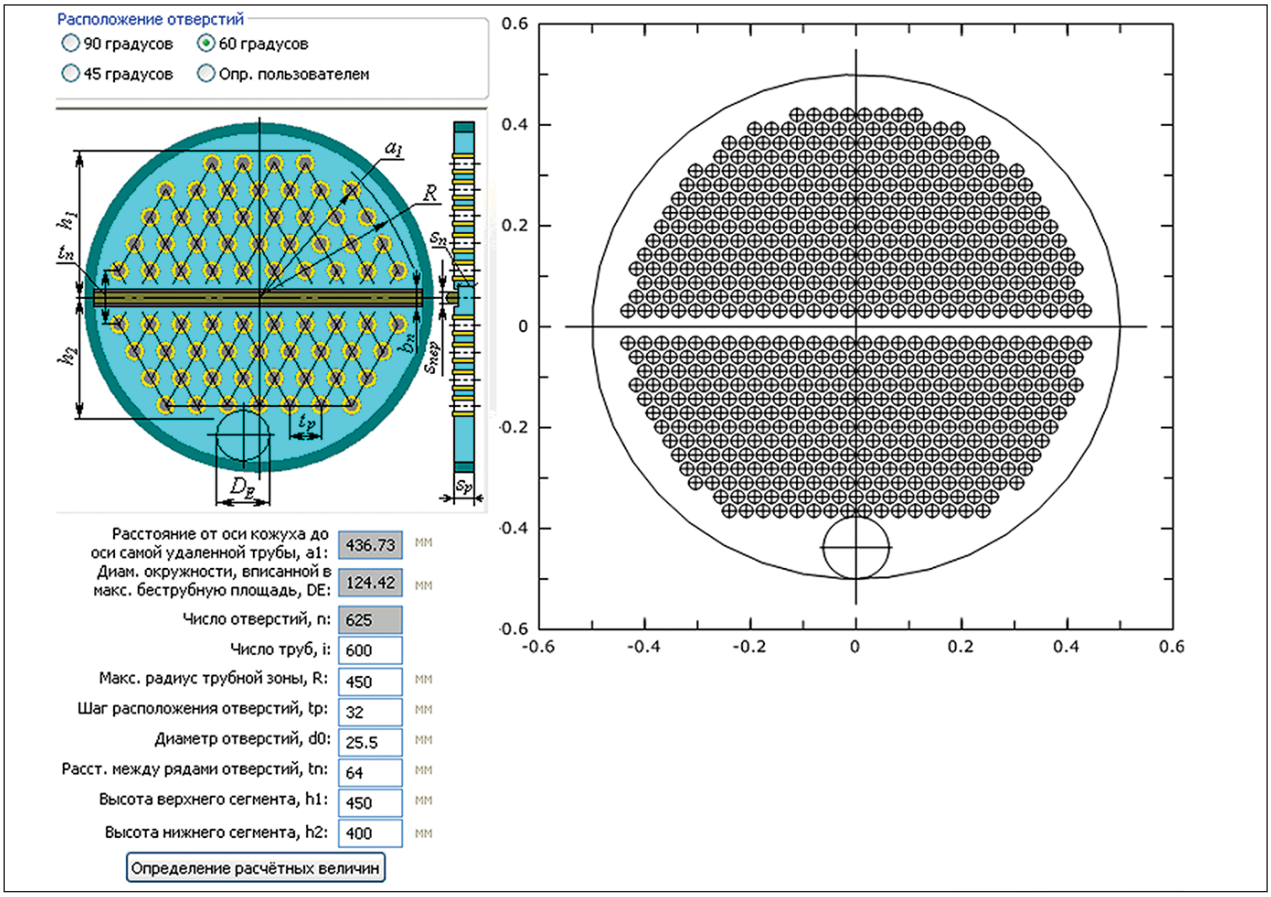


Рис. 6. **Определение диаметра окружности, вписанного в максимальную беструбную площадь**

• объем, занимаемый продуктом в зависимости от высоты налива;

• определение наиболее ослабленного сечения опорной обечайки аппарата колонного типа;

• определение наиболее ослабленного сечения и коэффициента ослабления плоской крышки;

• параметры трубных решеток, включая диаметр окружности, вписанный в максимальную беструбную площадь (рис. 6);

• проекции сил и моментов;

• учет взаимного расположения отверстий;

• другие параметры.

ПАССАТ выполняет такие расчеты автоматически, освобождая пользователя от трудоемких, порой весьма нетривиальных расчетов, часто требующих специальных знаний, либо однообразных рутинных операций.

Для выполнения этих расчетов используется ряд вычислительных процедур различной сложности. Среди них:

• интерполяционный поиск;

• метод Монте-Карло;

• конечно-элементное балочное моделирование;

• различные алгоритмы вычислительной геометрии;

Элементы проектирования

Основные виды расчетов, выполняемых ПАССАТ, являются поверочными. При проектировании сосудов и аппаратов требуется не только проверка заданной конструкции, но и подбор параметров. Для этих целей в ПАССАТ предусмотрены предварительные справочные расчеты, позволяющие определить некоторые расчетные параметры элементов. Эти расчеты выполняются в момент редактирования исходных данных, позволяя быстро оценить требуемые величины (рис. 7).

Запас прочности и устойчивости готовой конструкции можно оценить по эпюрам (рис. 8), которые выводятся в результатах расчета сосуда (аппарата).

Контроль исходных данных

Исходные данные проверяются в процессе моделирования и перед расчетом.

Модель проверяется на корректность геометрии и условия применимости методик.

Для упрощения ввода геометрических параметров и свойств материалов предоставляются

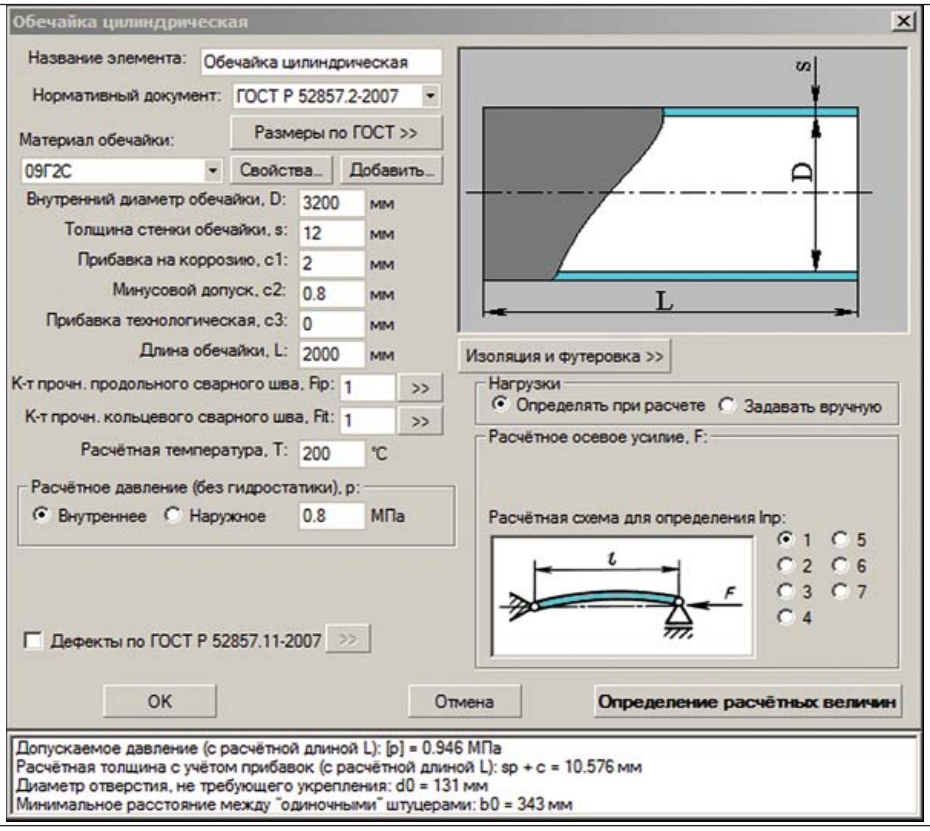


Рис. 7. **Редактирование цилиндрической обечайки**

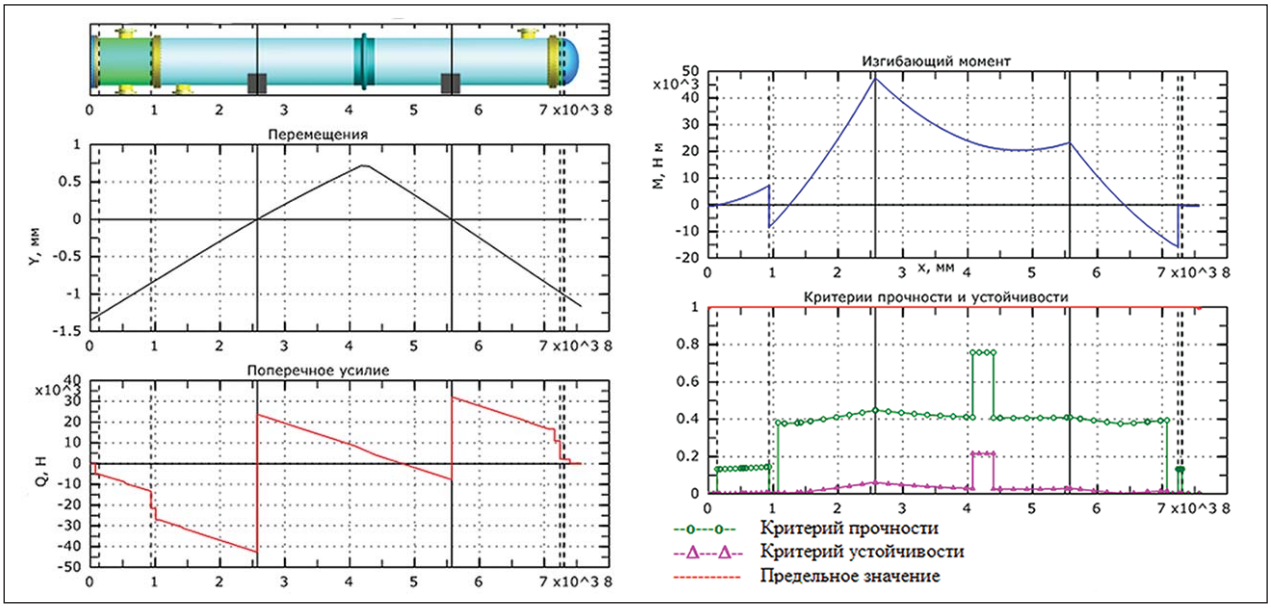


Рис. 8. **Эпюры распределения перемещений, поперечных усилий, моментов, критериев прочности и устойчивости корпуса ТА**

наборы стандартных материалов и изделий — ПАССАТ имеет расширяемые базы данных материалов, типоразмеров фланцев, крышек, опор, прокладок и т. д.

Ввод данных, нарушающих границы применимости методик, допускается, но в этом случае расчет и оценка работоспособности элемента не производится.

Литература

1. ГОСТ Р 52857.(1–10)–2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.
2. СТО-СА-03.003–2009. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на сейсмические воздействия.
3. ГОСТ Р 51273–99. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Определение расчетных усилий для аппаратов колонного типа от ветровых нагрузок и сейсмических воздействий.
4. ГОСТ Р 51274–99. Сосуды и аппараты. Аппараты колонного типа. Нормы и методы расчета на прочность.
5. СА 03-004–07. Расчет на прочность сосудов и аппаратов.
6. EN 13445-3:2009 Boiler and Pressure Vessel Engineering. Part 3: Design
7. WRC-107 Welding Research Council. Bulletin. «Local Stresses in Spherical and Cylindrical Shells due to External Loadings», 1979.
8. WRC-297 Welding Reserch Council. Bulletin. «Local Stresses in Cylindrical Shells due to External Loadings on Nozzles – Supplement to WRC Bulletin №107», 1987.
9. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1–2.
10. *Вайнберг М. М.* Вариационный метод и метод монотонных операторов в теории нелинейных уравнений. — М., 1972.

A. N. Krasnokutsky, A. I. Timoshkin

Vessels and Apparatuses Analysis Methods and Their Implementation in PASSAT Software

Methods and standards of stress and stability analysis of vessel, apparatuses and their elements are discussed, and their implementation in PASSAT software (developed by NTP Truboprovod) is described. Special attention is given to methods of seismic loads analysis, as well as other engineering methods (FEM, Rayleigh–Ritz method etc).

Key words: *PASSAT software, vessel, apparatus, column, heat exchanger, stress and stability analysis, algorithm, standard, wind loads, seismic loads, natural vibration frequency, finite element method, Rayleigh–Ritz method.*

Проблемы расчета прочности узлов врезки

А. Н. Краснокутский, А. И. Тимошкин

Статья посвящена методикам и подходам расчета прочности узлов врезки штуцеров в аппараты, использованные в разработанной ООО «НТП Трубопровод» программе «Штуцер-МКЭ». Приводятся сведения об относящихся к данному случаю нормативных документах. Описываются особенности реализованного в программе метода конечных элементов (МКЭ). Дается информация о расчетных возможностях программы.

Ключевые слова: прочность узлов врезки, допускаемые нагрузки, штуцер, сосуд, аппарат, метод конечных элементов, Штуцер-МКЭ.

При проектировании промышленных объектов, в том числе технологических установок химической и нефтеперерабатывающей промышленности, часто решаемой задачей являются расчеты на прочность узлов врезки патрубков трубопровода (штуцеров) в сосуд (аппарат).

Такие расчеты условно можно разделить на три вида:

- проверка работоспособности узла врезки при заданных нагрузках (от трубопровода),
- определение параметров узла врезки (жесткость и податливость) для их учета в прочностном расчете трубопровода,
- определение допускаемых нагрузок на узел врезки.

До последнего времени нормативная база расчета узлов врезки от действия внешних нагрузок и внутреннего давления фактически ограничивалась одним документом [8].

В настоящий момент имеется семейство стандартов [1]. В них для расчета используются коэффициенты интенсификации напряжений аналогично [3–7], и область применения ограничивается ортогональными врезками в цилиндрические обечайки и сферические днища, что охватывает только небольшую часть расчетных моделей.

В отсутствие достаточной нормативной базы проектировщики оборудования склонны занижать допускаемые нагрузки на штуцеры, а проектировщики трубопроводов — наоборот, завышать требования к их прочности. При отсутствии информации о жесткости штуцера его моделируют неподвижной («мертвой») опорой, что делает результат расчета трубопровода излишне консервативным и, как правило, приводит к увеличенным значениям нагрузок на узел врезки.

В качестве универсального метода анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) традиционно используется метод конечных элементов (МКЭ). С использованием МКЭ можно рассчитывать произвольные конфигурации узлов врезки штуцеров, включая штуцеры, врезанные под углом, не ограничиваясь цилиндрической и сферической формами обечаек, учитывать произвольные схемы укрепления отверстий, взаимное влияние близко расположенных штуцеров и т. д. На практике использовать МКЭ с применением универсальных программ (типа ANSYS) достаточно сложно, так как требуется принять решение о форме КЭ, произвести разбивку модели, выбрать метод расчета, оценить полученные напряжения. В процессе расчета МКЭ требуется отделение пиковых напряжений, возникающих в зонах концентрации (обычно место стыковки штуцера и обечайки) от местных локальных напряжений. Также необходим учет ограничений, связанных с закреплением модели, в том числе краевых эффектов. Сложность проведения таких расчетов предъявляет определенные требования к квалификации инженера.

В 2004 г. ООО «НТП Трубопровод» разработало для Ассоциации РОСТЕХЭКСПЕРТИЗА стандарт СА 0300407 [9]. В этом документе описана методика расчета прочности и жесткости места соединения штуцера с сосудом (аппаратом) с помощью МКЭ при статическом нагружении, в том числе определение жесткости врезки и допускаемых нагрузок на штуцер. Стандарт рекомендован к применению Ростехнадзором. Данная методика реализована в программе ООО «НТП Трубопровод» «Штуцер-МКЭ» и в течение ряда лет успешно применяется.

Для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) в качестве КЭ принят линейный четырехугольный оболочковый изотропный элемент постоянной толщины (аналогичен элементу SHELL43 программы ANSYS) (рис. 1).

Для оценки предельных величин локальных мембранных и изгибных напряжений используется имеющаяся нормативная база [1, 2].

«Пиковые» напряжения располагаются в очень малой зоне концентраторов напряжений, быстро уменьшаются, и на оценку прочности при

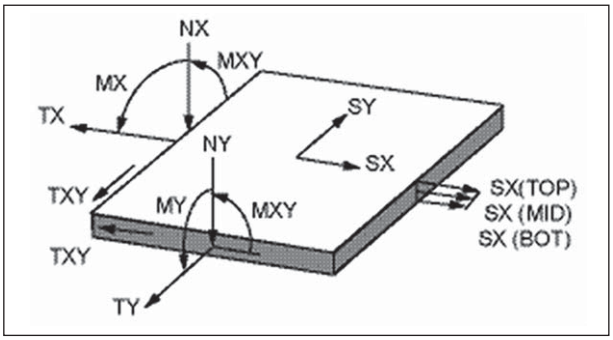


Рис. 1. **Оболочковый линейный конечный элемент**

статических нагрузках конструкций из пластичных материалов практически не влияют.

Для отделения зоны «пиковых» напряжений от зоны локальных используется следующий подход: конечные элементы, примыкающие непосредственно к линии пересечения патрубка и обечайки (элементы «сварки»), обладают переменной толщиной, при определении которой учитываются минимальные размеры сварного шва, а также толщины обечайки и патрубка (рис. 2).

При определении толщин элементов «сварки» следует учесть необходимость обеспечения равенства жесткостей сварного шва, обечайки и патрубка в зоне приварки.

С одной стороны, толщина элементов, примыкающих к патрубку (обечайке) приравнивается к толщине патрубка S_1 (обечайки S), с другой — определяется по формулам:

при $S \geq S_1$ $t = \max \begin{cases} 1{,}5\dfrac{1{,}5ss_1 + 1{,}5\Delta s + 1{,}5\Delta s_1 + \Delta^2}{2\Delta + 0{,}5s + 0{,}5s_1} \\ s + 0{,}7\Delta \\ s + 0{,}5s_1 \end{cases}$;

при $S < S_1$ $t = \max \begin{cases} 1{,}5\dfrac{1{,}5ss_1 + 1{,}5\Delta s + 1{,}5\Delta s_1 + \Delta^2}{2\Delta + 0{,}5s + 0{,}5s_1} \\ s_1 + 0{,}5\Delta \\ s_1 + 0{,}5s \end{cases}$. (1)

Максимальные значения местных напряжений определяются для элементов, непосредственно примыкающих к элементам «сварки». Напряжения для самих элементов «сварки» не определяются и не учитываются.

Расчетные значения нагрузок прикладываются в центре крышки штуцера (рис 3, *б*). Крышка представляет собой плоский диск высокой жесткости. Значения и направления сил и моментов соответствуют схеме рис. 3, *а*.

На результаты расчета значительное влияние оказывает частота конечно-элементной разбивки, особенно в области врезки патрубка в обечайку, где имеет место высокий градиент напряжений. С увеличением количества элементов (уровня разбивки), описывающих место врезки, возрастает точность распределения напряжений. Кроме этого, на точность полученных напряжений влияют тип врезки (наличие накладного кольца, угол наклона для косой врезки, и др.), разница толщин обечайки и патрубка, толщина сварного шва, краевой эффект и др.

Для оценки влияния перечисленных факторов на точность расчета был проведен ряд сравнительных расчетов для различных врезок и анализ их результатов. В результате выделено пять уровней разбивки. На рис. 4 показан пример конечно-элементной разбивки для радиальной врезки в цилиндрическую обечайку с накладным кольцом, соответствующий первому и пятому уровням разбивки.

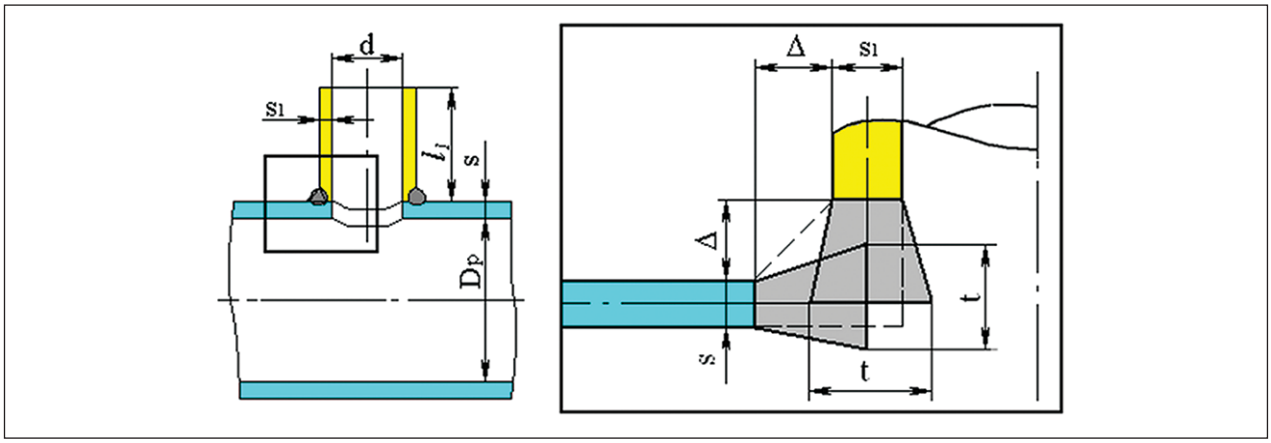


Рис. 2. **Размеры элементов в зоне врезки**

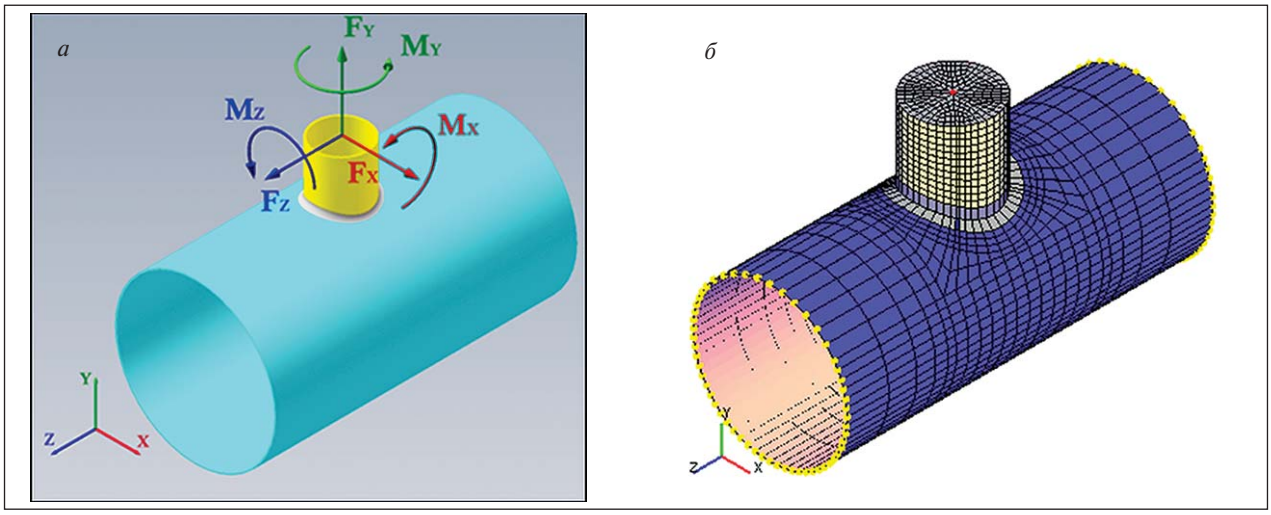


Рис. 3. **Схемы нагружения (*а*) и закрепления (*б*)**

Оценка результатов расчета проводилась по величине **относительной точности** для различных видов нагружения**.** Под относительной точностью понимается отношение полученных максимальных значений напряжений 5-го и текущего уровней разбивки. При этом относительная точность 5-го уровня разбивки принята равной 1,05.

На рис. 5 представлено влияние уровней разбивки узла врезки, изображенного на рис. 4, на относительную точность значений максимальных напряжений для различных нагрузок.

Пример распределения напряжений от действия момента M_z при разбивке 1-го и 5-го уровней для врезки с накладным кольцом показан на рис. 6.

Обобщая полученные результаты, можно констатировать, что при увеличении уровня разбивки значения максимальных напряжений возрастают. При этом максимальное влияние уровень разбивки оказывает на напряжения от

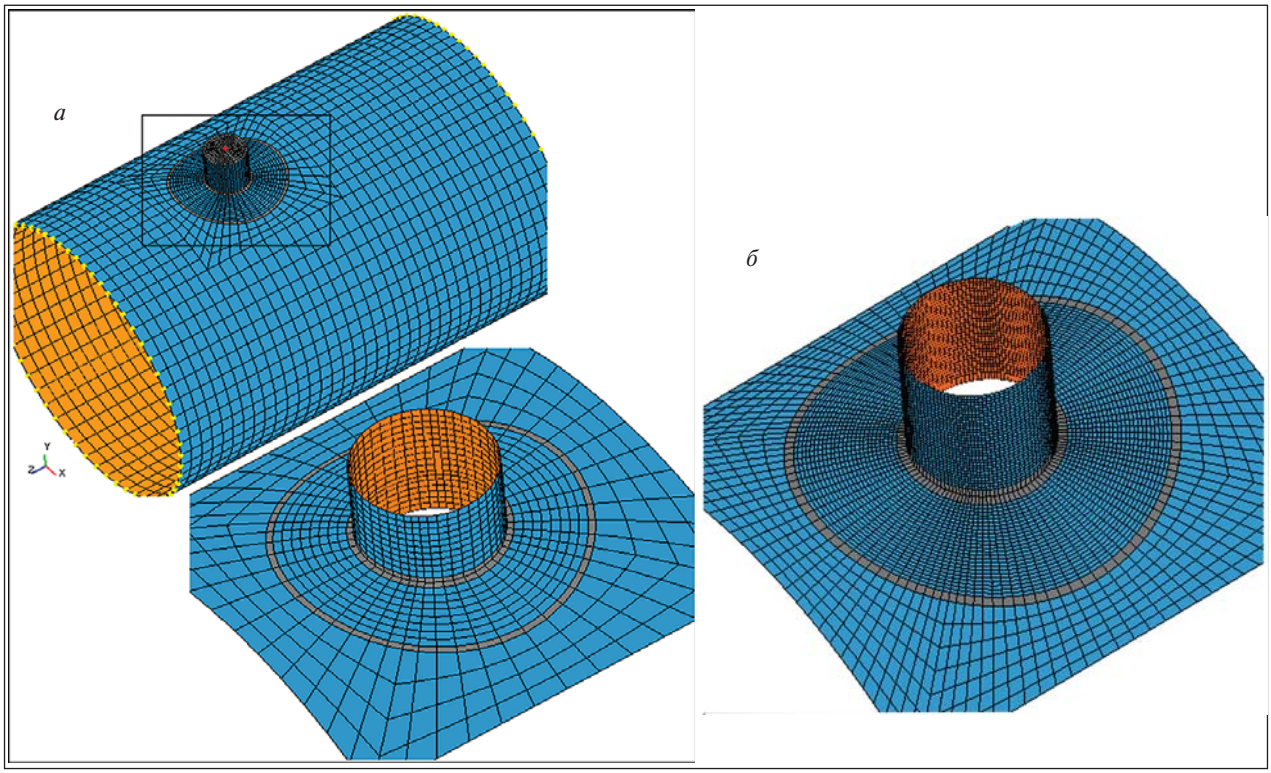


Рис. 4. **Конечно-элементная модель врезки, соответствующая 1-му (*а*) и 5-му (*б*) уровню разбивки**

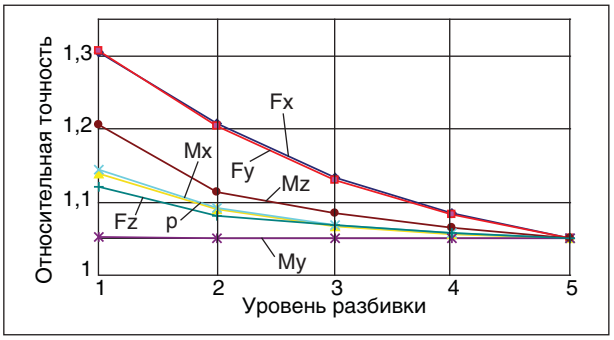


Рис. 5. **Зависимость полученных результатов НДС от уровня разбивки**

действия сил и моментов, минимальное – от давления. Влияние уровня разбивки возрастает при применении накладного кольца или при увеличении толщины обечайки относительно толщины патрубка.

Чтобы отразить влияние качества конечно-элементной разбивки на получаемые результаты, вводятся так называемые **коэффициенты разбивки**. Их значения получены на основании сравнительных расчетов, выполненных для различных узлов врезок. Для каждого уровня разбивки выбраны максимальные значения величин относительной точности.

Коэффициенты разбивки представляют собой дополнительный запас прочности при определении допускаемых напряжений для соответствующих уровней разбивки.

Ниже приведены принятые коэффициенты для различных уровней разбивки:

Уровень разбивки	Коэффициент разбивки
1	1,3
2	1,2
3	1,14
4	1,09
5	1,05

Для назначения допускаемых нагрузок, действующих на штуцер, необходимо провести расчеты по определению максимальных напряжений от действия единичных сил, моментов и давления поочередно. То есть при расчете от заданной единичной силы или момента все остальные нагрузки (включая давление) приравниваются к нулю. Для каждого вида напряжений (мембранных и общих) определяется минимальный запас прочности с учетом коэффициента разбивки. При определении допускаемой нагрузки его единичная величина умножается на полученный минимальный запас прочности.

Также определяются допускаемые нагрузки на штуцер при отсутствии давления. В этом случае допускаемые нагрузки определяются из условия, что при их *одновременном действии* на штуцер максимальные напряжения не превышают допускаемые. Практика расчетов показывает, что данное условие выполняется при величине нагрузок, равной 1/4 от допускаемых индивидуальных нагрузок.

При действии расчетного давления допускаемые нагрузки дополнительно уменьшаются на величину $(1 - p/[p])$, где p — расчетное давление; $[p]$ — допускаемая величина давления.

Полученные нагрузки формируют таблицу допускаемых нагрузок на штуцер при расчетном давлении, которая может быть рекомендована при назначении допускаемых нагрузок на штуцер в прочностных расчетах трубопроводных обвязок сосуда (аппарата).

Рассчитанные таким образом допускаемые нагрузки при расчетном давлении носят консервативный характер. Как правило, при их единовременном приложении с учетом давления максимальные напряжения составляют 50–80% от допускаемых величин. Поэтому при превышении допускаемых величин нагрузок для заключения

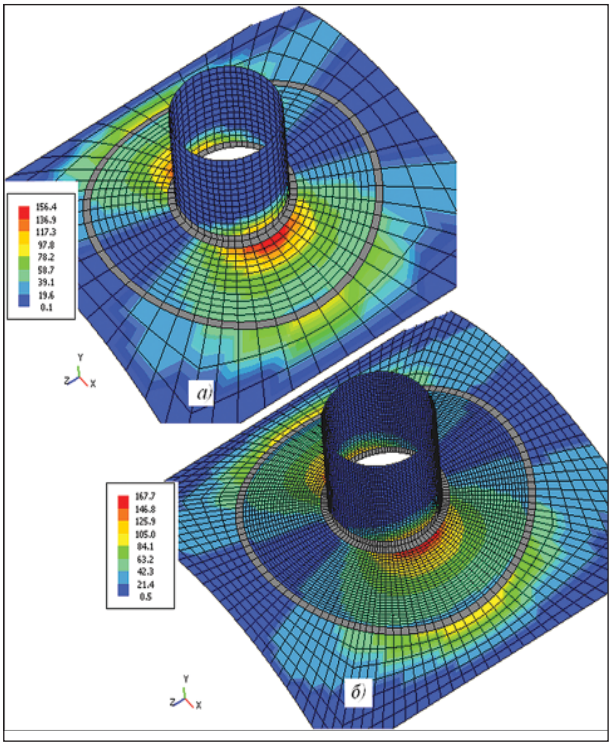


Рис. 5. **Общие (мембранные и изгибные) напряжения на наружной поверхности (МПа) при разбивке по 1-му (*а*) и 5-му (*б*) уровням от действия момента M_z = 10000 Нм**

о работоспособности врезки необходим дополнительный расчет с полученными нагрузками.

Жесткость (податливость) врезки определяется для точки приложения усилий (крышка штуцера) в каждом направлении в глобальной системе координат. При определении жесткости врезки суммарные прибавки не учитываются. Жесткость врезки определяется как отношение прикладываемых сил (моментов) к полученным соответствующим перемещениям (углам).

Программа «Штуцер-МКЭ» полностью реализует описанную методику и предлагает варианты расчетных моделей для расчета как сосудов (аппаратов) так и ответвлений трубопроводных магистралей, в том числе равнопроходных тройников.

Несущим элементом может быть:

- цилиндрическая обечайка горизонтального аппарата с закреплением по краям;
- цилиндрическая обечайка вертикального аппарата с закреплением нижней части;
- коническая обечайка;
- эллиптическое днище;
- полусферическое днище;
- плоское днище;
- магистраль трубопровода с закреплением одного конца и возможностью задания дополнительных нагрузок на другом.

Расчетные схемы штуцеров (ответвлений) включают возможность моделирования:

- проходящих и непроходящих штуцеров;
- накладных и вварных колец;
- задания внутренней части проходящего штуцера из другого материала;
- прямых и косых врезок.

При расчете может учитываться наличие коррозионной сероводородсодержащей среды. При этом дополнительно оцениваются растягивающие напряжения на внутренней поверхности узла врезки.

Внешние нагрузки могут задаваться в системах координат, связанных как с несущим элементом (магистралью), так и со штуцером.

Полученные напряжения обычно резко уменьшаются по мере удаления от зоны врезки, поэтому в Штуцер-МКЭ предусмотрена автоматическая неравномерная разбивка модели, более частая в области ожидаемой концентрации напряжений.

В качестве нормативного документа для оценки напряжений может использоваться [1] или [2] по выбору пользователя.

Кроме расчета по МКЭ в программе реализована возможность оценки прочности и жесткости радиальных штуцеров по [3–7], оценки прочности и устойчивости элемента, в который врезается штуцер, а также реализован расчет укрепления отверстия под действием только давления по нормативным документам [1].

Литература

1. ГОСТ Р 52857.(1-10)-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Сборник стандартов.
2. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 525с.
3. WRC-107 Welding Research Council. Bulletin. Local Stresses in Spherical and Cylindrical Shells due to External Loadings, 1979.
4. WRC-297 Welding Reserch Council. Bulletin. Local Stresses in Cylindrical Shells due to External Loadings on Nozzles – Supplement to WRC Bulletin №107", 1987.
5. BS-5500: 1976. Specification for Unfired fusion welded pressure vessels. British Standards Institution.
6. Bildy Les M. A Proposed Method for Finding Stress and Allowable Pressure in Cylinders with Radial Nozzles. PVP Vol. 399, ASME. — New York, 2000. — P. 77–82.
7. WRC-368 Welding Reserch Council. Bulletin. Stresses in Intersecting Cylinders subjected to Pressure, 1991. — 32 p.
8. РД 26.260.09–92. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность цилиндрических обечаек и выпуклых днищ в местах присоединения штуцеров при внешних статических нагрузках.
9. СА 0300407. Расчет на прочность сосудов и аппаратов.

A.N. Krasnokutsky, A.I. Timoshkin

Problems of Strength Analysis of Nozzle-shell Junctions

Different ways and methods of nozzle-shell junctions strength analysis, used in «Nozzle-FEM» software (developed by NTP Truboprovod), are discussed. Information on related regulation documents is given. The specific detailes of finite element method (FEM) implemented in the software are described. Calculation features of Nozzle-FEM program are presented.

Key words: *nozzle-shell junctions strength analysis, allowable loads, nozzle, vessel, apparatus, finite element method, Nozzle-FEM.*

Расчет потокораспределения для двухфазного газо-жидкостного течения в промышленных разветвленных трубопроводах

А. В. Бабенко, Т. Н. Гартман, Л. Б. Корельштейн

В статье предложена новая методика расчета потокораспределения при течении двухфазных газо-жидкостных смесей в трубопроводах сложной топологии, состоящая в расширении области применения метода глобального градиента на двухфазные потоки.

Ключевые слова: потокораспределение, разветвленный трубопровод, метод глобального градиента, газо-жидкостное течение, двухфазное течение.

Постановка задачи и метод Global Gradient Algorithm (GGA)

Напомним кратко суть метода GGA для расчета потокораспределения в гидравлических сетях [7, 8].

Алгоритм GGA был первоначально сформулирован профессором Болонского университета Ezio Todini в 1979 г. [1] и совместно с коллегами позднее предложен для практического использования в работах [2–4]. В 2004 г. он также был описан отечественными специалистами С. П. Епифановым, Н. Н. Новицким, В. П. Фроловым в монографии [5, раздел 1.6.4]. Этот алгоритм по форме весьма схож с предложенным Меренковым и Хасилевым методом МКРДГК в классической монографии [6], имеет такую же хорошую сходимость, как известный метод контурных расходов МКР [6], но при этом не требует анализа топологии трубопровода и выбора системы главных контуров. К настоящему времени метод успешно используется для расчета трубопроводов в разработанной ООО «НТП Трубопровод» и получившей широкое распространение в России программе «Гидросистема» [9, 10], а также при расчете наружных инженерных сетей в таких известных программах, как некоммерческая программа EPANET [15] и программы фирмы Haestad Methods [16].

Рассмотрим описывающий гидравлическую сеть связный ориентированный граф с m узлами и n ветвями. Тогда уравнения, описывающие цепь, можно записать в виде

$$A^T P = F(X), \quad (1)$$

$$A X = Q, \quad (2)$$

где A — матрица соединений; X — вектор массовых расходов по ветвям; Q — вектор внешних массовых притоков в узел; P — вектор узловых потенциалов (в качестве потенциалов может быть целесообразно выбрать давления, напоры или другие величины, в зависимости от типа трубопровода); $F(X)$ — вектор-функция потерь потенциала на ветвях; $f_j(x_j) = \Delta p_j$ — потери потенциала на j-ой ветви (пока будем считать, что она зависит только от расхода в той же ветви).

Метод GGA не является вполне универсальным, а применим только в случае, если заданными являются потенциалы в m_0 узлах ($1 \le m_0 \le m$) и величины притоков в остальных $m_1 = m - m_0$ узлах. Перенумеруем узлы так, чтобы сначала шли узлы с заданными притоками, а затем с заданными давлениями, тогда матрицы и вектора можно представить в блочном виде

$$A = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_0 \end{pmatrix}, \quad P = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_0 \end{pmatrix}, \quad Q = \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

и уравнения (1), (2) запишутся как

$$A_1^T P_1 = F(X) - A_0^T P_0, \quad (4)$$

$$A_1 X = Q. \quad (5)$$

Идея метода GGA заключается в решении нелинейной (вообще говоря) системы уравнений (4), (5) методом Ньютона, не выражая P_1 через X (как в МКР) или наоборот (метод узловых давлений — МД), а оставляя их независимыми переменными (отсюда слово «глобальный» в названии метода).

Линеаризуя вектор-функцию F из (4), (5) получаем

$$F(X^{(i)}) + D(X^{(i)})dX^{(i)} - A_0^T P_0 = = A_1^T P_1^{(i)} + A_1^T dP_1^{(i)}, \quad (6)$$

$$A_1 X^{(i)} + A_1 dx^{(i)} = Q_1, \quad (7)$$

откуда

$$dX^{(i)} = D(X^{(i)})^{-1}\left[A_1^T dP_1^{(i)} + A^T P^{(i)} - F(X^{(i)})\right] = = D(X^{(i)})^{-1}\left[A^T P^{(i+1)} - F(X^{(i)})\right]. \quad (8)$$

Подставляя $dX^{(i)}$ из (8) в (7), в итоге получим

$$M(X^{(i)})dP_1^{(i)} = Q_1 - A_1 X^{(i)} - -A_1 D(X^{(i)})^{-1}\left[A^T P^{(i)} - F(X^{(i)})\right], \quad (9)$$

где $M(X^{(i)}) = A_1 D(X^{(i)})^{-1} A_1^T$ — матрица Максвелла. Если $d_{jj} = df(x_j)/dx_j$ всегда положительны, $M(X^{(i)})$ является симметричной положительно определенной (и, следовательно, невырожденной), из (9) получаем

$$dP_1^{(i)} = M(X^{(i)})^{-1}\{Q_1 - A_1 X^{(i)} - \\ - A_1 D(X^{(i)})^{-1}\left[A^T P^{(i)} - F(X^{(i)})\right], \quad (10)$$

$$P_1^{(i+1)} = P_1^{(i)} + dP_1^{(i)} = M(X^{(i)})^{-1}\{Q_1 - A_1 X^{(i)} - \\ - A_1 D(X^{(i)})^{-1}\left[A_0^T P_0 - F(X^{(i)})\right]\} \quad (11)$$

и из (8)

$$X^{(i+1)} = X^{(i)} + dX^{(i)} = X^{(i)} + \\ + D(X^{(i)})^{-1}\left[A^T P^{(i+1)} - F(X^{(i)})\right]. \quad (12)$$

Из (11) и (12) легко проверить, что $A_1 X^{(i)} = Q_1$, то есть линейное уравнение 1-го закона Кирхгофа удовлетворяется уже после первой итерации (при том что начальное приближение $P_1^{(0)}$, $X^{(0)}$ может не удовлетворять обоим уравнения (4), (5)).

Таким образом, при $i \geq 1$ уравнения (10), (11) еще более упрощаются и принимают вид

$$dP_1^{(i)} = -M(X^{(i)})^{-1} \times \\ \times A_1 D(X^{(i)})^{-1}\left[A^T P^{(i)} - F(X^{(i)})\right], \quad (10')$$

$$P_1^{(i+1)} = P_1^{(i)} + dP_1^{(i)} = \\ = -M(X^{(i)})^{-1} A_1 D(X^{(i)})^{-1}\left[A_0^T P_0 - F(X^{(i)})\right]. \quad (11')$$

Тем самым метод GGA сводит задачу на каждой итерации к решению системы линейных уравнений (9) с матрицей Максвелла $M(X^{(i)})$ — являющейся симметричной, положительно определенной и разреженной (m_1 элементов по диагонали и не более n ненулевых элементов с каждой стороны диагонали) с диагональным доминированием. Хотя размерность матрицы Кирхгофа в «классическом» МКР меньше размерности матрицы Максвелла, число ненулевых элементов в матрице Максвелла может быть значительно меньше. Учитывая, что существуют готовые высокоэффективные алгоритмы и готовые библиотеки подпрограмм для факторизации и обращения таких матриц, использование уравнений с матрицей Максвелла оказывается более эффективным с вычислительной точки зрения. Более того, недавний прорыв в алгоритмах факторизации матриц данного вида (см., например [11]) открывает возможности эффективного расчета трубопроводных систем очень большой размерности.

Постановка задачи расчета изотермического двухфазного течения без массообмена

Рассмотрим гидравлическую цепь, описываемую связным ориентированным графом G с m узлами и n ветвями. Тогда уравнения, описывающие установившееся двухфазное газожидкостное изотермическое течение, можно записать в виде

$$A^T P = F(X, P, E),$$
$$AX = Q,$$

где E — вектор массовых газосодержаний по ветвям; $f_j(x_j, p_{н,j}, e_{н,j}) = \Delta p_j$ — потери потенциала на j-ой ветви, в данном случае зависящее от начального давления и газосодержания ветви.

При этом ориентация ветвей принимается совпадающей с направлением потоков (т. е. $x_j \geq 0$).

Заданными считаются потенциалы в m_0 узлах ($1 \leq m_0 \leq m$) и величины узловых расходов в остальных $m_1 = m - m_0$ узлах, а также массовые газосодержания всех притоков и начальные (в рассматриваемом изотермическом случае они же конечные) температуры на каждой ветви.

Опишем вид функции f для ветвей трубопроводов, используемых в случае перекачки двухфазного газо-жидкостного продукта.

Каждая ветвь считается состоящей из одного или нескольких последовательно соединенных элементов — прямых участков или местных сопротивлений. Для j-й ветви, включающей N_j элементов, давления последовательно рассчитываются вдоль ветви:

$$y_j = f_j\left(x_j, p_{н,j}, e_{н,j}\right) = \sum_{k=1}^{N_j} y_j^{(k)} = \\ = \sum_{k=1}^{N_j} f_j^{(k)}\left(x_j, p_{н,j}^{(k)}, e_{н,j}^{(k)}\right) \quad (12)$$

где $p_{н,j}^{(k)}$, $p_{к,j}^{(k)}$, $e_{н,j}^{(k)} = e_{к,j}^{(k)}$ — соответственно потенциал, и массовое газосодержание в начале и в конце k-го элемента ветви, а $y_j^{(k)}$ — падение давления на этом элементе.

Функция $f_j^{(k)}$ для отдельных элементов получаются интегрированием уравнения сохранения движения, лежащего в основе модели равновесного разделенного течения SFM (Separated Flow Model) [12].

Согласно рекомендациям Azzopardi [13, стр. 16], потери на ускорение при адиабатическом течении и при течении с кипением считаются по модели однородного течения (без «проскальзывания» фаз) HEM (Homogeneous Model) [12]. При расчете технологических трубопроводов с

двухфазными потоками в основном имеет место такой вид течения, поэтому было принято решение использовать эти рекомендации. Для замороженного течения, однако, авторам неизвестны подобные рекомендации, поэтому в дальнейшем возможна реализация более общего случая.

Для модели НЕМ

$$\varepsilon = (\rho_m/\rho_g)x. \qquad (13)$$

где ρ_g, ρ_m — плотность газа, жидкости, кг/м³; ε — объемное газосодержание/

Тогда средняя массовая плотность и удельный объем смеси равны:

$$\rho_m = \varepsilon\rho_g = (1-\varepsilon)\rho_l = [x/\rho_g + (1-x)/\rho_l]^{-1}, \quad (14)$$

$$u_m = xu_g = (1-x)u_l = [\varepsilon/u_g + (1-\varepsilon)/u_l]^{-1}, \quad (15)$$

С учетом (13)–(15), уравнение сохранения движения примет вид:

$$\frac{dp}{dl} = \left(\frac{dp}{dl}\right)_f - G^2\frac{du_m}{dl} - g\rho_{mv}\sin\theta - dp_{local}.$$

где dp/dl — общие потери давления на единицу длины, Па/м; $(dp/dl)_j$ — потери давления от трения на единицу длины, Па/м; dp_{local} — потери на местных сопротивлениях на единицу длины, Па; $\rho_{mv} = \varepsilon\pi_g + (1-\varepsilon)\rho_l$ — объемная плотность смеси, кг/м³; $G = W/A$ — массовая скорость потока, кг/(м² с); $W = W_g + W_l$ — массовый расход, кг/с; W_g, W_l — массовый расход газа, жидкости, кг/с; A — площадь поперечного сечения трубы, м²; g — ускорение свободного падения, м/с²; θ — угол подъема трубы относительно горизонта, рад.

При расчете участков конечные давления считаются по формуле (16). Расчет проходит итерационно, при этом длинные участки разбиваются на более мелкие для более точного учета изменения свойств продукта по ходу течения.

$$p_m^к = p_m^н - \Delta p_f - G^2(u_m^н - u_m^к) - \\ - Lg\rho_{mv}\sin\theta - \Delta p_{local}. \qquad (16)$$

В полученной смешанной модели динамические потери считаются по модели НЕМ, остальные потери (потери на трение, гидростатические потери, потери на местных сопротивлениях и др.) считаются по различным методикам двухфазного расчета, которые описаны в документации программы «Гидросистема» и статье [14].

Особенности расчета изотермического двухфазного течения без массобмена

Можно выделить три основные особенности расчета изотермического двухфазного течения без массобмена с точки зрения реализации для них метода GGA.

1. **Начальное приближение для массовых газосодержаний**. В случае одного узла с притоком массовое газосодержание на всех ветвях принимается равным массовому газосодержанию, заданному в этом притоке. В случае нескольких узлов с притоками массовое газосодержание в остальных ветвях для первой итерации GGA принимается равным усредненному значению заданных массовых газосодержаний в притоках:

$$e_0 = \left(\sum_{k=0}^{N} e_{пр}^{(k)}\right)/N,$$

где $e_{пр}^{(k)}$ — заданное массовое газосодержание в каждом из N притоков; e_0 — начальное приближение для остальных ветвей.

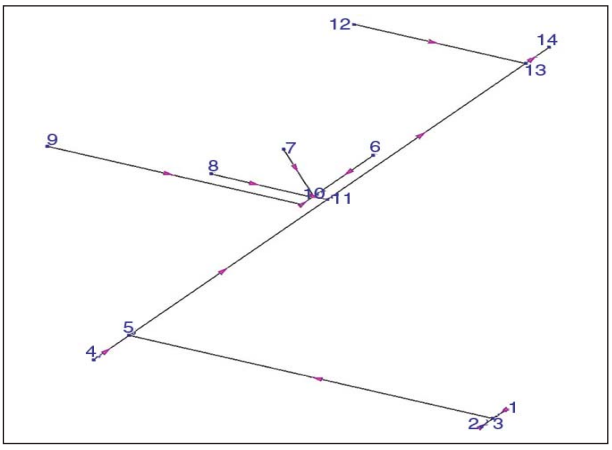
2. **Пересчет газосодержаний в узлах слияния и разделения потоков**. При итерационном расчете двухфазных потоков по методу GGA в случае задания различных значений массовых газосодержаний в источниках начальные газосодержания в остальных ветвях начинают зависеть от потокораспределения. Поэтому для корректного расчета потерь давлений на ветвях по формуле (12) возникает необходимость пересчета начальных газосодержаний $e_{н,j}$.

Изменение газосодержания происходит в узлах слияния потоков и зависит от расходов и газосодержаний на ветвях, входящих в узел.

$$e_{вых} = \sum_{k=0}^{N} W_g^{(k)} \Big/ \left(\sum_{k=0}^{N} W_g^{(k)} + \sum_{k=0}^{N} W_l^{(k)}\right), \qquad (17)$$

где $\sum_{k=0}^{N} W_g^{(k)}$ и $\sum_{k=0}^{N} W_l^{(k)}$, соответственно, суммы массовых расходов газа и жидкости в N входящих в узел ветвях.

На данный момент эффект возможной сепарации в узлах разделения потоков (в тройниках) не учитывается, поэтому газосодержание во всех выходящих из узла ветвях принимается равным $e_{вых}$.



Пример нефтесборного трубопровода

Табл. 1. **Список исходных данных по ветвям**

Ветвь	Узлы		Начальные значения				
	Начальный	Конечный	Внутренний диаметр, мм	Наружный диаметр, мм	Расход, кг/ч	Массовое газосодержание	Давление, МПа
Скв. 23 — вр. 1	1	3	30	89	5280	0,01	0,6083
Скв. 3. — вр. 1	2	3	80	89	1177	0,01	0,6071
Вр. 1 — вр. 2	3	5	80	89	6457	0,01	
Скв. 22 — вр. 2	4	5	80	89	2431	0,01	0,5771
Вр. 2 — вр.3	5	11	80		8888	0,01	
Скв. 18 — АГЗУ	7	10	80	39	1870	0,01	0,6167
Скв. 19 — АГЗУ	8	10	80	89	3740	0,01	0,6228
Скв. 16 — АГЗУ	9	10	80	89	5995	0,01	0,6393
Скв. 21 — АГЗУ	6	10	80	89	2838	0,01	0,6224
АГЗУ — вр. 3	10	11	150		14443		
Вр. 3 — вр. 4	11	13	150		23331		
Скв. 15 — вр. 4	12	13	80	89	8250	0,02	0,5207
Вр. 4 — УПС	13	14	200		31581		

Для учета изменения газосодержания на ветвях в алгоритм GGA на каждой итерации был добавлен пересчет газосодержания согласно описанной выше методике на всех узлах.

3. **Численное дифференцирование функции потерь на ветвях**. В процессе расчета по методу GGA необходимо вычислять производные функции потерь

$$\frac{dy_j}{dx_j} = \frac{df_j\left(x_j, p_{\text{н},j}, e_j\right)}{dx_j}. \qquad (18)$$

В случае двухфазных потоков аналитическое нахождение производной (18) затруднительно, поэтому производная рассчитывается численно, методом конечных разностей.

Проверка работоспособности методики

Описанная выше методика была реализована в программе «Гидросистема» и опробована в режиме бета-тестирования для расчета технологических трубопроводов и трубопроводов обвязки нефтегазовых месторождений. Результаты тестирования на реальных примерах показали эффективность и хорошую сходимость предложенного метода в области докритических течений.

В качестве примера приведен расчет нефтесборного трубопровода, состоящий из 13 ветвей, 8 источников и 1 потребителя (рисунок, табл. 1, 2). Заданы давления во всех источниках и потребителях, а также начальные приближения по расходам на всех ветвях, т. е. стоит задача расчета пропускной способности трубопровода.

Табл. 2. **Результаты по ветвям**

Ветвь	Расход, кг/ч	Массовое газосодержание	Длина, м	Диаметр, мм	Максимальные			Потери давления. кПа			Давление. МПа	
					Объемное газосодержание	Скорость, м/с	Число Маха	Трение	Местные	Динамические	начальное	конечное
Скв. 23 – вр. 1	5617,3	0,01	24,7	80	0,48	0,61	0,02	1,13	0,01	0	0,61	0,61
Скв. 3. – вр. 1	–1836,2	0,01	10	30	0,45	0,19	0 01	0 06	0	0	0,61	0,61
Вр. 1 — вр. 2	3781,1	0,01	530	80	0,48	0,41	0,01	11,70	0	0	0,61	0,60
Скв. 22 – вр. 2	–12217,4	0,01	90	80	0,51	1,42	0,04	18,31	0,02	0,03	0,58	0,60
Вр. 2 – вр.3	–8436,3	0,01	500	80	0,51	0,97	0,03	50,21	0,01	0,04	0,60	0,65
Скв. 18 – АГЗУ	23223,5	0,01	100	80	0,53	2,80	0,08	68,73	0,08	0,40	0 62	0,55
Скв. 19 – АГЗУ	23873,0	0,01	100,2	80	0 53	2,88	0,08	72 37	2,48	0,45	0,62	0,55
Скв. 16 – АГЗУ	13478,9	0,01	380,2	80	0,52	1,58	0,05	90,79	0,85	0,17	0,64	0,55
Скв. 21 – АГЗУ	19650,4	0,01	150	80	0,53	2,35	0,07	74,54	0,06	0 30	0,62	0,55
АГЗУ – вр. 3	80222,7	0,01	5	150	0,52	2,83	0,07	1,77	–100	0,01	0,55	0,65
Вр. 3 – вр. 4	717364	0,01	500	150	0 56	2,61	0 03	143 03	0,07	0,63	0,65	0,50
Скв. 15 – вр. 4	6183,3	0,02	250	80	0,64	0,95	0,03	23,73	0,01	0,03	0,52	0,50
Вр. 4 – УПС	77969,7	0,01079	60	200	0,57	1,64	0,05	5,60	0,03	0,01	0,50	0,49

Температура во всех ветвях принимается равной 20°С. Массовое газосодержание задано во всех источниках, т.е. массовое газосодержание в потребителе должно рассчитаться. В качестве продукта задана двухфазная смесь водо-нефтяной эмульсии и попутных нефтяных газов.

Как видно из табл. 2, расходы на ветвях в процессе расчета были пересчитаны. В некоторых ветвях расход получился отрицательный, что говорит о том, что направление ветви в исходных данных задано неверно. Также в табл. 2 видно, что массовые газосодержания на промежуточных ветвях и в потребителе были расчитаны.

Данный расчет сошелся за 7 итераций GGA, что вполне приемлемо для практических расчетов.

Выводы

Предложена методика расчета потокораспределения двухфазных газо-жидкостных смесей в трубопроводах сложной топологии. Особенность методики состоит в расширении области применения метода GGA на двухфазные потоки. На данный момент предложенный метод ограничен применимостью только к изотермическому двухфазному течения без учета массобмена в трубопроводах без рециклов. Методика реализована в расчетной библиотеке программы «Гидросистема» и проверена на ряде практических примеров.

Литература

1. *Todini E.* Un metodo del gradiente per la verifica delle reti idrauliche // Bollettino degli Ingegneri della Toscana. — 1979. — n. 11:11-14.
2. *Todini E., Pilati S.* A gradient algorithm for the analysis of pipe networks. In B. Coulbeck and C.H. Orr (eds) Computer Applications in Water Supply. — Vol. 1 (System analysis and simulation). — London: John Wiley & Sons, 1988. —P. 1–20.
3. *Salgado R., Todini E., O'Connell.P.E.* Comparison of the gradient method with some traditional methods for the analysis of Water Supply and Distribution. In B. Coulbeck and C.H. Orr (eds) Computer Applications in Water Supply. — Vol. 1 (System analysis and simulation). — London: John Wiley & Sons, 1988. — P. 38–62.
4. *Todini E. A* Unifying View on the Different Looped Pipe Netwrk Analysis Algorithms. In R. Powell and K.S.Hindi (eds) Computing and Control for the Water Industry. Baldock, UK: Research Studies Press Ltd., 1999. — P. 63–80.
5. Трубопроводные системы энергетики. Управление развитием и функционированием. — Новосибирск, Наука, 2004.
6. *Меренков А. П., Хасилев В. Я.* Теория гидравлических цепей. — М.: Наука, 1985.
7. *Корельштейн Л. Б., Пашенкова Е. С.* Опыт использования метода глобального градиента при расчете установившегося изотермического течения жидкостей и газов в трубопроводах. В кн.: Трубопроводные системы энергетики. — Новосибирск, Наука, 2008. — С.80–89.
8. *Корельштейн Л. Б., Пашенкова Е. С.* Опыт использования методов глобального градиента и декомпозиции при расчете установившегося неизотермического течения жидкостей и газов в трубопроводах. В кн.: Трубопроводные системы энергетики. Математическое моделирование и оптимизация. — Новосибирск, Наука, 2010. — С. 103–114.
9. *Юдовина Е. Ф., Пашенкова Е. С., Корельштейн Л. Б.* Программный комплекс «Гидросистема» и его использование для гидравлических расчетов трубопроводных систем. В кн.: Математическое моделирование трубопроводных систем энергетики // Тр. XII Всеросс. научн. семин. с междунар. участ. «Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем», 20–26 сентября 2010 г. — Иркутск, ИСЭМ СО РАН, 2010. — С. 475—485.
10. *Корельштейн Л. Б., Юдовина Е. Ф.* «Гидросистема»: в преддверии фазового перехода // CADmaster. — 2010. — №3. — С. 82–86.
11. *Koutis I., Miller G. L., Peng R.* A nearly m log n time solver for SDD linear systems. 52nd Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science. (http://arxiv.org/abs/1102.4842).
12. *Уоллис Г.* Одномерные двухфазные течения. — М.: Мир, 1972. — 440 с.
13. *Azzopardi B. J.* Gas-liquid flows. — USA, Begell House, Inc, 2006. — 331 с.
14. *Бабенко А. В., Корельштейн Л. Б., Гартман Т. Н.* Математическое моделирование установившегося течения двухфазных газожидкостных потоков в промышленных трубопроводах. Часть 1: Расчет ветвей. Химическая технология. В печати.
15. http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/epanet.html.
16. http://www.bentley.com/ru-RU/Products/Water+and+Wastewater+Network+Analysis+and+Design.

A.V. Babenko, T.N. Gartman., L.B. Korelstein

Flow Distribution Calculation for Two-phase Gas-liquid Flow in Industrial Branched Pipelines

The new calculation method of two-phase flow distribution is proposed. The proposed method is the extension of sphere of application of Global Gradient Algorithm (GGA) for two-phase flow.

Key words: *pipeline, piping network, flow distribution, Global Gradient Algorithm, gas-liquid flow, two-phase flow, frozen flow.*

Альбомы типовых теплоизоляционных конструкций и их интеграция с программой «Изоляция»

И. Е. Татаринцева, С. Ю. Лисин

Рассмотрена новейшая серия альбомов чертежей типовых теплоизоляционных конструкций трубопроводов, выпущенная ведущей организацией в области тепловой изоляции — ОАО «Теплопроект». Описаны возможности интеграции этих альбомов с программой «Изоляция». Приведены примеры расчета количества материалов на основе чертежей теплоизоляционных конструкций.

Ключевые слова: альбомы чертежей типовых конструкций, расчет количества материалов, тепловая изоляция трубопроводов, проектирование теплоизоляции, теплоизоляционная конструкция, теплоизоляционные материалы, теплоизоляция.

Программа «Изоляция» для расчета и проектирования тепловой изоляции оборудования и трубопроводов, разработанная ООО «НТП Трубопровод», стала сегодня стандартом дефакто на рынке России и СНГ. На протяжении многих лет она помогает сотням специалистов по проектированию технической тепловой изоляции успешно справляться с самыми разными по сложности задачами*.

Неоспоримым плюсом «Изоляции» является ее открытость для пользователя, который может настроить программу для применения разнообразных теплоизоляционных материалов и конструкций, предпочтительных для его заказчиков и проектов. При этом разработчики постоянно следят за новинками на рынке теплоизоляционных материалов и в сотрудничестве с их изготовителями и поставщиками обновляют базу данных программы. Это делает «Изоляцию» всегда актуальной и применимой для широкого круга пользователей.

Однако развитие рынка материалов теплоизоляционных конструкций создает для проектировщиков тепловой изоляции не только новые возможности, но и определенные проблемы.

Одной из существенных трудностей, с которой столкнулись в последние годы отечественные специалисты по проектированию технической теплоизоляции (в том числе пользователи программы), было отсутствие современных стандартизированных альбомов типовых теплоизоляционных конструкций. Такие альбомы являются основой для проектирования теплоизоляции, способствуют детальному пониманию проектировщиками всех особенностей применения и деталей тех или иных теплоизоляционных конструкций и являются основным документом для проведения работ по их монтажу. При необходимости проектные организации передавали в составе проектной документации по тепловой изоляции соответствующие ссылки на отдельные чертежи таких альбомов или копии этих чертежей для их использования монтажными организациями.

Основным разработчиком таких альбомов был коллектив специалистов ОАО «Теплопроект». В 80-х годах прошлого века ими был подготовлен целый комплекс серий альбомов и типовых проектов [2–9], охватывающих практически все важнейшие сферы применения и варианты конструкций технической тепловой изоляции. Эти документы были официально утверждены Минмонтажспецстроем СССР и нашли широкое применение, в том числе были использованы и при разработке программы «Изоляция». Однако в них предполагалось применение ограниченного круга производившихся в то время стандартизированных теплоизоляционных материалов.

С появлением на рынке широкого разнообразия теплоизоляционных материалов и конструкций, данные документы в определенной степени морально устарели, а в 1997 г. к тому же утратили официальный статус. Таким образом, в области чертежей типовых теплоизоляционных конструкций образовался вакуум нормативно-методических документов, который проектировщики вынуждены были заполнять своими силами.

Частичным решением этой проблемы был выпуск Теплопроектом различных специализированных технических рекомендаций (так называемых ТР) по заказу тех или иных изготовителей теплоизоляционных материалов (см. [10–21]). НТП Трубопровод активно использовал данные документы, содержащиеся в них рекомендации и чертежи при работе над БД материалов и правилами выбора материалов программы «Изоляция». Однако они все же не могли в полной мере удовлетворить потребности проектировщиков теплоизоляции.

Одновременно в ОАО «Теплопроект» велась многолетняя работа над новыми сериями альбомов типовых теплоизоляционных конструкций,

учитывающими все многообразие современных теплоизоляционных материалов. В прошлом году первая такая серия 7.903.9-6.11 [1] была опубликована и была официально зарегистрирована как соответствующий нормативный документ по строительному проектированию в ОАО «ЦПП» Минрегиона.

Серия 7.903.9-6.11 заменяет старые серии [2, 4] и частично [5] (в части элементов трубопроводов).

В 2012 г. между ООО «НТП Трубопровод» и ОАО «Теплопроект» было заключено новое соглашение о сотрудничестве, согласно которому ООО «НТП Трубопровод» становится одним из дистрибьюторов альбомов новой серии. Альбомы будут предложены для приобретения всем пользователям программы «Изоляция». При этом разработчики программы «Изоляция» модернизируют поставляемые с программой правила выбора в соответствии с [1], в том числе, модифицируют и усовершенствуют расчетные формулы количеств материалов и работ в соответствии с приведенными в альбомах детальными чертежами теплоизоляционных конструкций.

Рассмотрим подробно, что же включают в себя новые альбомы.

Серия 7.903.9-6.11 (Тепловая изоляция трубопроводов с положительными температурами) состоит из трех выпусков:

- Выпуск 0. «Материалы для проектирования»;
- Выпуск 1. «Тепловая изоляция трубопроводов. Рабочие чертежи»;
- Выпуск 2. «Тепловая изоляция арматуры и фланцевых соединений. Рабочие чертежи».

Выпуск 0 включает в себя 3 части:

- теплоизоляционные материалы для промышленной изоляции;
- конструкции тепловой изоляции трубопроводов и оборудования;
- проектирование тепловой изоляции.

В первой части представлена классификация теплоизоляционных материалов, их современная номенклатура и технические характеристики. Даны рекомендации по выбору материалов для теплоизоляционных конструкций оборудования и трубопроводов согласно СНиП 41-03–2003 [22] и СП 41-103–2000 [23].

Во второй части рассмотрены конструкции промышленной тепловой изоляции, классификация и технические требования к материалам в этих конструкциях. Даны рекомендации по применению того или иного теплоизоляционного материала.

Третья часть включает общие положения по проектированию тепловой изоляции, определение толщины теплоизоляционного слоя по различным критериям расчета, правила конструирования, а также монтаж теплоизоляционной конструкции.

Выпуск 1 является наиболее объемным. В нем рассмотрены типовые конструкции, наиболее часто встречающиеся в производстве. Все рабочие чертежи конструкций тепловой изоляции разработаны для трубопроводов с температурой транспортируемых веществ от 20 до 700°С и предназначены для использования при проектировании и монтаже конструкций тепловой изоляции трубопроводов промышленных предприятий, тепловых сетей.

В альбом включены конструкции тепловой изоляции для трубопроводов наружным диаметром от 18 до 1420 мм с теплоизоляционным слоем из волокнистых теплоизоляционных материалов (изделия из минеральной и базальтовой ваты, стеклянного штапельного волокна и базальтового супертонкого волокна), а также с теплоизоляционным слоем из вспененного каучука или полиэтилена, изделиями из пеностекла и пенополиуретана. К каждому рабочему чертежу прилагается спецификация с указанием всех используемых в теплоизоляционной конструкции материалов и изделий, а также технические требования. Очень удобным является то, что авторы приводят таблицу с наименованием теплоизоляционных материалов, наиболее применимых в данной конструкции. Также приводятся таблицы с количеством материалов и изделий, которое рассчитано на 10 погонных метров трубопровода.

Выпуск 2 включает в себя рабочие чертежи тепловой изоляции арматуры и фланцевых соединений. Как и в выпуске 1, имеются таблицы с указанным количеством материалов и изделий, рассчитанным на изоляцию одного фланцевого изделия или одной арматуры.

На основе данных альбомов типовых конструкций планируется внести изменения в алгоритм расчета и возможности задания расчетных формул в правилах выбора материалов программы «Изоляция». Особенно это важно для расчета материалов опорно-разгружающих и крепежных конструкций, а также разного рода вспомогательных материалов, которые в настоящее время считаются в программе приближенно, от общего объема теплоизоляционного слоя или площади поверхности покровного слоя. Новые возможности и уточненные формулы, учитывающие специфику конкретных теплоизоляционных

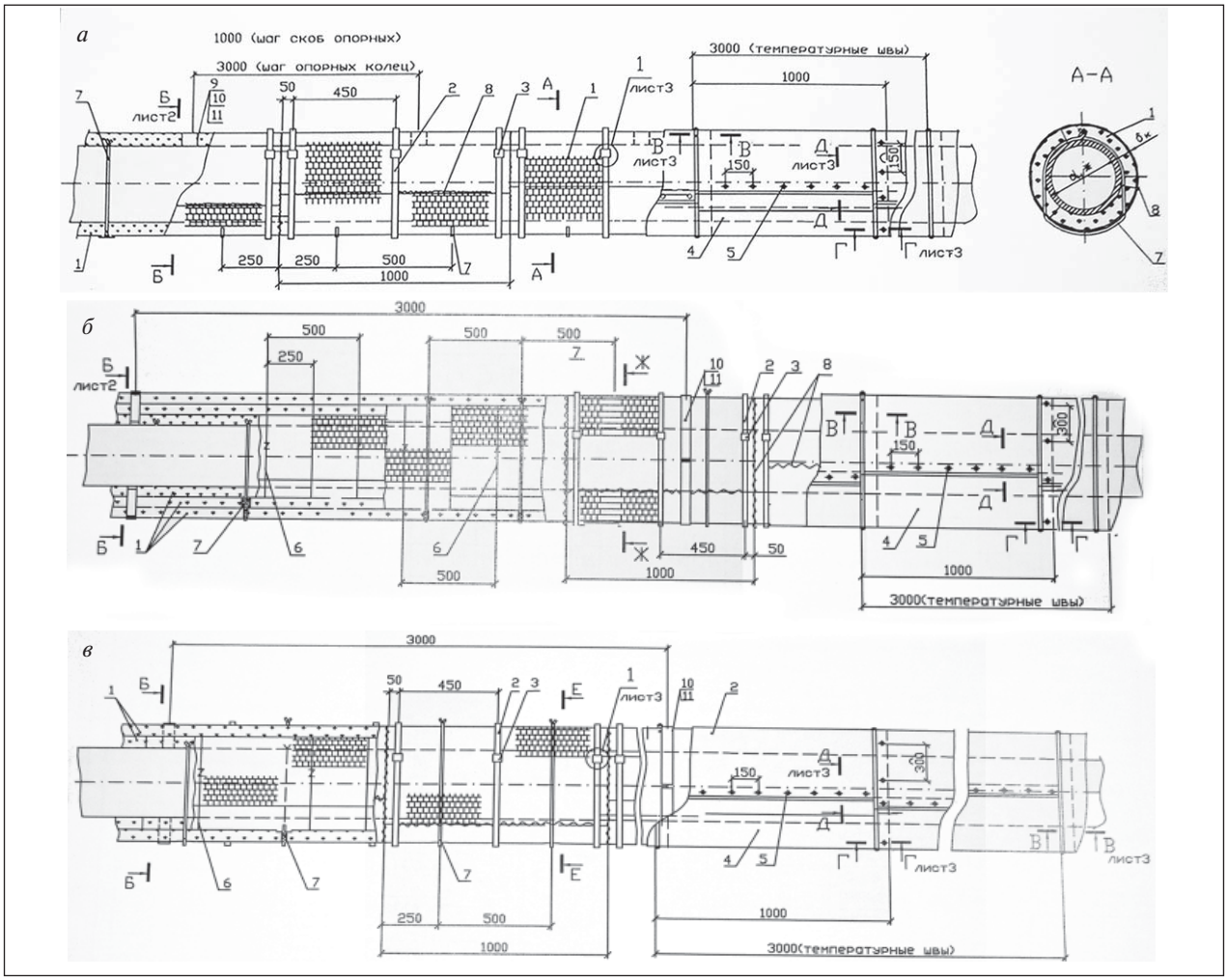


Рис. 1. **Тепловая изоляция трубопроводов матами минераловатными прошивными в обкладках в один (*а*), два (*б*) и три (*в*) слоя**

конструкций, позволят значительно повысить точность расчета количества соответствующих материалов и работ.

Рассмотрим, как может выглядеть такой расчет, на примере конструкции «Тепловая изоляция горизонтальных трубопроводов с наружным диаметром от 273 до 1420 мм матами минераловатными прошивными в обкладках».

Маты минераловатные прошивные в обкладках применяются для того, чтобы повысить формостабильность конструкции. Их применение также позволяет сохранить равномерность толщины изоляции при установке бандажей, предохраняет изделия от повреждения при креплении проволокой. Маты могут применяться при температуре изолируемой поверхности до 700°С в зависимости от вида обкладки и материала прошивки.

Как видно из рис. 1, тепловая изоляция в этой конструкции может состоять из одного, двух или трех слоев. На чертеже обозначены все составляющие теплоизоляционную конструкцию элементы, названия которых вынесены в спецификацию (табл. 1).

Спецификация (табл. 1) включает в себя номер позиции элемента согласно чертежам, наименование и количество элементов для данной теплоизоляционной конструкции, а также ссылки на другие чертежи в альбомах, технические требования или технические описания.

Итак, перед нами чертежи теплоизоляционной конструкции с различным количеством слоев и наименования используемых материалов. Теперь, исходя из чертежей, рассчитаем количество материалов, необходимых для теплоизоляционной конструкции трубопровода. Все расчеты ведутся для участка прямой трубы.

Табл. 1. **Спецификация**

№ п.п.	Обозначение	Наименование	Количество	Масса ед., кг	Примечание
1		Мат прошивной из минеральной ваты теплоизоляционный М2-100, М2-125 ГОСТ 21880–94			см. ТТ п.5
2		Бандаж Лента 0,7×20 ГОСТ 3560–73			
3		Пряжка Сталь ОЦ-0,8-Ст3 ГОСТ 14918–80	30		
4		Покрытие Лист АД1.Н-0,8 ГОСТ 21631-76			см. ТО п.2,п.6
5		Винт 4×12.04.019 ГОСТ 10621–80			
6		Кольцо Проволока 2-О-Ч ГОСТ 3282–74			
7		Подвеска Проволока 2-О-Ч ГОСТ 3282–74			
8		Сшивка Проволока 0,8-О-Ч ГОСТ 3282–74			
9	7.903.9-6.11-44	Скоба опорная	30		
10	7.903.9-6.11-39	Кольцо опорное	3		
11	7.903.9-6.11-40	Элемент опорного кольца тип I	6		см. ТТ п.6
12		Болт М12х50.36.019 ГОСТ 7798–70	6	0,062	
13		Гайка М12.4.019 ГОСТ 5915–70	6	0,015	

Расчет количества теплоизоляционного материала

Начнем с расчета объема матов прошивных из минеральной ваты в обкладке с одной стороны М2-100, М2-125 ГОСТ 21880–94, для которого используются формулы:

$$V_к = \pi l \frac{(d_н + 2\delta_к)^2 - d_н^2}{4},$$

$$V_i = K_c \pi l \frac{(d_н + 2\delta_к)^2 - d_н^2}{4},$$

где $d_н$ — наружный диаметр трубопровода, м; $V_к$ — объем теплоизоляционного материала в конструкции, м³; V_i — объем теплоизоляционного материала с учетом коэффициента уплотнения, м³; $\delta_к$ — толщина теплоизоляционного слоя в конструкции, м; l — длина трубопровода, м; K_c — коэффициент уплотнения.

Необходимо отметить, что в программе производится расчет именно реального коэффициента уплотнения, который отличается от K_c, и с учетом этого производится расчет заказного количества материала изоляции.

Расчет бандажей

Расчет бандажей (рис. 2), изготовленных из ленты 0,7×20 ГОСТ 3560–73, производится по формуле:

$$M_{банд} = \pi(d_н + 2\delta_к + 0{,}04)\ a \cdot b \cdot \rho \cdot n \cdot l,$$

где $M_{банд}$ — масса расходуемой на бандажи ленты, кг; a = 0,02 — ширина ленты, м; b = 0,0007 — толщина ленты, м; ρ = 7850 — плотность низкоуглеродистой стали, кг/м³; 0,04 — добавочная длина, учитывающая нахлест ленты бандажа, м (рис. 2, И-И); n — количество бандажей на 1 м трубопровода, шт (округление до целого числа производится в большую сторону)

Уточним метод нахождения этого целого числа бандажей. Исходя из того, что на крепление одного мата в конструкции необходимо 3 бандажа (см. рис 1), найдем их количество, которое требуется для произвольной длины трубы:

$$n = 3\left[\frac{l}{l_{мата}}\right] + \begin{cases} 0, \text{ если } l - l_{мата}\left[\frac{l}{l_{мата}}\right] = 0 \\ 2, \text{ если } 0 < l - l_{мата}\left[\frac{l}{l_{мата}}\right] < \frac{l_{мата}}{2} \\ 3, \text{ если } l - l_{мата}\left[\frac{l}{l_{мата}}\right] > \frac{l_{мата}}{2} \end{cases},$$

$l_{мата}$ — длина мата, м.

Расчет пряжек, скрепляющих бандажи

Количество пряжек (рис. 3) из стали ОЦ-0,8-Ст3 ГОСТ 14918–80 определяется по формуле:

$$S_{пряж} = 0{,}045 \cdot 0{,}027\ n \cdot l,$$

где $S_{пряж}$ — площадь стального листа, необходимая для изготовления пряжек, м²; n — количество пряжек на 1 м трубопровода (равно количеству

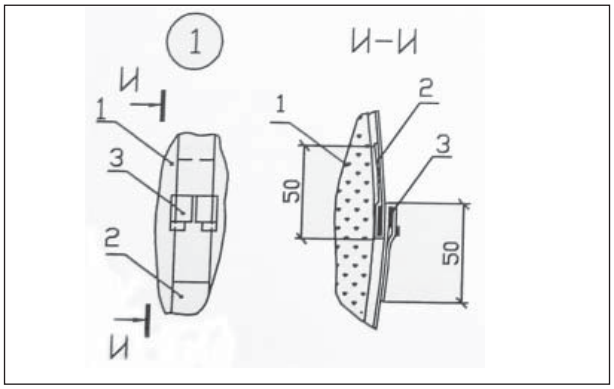


Рис. 2. **Бандаж с пряжкой**

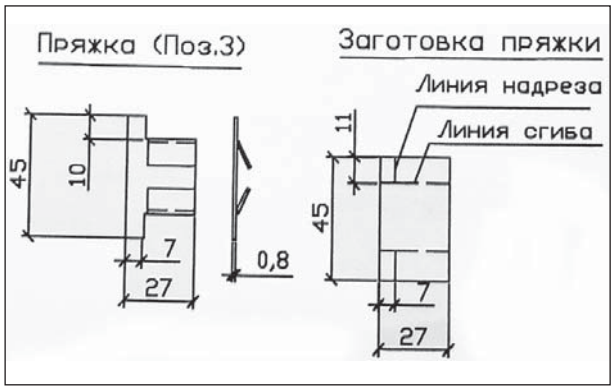


Рис. 3. **Пряжка**

бандажей), шт; l — длина трубопровода, м; 0,045 и 0,027 — стандартные размеры заготовки для пряжки.

Расчет покрытия теплоизоляционной конструкции

Общая площадь металлических листов определяется по формуле:

$$S_{\text{лист}} = \pi(d_{\text{н}} + 2\delta_{\text{к}} + 0{,}023)(0{,}99l + \\ + \pi\, 0{,}005l + 0{,}04l),$$

где $S_{\text{лист}}$ — общая площадь металлических листов, необходимых для покрытия конструкции, м^2; 0,023 — добавочная длина, учитывающая нахлест металлического листа при креплении на теплоизоляционной конструкции, м (рис. 4).

В формуле учтен расход материала на зиги R = 0,005 м и запас материала с учетом накладки листов друг на друга (0,04 м), как показано на рис. 5.

Расчет крепежных колец из проволоки

Крепежные кольца из проволоки 2-О-Ч ГОСТ 3282–74 используются только при изоляции в два слоя и более. Формулы приведены ниже (для двух и трех слоев соответственно):

$$M_{\text{кольцо}} = \pi(d_{\text{н}} + 2\delta_1)\left(\frac{\pi}{4}d_{\text{пр}}^2\right)\rho \cdot n \cdot l \cdot 1{,}1,$$

$$M_{\text{кольцо}} = \pi(d_{\text{н}} + 2\delta_1 + (d_{\text{н}} + 2\delta_1 + 2\delta_2))\left(\frac{\pi}{4}d_{\text{пр}}^2\right)\rho \cdot n \cdot l \cdot 1{,}1,$$

где $M_{\text{кольцо}}$ — масса проволоки, расходуемой на крепление конструкции кольцами, кг; δ_1 — толщина первого слоя изоляции, м; δ_2 — толщина второго слоя изоляции, м; $d_{\text{пр}}$ = 0,002 — диаметр проволоки, м; ρ = 7850 — плотность низкоуглеродистой стали, кг/м^3; n — количество колец на 1 м трубопровода (рассчитывается, исходя из расстояния между кольцами, равного 0,5м), шт; 1,1 — коэффициент запаса.

Расчет крепежной подвески из проволоки

Чтобы рассчитать необходимое количество проволоки 2-О-Ч ГОСТ 3282–74, для начала разобьем на секторы фигуру из этой проволоки, которая получается при креплении первого слоя (см. рис. 1). В результате несложных геометрических вычислений получим следующие формулы для расчета для одного, двух и трех слоев соответственно:

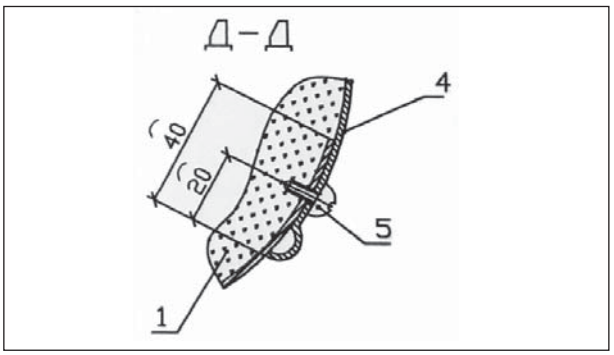


Рис. 4. **Разрез Д-Д (крепление листа)**

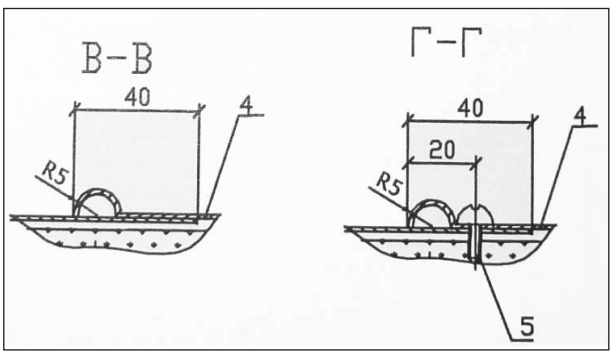


Рис. 5. **Разрезы В-В и Г-Г (нахлест листов друг на друга)**

$$M_{\text{подв}} = \left[\pi\frac{d_{\text{н}}}{2} + 2\left(\left(\left(\frac{d_{\text{н}}}{2}+\delta_1\right)^2 - \left(\frac{d_{\text{н}}}{2}\right)^2\right)^{0,5}\right) + \right.$$

$$\left. + 2\left(2\pi\left(\frac{d_{\text{н}}}{2}+\delta_1\right)\frac{ASIN\left(\frac{d_{\text{н}}/2}{d_{\text{н}}/2+\delta_1}\right)\frac{180}{\pi}}{360}\right) + 0,3\right]\frac{\pi d_{\text{пр}}^2}{4}\rho \cdot l \cdot n,$$

$$M_{\text{подв}} = \left[\pi\frac{d_{\text{н}}}{2} + 2\left(\left(\left(\frac{d_{\text{н}}}{2}+\delta_1\right)^2 - \left(\frac{d_{\text{н}}}{2}\right)^2\right)^{0,5}\right) + \right.$$

$$+ 2\left(2\pi\left(\frac{d_{\text{н}}}{2}+\delta_1\right)\frac{ASIN\left(\frac{d_{\text{н}}/2}{d_{\text{н}}/2+\delta_1}\right)\frac{180}{\pi}}{360}\right) +$$

$$\left. + 0,3 + \pi(d_{\text{н}} + 2\delta_1 + 2\delta_2) + 0,4\right]\frac{\pi d_{\text{пр}}^2}{4}\rho \cdot l \cdot n,$$

$$M_{\text{подв}} = \left[\pi\frac{d_{\text{н}}}{2} + 2\left(\left(\left(\frac{d_{\text{н}}}{2}+\delta_1\right)^2 - \left(\frac{d_{\text{н}}}{2}\right)^2\right)^{0,5}\right) + \right.$$

$$+ 2\left(2\pi\left(\frac{d_{\text{н}}}{2}+\delta_1\right)\frac{ASIN\left(\frac{d_{\text{н}}/2}{d_{\text{н}}/2+\delta_1}\right)\frac{180}{\pi}}{360}\right) + 0,3 +$$

$$+ \pi(d_{\text{н}} + 2\delta_1 + 2\delta_2) + 0,4 +$$

$$\left. + \pi(d_{\text{н}} + 2\delta_1 + 2\delta_2 + 2\delta_3) + 0,4\right]\frac{\pi d_{\text{пр}}^2}{4}\rho \cdot l \cdot n,$$

где $M_{\text{подв}}$ — масса проволоки, расходуемой на крепление подвеской, кг; δ_1, δ_2, δ_3 — толщина первого, второго и третьего слоев изоляции, соответственно, м; n — количество подвесок на 1 м трубопровода (рассчитывается, исходя из расстояния между подвесками, равного 0,5 м),

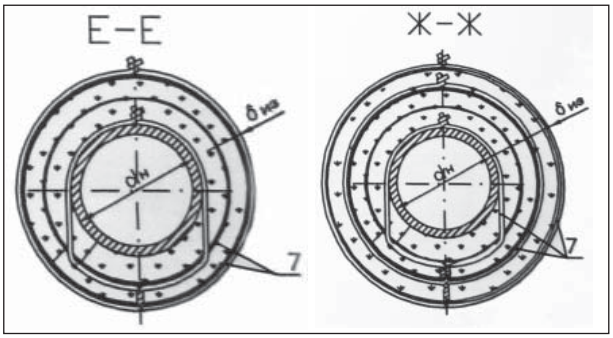


Рис. 6. **Разрез Е-Е и Ж-Ж. Подвески для двух- и трехслойной изоляции**

шт; 0,3 и 0,4 — дополнительная длина проволоки, которая расходуется на закручивание, м

На рис. 6 видно, что первый слой тепловой изоляции подвешивается непосредственно к трубе, далее второй и третий слой закрепляются проволокой по всей длине окружности теплоизоляционного слоя. В формулах, рассчитывая длину проволоки, мы суммируем расходы проволоки на каждый слой.

Также в правила выбора теплоизоляционных конструкций программы в перспективе планируется ввести возможность отдельно задавать типовые составные элементы конструкций, такие как опорное кольцо, бандаж стяжной и др., усовершенствовав их расчет. Затем на них можно будет ссылаться при описании вариантов выбора соответствующих элементов конструкции тепловой изоляции. Такая возможность облегчит работу пользователей с правилами расчетов конструкций.

Рассмотрим на примере чертежа опорного кольца, как будет уточнен расчет в программе.

Расчет опорного кольца

На рис. 7 приведен чертеж опорного кольца, которое используется при изоляции конструкций с большими диаметрами.

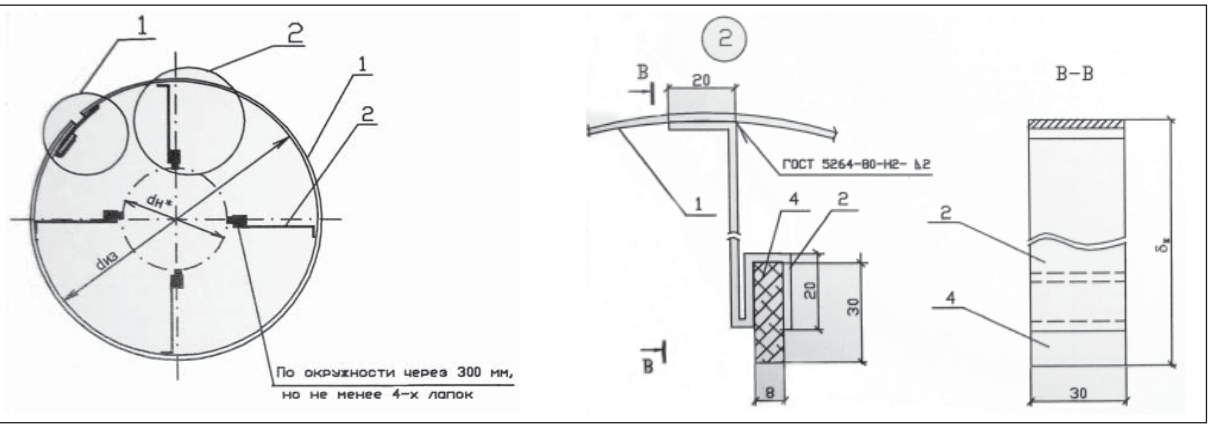


Рис. 7. **Опорное кольцо**

Табл. 2. **Составляющие элементы опорного кольца**

№ п.п.	Наименование	Количество	Масса ед., кг
	Лента 2×30 Ст3пс ГОСТ 6009-74		
1	Бандаж	1	
2	Лапка	4	
3	Скоба	1	0,014
4	Опора Картон асбестовый КАОН -3–8 ТУ 2576-05778230-3-99	4	0,008
5	Штырь Проволока 3-О-Ч ГОСТ 3282-74	1	0,006

В спецификации (табл. 2) уже указано количество бандажей, лапок, скоб, штырей и опор, требуемое на одно опорное кольцо.

Далее приведены формулы расчета количества материалов для опорного кольца (кг):

- бандаж — $(\pi(d_н + 2\delta_к) - 0{,}02)a \cdot b \cdot \rho$;
- лапка — $(\delta_к + 0{,}051)a \cdot b \cdot \rho \cdot n$;
- опора — $0{,}008\ n_{опор}$ (см. табл. 2);
- скоба + штырь (рис. 8) — 0,014 + 0,006 (см. табл. 2).

Здесь $\delta_к$ — толщина теплоизоляционного слоя в конструкции, м; $a = 0{,}03$ — ширина ленты, м; $b = 0{,}002$ — толщина ленты, м; $n = n_{опор}$ — количество лапок, равное количеству опор, шт; 0,02 — зазор в креплении бандажа, м; 0,051 — длина загибаемых частей лапки, м.

Соответственно, для расчета общей массы кольца необходимо суммировать все элементы конструкции. Общее количество колец, необходимое для данной конструкции — 3 штуки (см. табл. 1, позиция 10). Эта цифра рассчитывается исходя из того, что длина трубопровода l берется равной 10 м, а расстояние между опорными кольцами составляет 3 м. Здесь следует пояснить, что в альбомах типовых конструкций на 10 м трубопровода устанавливается 3 опорных кольца, т. е округление значения происходит в сторону меньшего значения. В общем виде требуемое количество опорных колец на длину трубопровода находится по формуле

$$n = [l / l_1],$$

где n — количество опорных колец, шт; $l_1 = 3$ м — расстояние между опорными кольцами, м

Мы рассмотрели лишь небольшой пример, в котором присутствуют как крепежные элементы, так и опорно-разгружающие конструкции. Вариантов формирования подобных конструкций множество, однако анализ альбомов [1] показывает, что значения, полученные по точным формулам, выведенным на основе чертежей, соответствуют значениям количества материалов, приведенным в альбомах типовых конструкций. Модернизация возможностей задания формул в правилах выбора программы «Изоляция» (добавление дополнительных переменных, учет количества слоев типоразмеров, работа со стандартными сборками) даст возможность автоматически выполнять в программе все расчеты строго в соответствии с соответствующими чертежами теплоизоляционных конструкций, которые пользователь сможет приложить к проекту как включаемые или ссылочные материалы.

Таким образом, сотрудничество ООО «НТП Трубопровод» и ОАО «Теплопроект» позволит пользователям программы существенно повысить качество проектов технической тепловой изоляции.

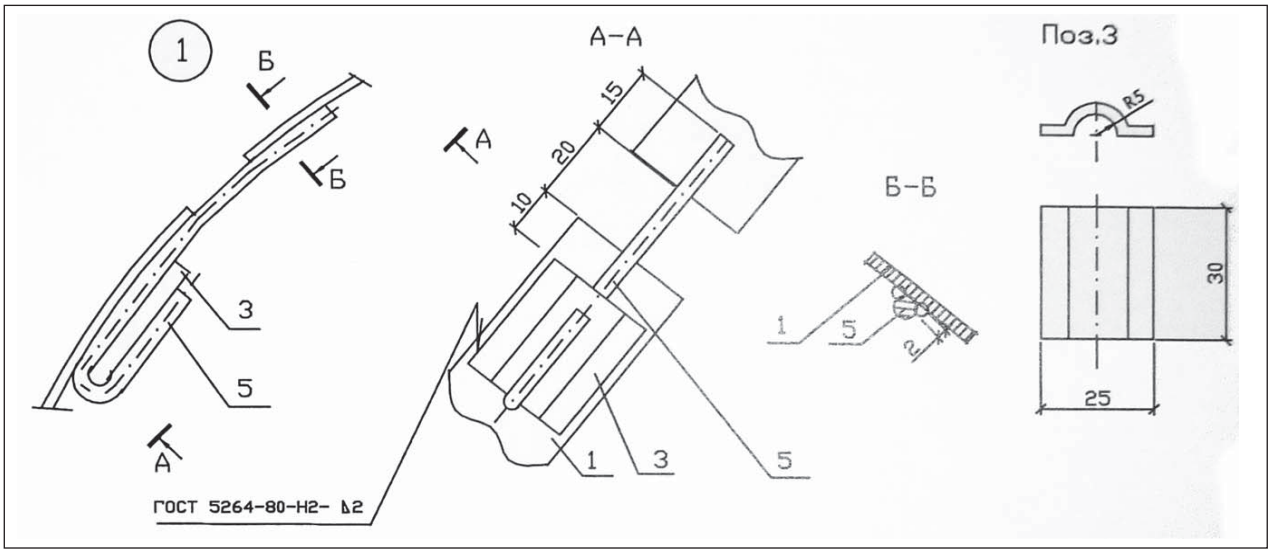


Рис. 8. **Скоба и штырь для закрепления опорного кольца на конструкции**

Литература

1. Серия 7.903.9-6.11. Тепловая изоляция трубопроводов с положительными температурами, 2011.
2. Серия 7.903.9-2. Тепловая изоляция трубопроводов с положительными температурами, 1987.
3. Серия 7.906.9-2. Тепловая изоляция трубопроводов с отрицательными температурами, 1986.
4. Серия 7.903.9-3. Конструкция тепловой изоляции трубопроводов надземной и подземной канальной прокладки водяных тепловых сетей, паропроводов и конденсатопроводов, 1987.
5. Серия 3.903-11. Тепловая изоляция криволинейных и фасонных участков и узлов оборудования. Рабочие чертежи, 1986.
6. Серия 3.903-14. Конструкции индустриальные промышленной тепловой изоляции. Рабочие чертежи, 1988.
7. Тепловая изоляция стальных вертикальных цилиндрических резервуаров с внутренним обогревом для хранения темных нефтепродуктов и масел. Типовые проекты с 704–1-0196. 86 по 704-1-0204.86, 1986.
8. Тепловая изоляция стальных вертикальных цилиндрических резервуаров с наружным обогревом для хранения темных нефтепродуктов и масел. Типовые проекты с 704-1-0205.87 по 704-1-0210.87, 1987.
9. Тепловая изоляция стальных вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефтесодержащих сточных вод. Типовые проекты 704-1-0211.87, 704-1-0212.86, 1986–1987 гг.
10. ТР 12222-01.1. Минераловатные цилиндры ЗАО «Минеральная вата» в конструкциях тепловой изоляции трубопроводов. Рекомендации по применению. ОАО Теплопроект.
11. ТР 12222-02. Маты теплоизоляционные из минеральной ваты «ТЕХ МАТ» в конструкциях тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. Рекомендации по применению. ОАО Теплопроект, 2009.
12. ТР 12328-ТИ.2008. Теплоизоляционные изделия ЗАО «Минеральная вата» — ROCKWOOL-RUSSIA в констукциях тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. Технические решения. ОАО Теплопроект, 2008.
13. ТР 12329-ТИ.2009. Теплоизоляционные изделия ЗАО «ИЗОРОК» в конструкциях тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. Рекомендации по применению с альбомом технических решений. ОАО Теплопроект, 2009.
14. ТР 12297-ТИ.2005. Тепловые изделия ОАО «ТИЗОЛ» в конструкциях тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. Рекомендации по применению с альбомом технических решений. ОАО Теплопроект, 2005.
15. ТР 12274-ТИ.2004. Теплоизоляционные изделия «ISOVER» марок КК-ALC, КТ-11-TWIN, KIM-AL, KVM-50, KLS-K в конструкциях тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. Рекомендации по применению с альбомом технических решений. ОАО Теплопроект, 2004.
16. ТР 12238-ТИ.2002. ОАО Теплопроект. Теплоизоляционные изделия URSA в конструкциях тепловой изоляции трубопроводов. Рекомендации по применению с альбомом технических решений. ОАО «Флайдерер-Чудово», 2002.
17. ТР 12220-ТИ.2001. ОАО Теплопроект. Теплоизоляционные изделия URSA в конструкциях тепловой изоляции промышленного оборудования. Рекомендации по применению с альбомом типовых решений. ОАО «Флайдерер-Чудово», 2001.
18. ТР 12254-ТИ.2002. ОАО Теплопроект. Теплоизоляционные изделия «K-Flex» в конструкциях тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. Рекомендации по применению с альбомом технических решений. ООО Изба Компании, 2002.
19. СТО 59705183-001–2007. Конструкции тепловой изоляции для оборудования и трубопроводов с применением теплоизоляционных пенополиэтиленовых изделий «Энергофлекс». Проектирование и монтаж, 2008.
20. Типовые строительные констукции, изделия и узлы. Серия 5.904.9-78.08. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов с применением изделий «Энергофлекс». Выпуск 0. Тепловая изоляция. Материалы для проектирования. ОАО Теплопроект, 2008.
21. ТР 12312-ТИ.2006. Сегменты и полуцилиндры из экструзионного пенополистирола ПЕНОПЛЭКС в конструкциях тепловой изоляции трубопроводов. Рекомендации по применению с альбомом технических решений. ОАО Теплопроект, 2006.
22. СНиП 41-03–2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов.
23. СП 41–103–2000. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов.

I. E. Tatarintseva, S. Y. Lisin

Albums of Typical Insulation Construction Drawings and Their Integration with «Insulation» Software

The new series of typical piping heat insulation construction drawing albums that were designed by leading company in industrial insulation — «Teploproekt» institute — is presented. Possibilities of these albums' integration with «Insulation» software are described. Examples of material quantities calculation on the base of insulation construction drawing are considered.

Key words: *albums of piping heat insulation construction drawings, calculation of material quantities, insulation design, heat insulation constructions, insulation materials, insulation.*

Особенности эксплуатации и технического диагностирования насосно-компрессорного оборудования без остановки

А. Д. Притужалов

В статье рассмотрена актуальность эксплуатации и проведения технического диагностирования насосно-компрессорного оборудования без остановки, представлен опыт проведения технического диагностирования данного оборудования, приведены рекомендации по эксплуатации насосно-компрессорного оборудования.

Ключевые слова: насосно-компрессорное оборудование, техническое диагностирование, вибромониторинг.

Непредвиденный выход из строя насосно-компрессорного оборудования может повлиять как на экологическую безопасность, так и спровоцировать пожар на опасном производственном объекте. Эффективность эксплуатации любого оборудования во многом определяется совершенством методов технического диагностирования и ремонта. Традиционный планово-предупредительный метод обслуживания и ремонта на данный момент не может обеспечить поддержание оборудования в исправном состоянии во время эксплуатации. Межремонтный интервал зависит от времени жизни наиболее подверженных износу компонентов, таких, например, как подшипниковые узлы и уплотнения. Процедура ППР существенно уменьшает вероятность аварии, но не предохраняет механизм от неожиданных повреждений в межремонтный период, а необоснованные переборки только ускоряют износ узлов, так как вносят новые непредвиденные дефекты: перекосы осей, повышенные или заниженные зазоры и т.д. Основным принципом технического диагностирования и ремонта является принцип предупреждения отказов в работе оборудования при условии обеспечения максимально возможной его наработки. В практике эксплуатации и диагностирования насосно-компрессорного оборудования наиболее актуальными являются проблемы обеспечения надёжности, технической и экологической безопасности их функционирования, а также своевременное и качественное выявление неисправностей. Анализ отечественного и зарубежного опыта контроля технического состояния систем с вращательным движением силовых узлов показывает, что для обнаружения возможных отказов наиболее эффективен контроль технического состояния оборудования именно по вибропараметрам. Это обусловлено тем, что скрытые механические дефекты в данных системах проявляются весьма ограничено. Увеличение вибрации выше определённого уровня может привести к разрушению элементов оборудования или характеризовать разрушение. Таким образом, вибрация служит как причиной развития дефектов, так и их индикатором.

Научно-техническое предприятие «НТП Трубопровод» более 10 лет занимается проведением технического диагностирования насосно-компрессорного оборудования.

По итогам обследования можно сделать следующие выводы:

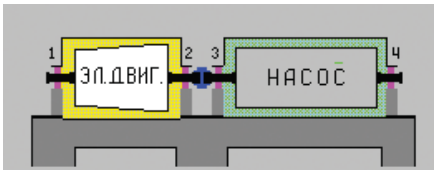
- визуальный и измерительный контроль (ВИК) выявил нарушения у 75 % агрегатов;
- вибродиагностический контроль (ВД) выявил нарушения у 50 % агрегатов;
- другие методы неразрушающего контроля выявили нарушения у 5 % агрегатов.

Наиболее часто встречающиеся дефекты ВИК: ослабление элементов крепления агрегатов и его узлов, нарушение герметичности (подтеки), коррозия, трещины, некачественные сварные швы.

Наиболее часто встречающиеся дефекты ВД: дисбаланс, расцентровка, дефекты подшипников (увеличенный зазор в подшипнике, эллипсность шейки вала подшипника и др.), кавитация, турбулентность.

На рисунке приведен краткий отчет анализа спектров сигналов по результатам замеров параметров вибрации насосного агрегата типа ЦНС.

Таким образом, эксплуатация насосно-компрессорного оборудования в технологических процессах предприятий характеризуется достаточно быстрым повышением уровня вибрации выше критических значений и, как следствие, сокращением межремонтных периодов. Исходя из этого, основными путями для уменьшения



СКЗ виброскорости в точках замеров, мм/с

Подшипник	1	2	3	4
Норма	7,1	7,1	7,1	7,1
Вертикальная	11,9	22,1	20,6	26,9
Поперечная	14,8	20,6	31,0	46,5
Осевая	18,2	18,9	10,6	24,7

Дефекты насосного агрегата по итогам обработки вибропараметров

Механизм	Подшипник	Дефект	Вклад в среднеквадратичное значение, мм/с		
			Вертикальная	Поперечная	Осевая
Двигатель	2	Дисбаланс подшипника	19,9	18,7	17,4
Насос	3	Дисбаланс ротора	18,5	29,2	9,1
Насос	4	Дисбаланс ротора	24,7	44,7	23,2

Общее состояние агрегата – неудовлетворительное.

Вибродиагностика насосного агрегата

преждевременного выхода из строя насосного оборудования являются:

• своевременное проведение вибромониторинга (непрерывного или периодического контроля), экспертизы промышленной безопасности или технической диагностики;

• установка насосов согласно требованиям нормативно-технической документации (по типу, наличию блокировок и устройств безопасности и т.д.);

• качественное проведение ремонтов (отсутствие перекосов осей валов, повышенных или заниженных зазоров, установка качественных комплектующих).

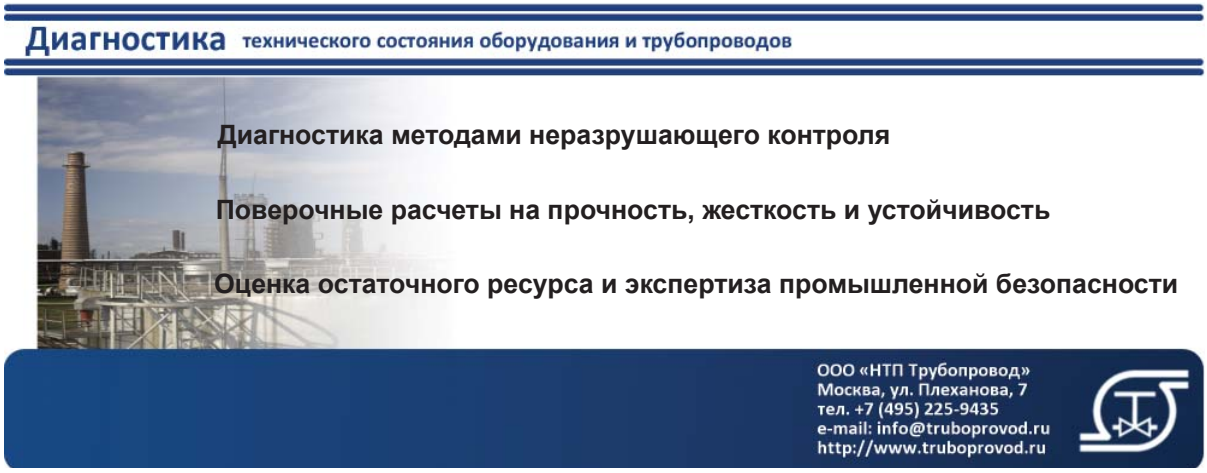
Так же следует отметить, что проведение текущего, среднего и капитального ремонтов насосно-компрессорного оборудования целесообразно проводить по результатам непрерывного или периодического вибромониторинга, то есть исходя из фактического состояния оборудования.

A. D. Prituzhalov

Properties of operation and technical diagnostics of pump and compressor equipment without shutdown

A topicality of operation and technical diagnostics of pump and compressor equipment without shutdown is considered, the experience of technical diagnostics of such equipment is described, the recommendations for operation of pumps and compressors are given.

Key words: *pumps, compressors, technical diagnostics, vibromonitoring.*



Разработка и исследование пьезоакселерометров магнитной сборки

А. Д. Притужалов

В статье рассмотрена актуальность применения пьезоакселерометров в разных отраслях промышленности, представлено обоснование выбора конструкции пьезоакселерометров магнитной сборки, приведено описание выполненных и планируемых работ по разработке и исследованию.

Ключевые слова: пьезоакселерометр, контроль и диагностика, вибрация, пульсация.

Пьезоэлектрический акселерометр является универсальным датчиком, в настоящее время применяемым почти во всех областях измерения и анализа механических колебаний.

Пьезоэлектрические акселерометры отличаются широкими рабочими частотными и динамическими диапазонами, линейными характеристиками, прочной конструкцией и долговременной стабильностью параметров.

Крепление акселерометра на поверхности исследуемого или испытуемого объекта является одним из самых важных условий достижения точных и надежных результатов. Ненадежное крепление акселерометра влечет за собой уменьшение его резонансной частоты после крепления и, следовательно, значительно уменьшает его рабочий частотный диапазон.

Существуют различные методы крепления пьезоакселерометров на объектах контроля, такие как крепление с помощью прочной стальной резьбовой шпильки, пчелиного воска, специальных шпилек, прикрепляемых к объекту твердым клеем или цементом, липкой ленты, постоянного магнита, ручного щупа.

С учетом конструкций пьезоакселерометров, существующих на данный момент, можно выделить следующие моменты, обусловившие выбор конструкции пьезоакселерометров магнитной сборки:

- магниты действуют как добавочные массы и понижают собственную частоту преобразователя (получение НЧ преобразователей);
- магниты служат для крепления датчиков на объект контроля без дополнительного фиксирующего приспособления;
- пьезопластина, помещенная между магнитами и сжимаемая ими является хорошо задемпфированной;
- кроме того, магниты служат протектором.

Немало важным фактором является сравнительно невысокая стоимость пьезоакселерометров по сравнению с другими аналогами отечественных и зарубежных производителей.

На данный момент проведены следующие работы:

- проведен анализ современного состояния разработки и применения пьезоакселерометров в системах контроля и диагностики;
- разработаны и изготовлены пьезоакселерометры;
- выбран и обоснован метод экспериментального исследования, позволяющий испытывать пьезоакселерометры;
- выбрана и обоснована измерительная техника для испытания пьезоакселерометров;
- исследованы электрические и амплитудно-частотные характеристики пьезоакселерометров магнитной сборки (рис. 2);
- разработана математическая модель пьезоакселерометров в профессиональном пакете для решения математических задач разной сложности (моделирования, решения уравнений,

Рис. 1. **Виброиспытательная система**

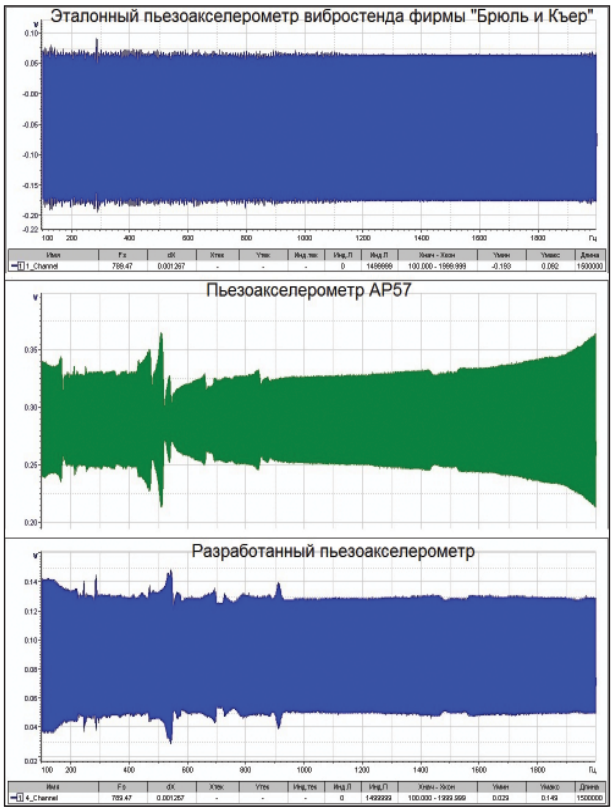


Рис. 2. **Амплитудно-частотные характеристики пьезоакселерометров (частотный диапазон от 50–2000 Гц)**

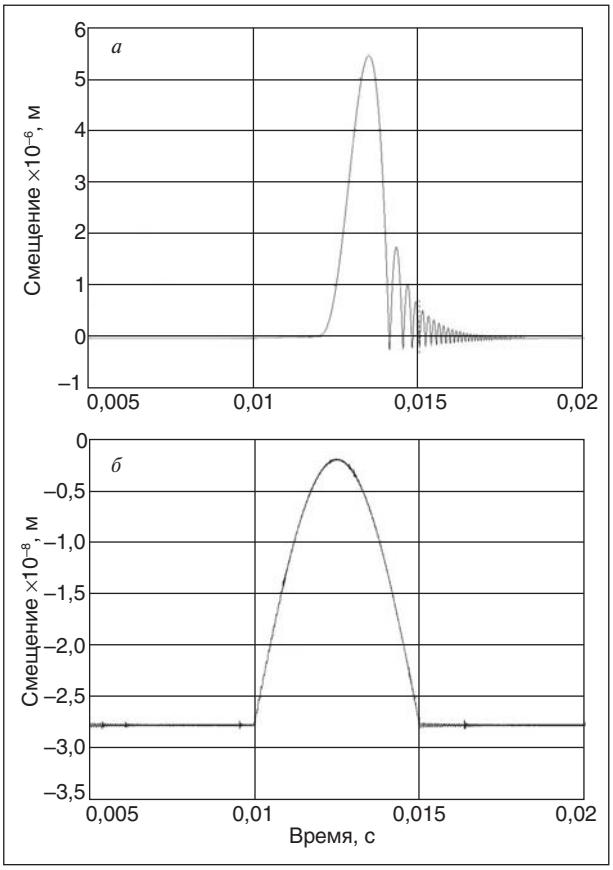


Рис. 3. **Абсолютное смещение нижнего (верхнего) магнита относительно центральной поперечной оси пьезоакселерометра при амплитуде импульса ускорения 21g (пьезоакселерометр «разлетается») (*а*) и 18g (при нормальной работе) (*б*)**

построения графиков) — MATLAB, произведен расчет по методу Рунге–Кутта, и получены графики (рис. 3), которые позволяют судить о движении элементов собранного акселерометра под действием инерционных сил, о реакции на удар и синусоидальное воздействие, о конструкции акселерометра и осевом поджатии;

• разработана программа для считывания, записи и обработки информации (сигналов) с пьезоакселерометров на ЭВМ.

Судя по практически идеальной (прямой) амплитудно-частотной характеристике пьезоакселерометров, разработанных и испытанных автором на кафедре «Приборы и методы контроля качества и диагностики» ИжГТУ им. Калашникова и в отделе исследования и диагностики пространственных структур ФТИ УрО РАН, можно говорить не только о целесообразности, но и необходимости применения пьезоакселерометров магнитной сборки в системах контроля и диагностики.

Следующий этап — испытания пьезоакселерометров, как датчиков для контроля вибрации при эксплуатации и технической диагностике оборудования и сооружений. В первую очередь планируется испытать данные пьезоакселерометры для измерения вибрации, в том числе пульсаций давления рабочей среды, трубопроводов и насосно-компрессорного оборудования на базе виброанализатора OneproD MOVIPACK MVP-2C.

A. D. Prituzhalov

Development and research of magnetic assembly piezoaccelerometers

A topicality of application of magnetic assembly piezoaccelerometers in different industies is considered. The basis for selection of the design of such piezoaccelerometers is discussed. A description of fulfilled and scheduled works on piezoaccelerometers development and research is given.

Key words: *piezoaccelerometer, inspection and diagnostics, vibration, pulsation.*

Контроль утечек в трубопроводной арматуре в процессе эксплуатации

А. Д. Притужалов, Н. Л. Капитонов, А. В. Воронцов, А. М. Капитонов

В статье рассмотрена актуальность контроля утечек трубопроводной арматуры, представлено описание, принцип работы, преимущества и результаты апробации течеискателя Т2-8К, разработанного ООО «НТП Трубопровод».

Ключевые слова: контроль утечек, течеискатель, трубопроводная арматура.

Для поиска утечек в запорной арматуре и предохранительных клапанах в ООО «НТП Трубопровод» разработан двухканальный акустический течеискатель Т2–8К (рис. 1).

Трубопроводная арматура имеет относительно высокую стоимость с одной стороны, и долговечность корпусов с другой стороны, что делает её ремонт экономически целесообразным.

Трубопроводная арматура считается исправной, если обеспечивается:

- прочность деталей арматуры и сварных швов, работающих под давлением;
- герметичность корпуса, сальниковых уплотнений и фланцевых соединений арматуры в отношении внешней среды;
- герметичность затвора арматуры;
- плавное (без рывков и заеданий) перемещение подвижных частей арматуры.

Исправное состояние трубопроводной арматуры поддерживается проведением плановых ремонтов и контролем технического состояния арматуры в процессе ее эксплуатации.

Своевременная замена имеющей утечку (неисправной) трубопроводной арматуры, находящейся в эксплуатации, снижает риск возникновения отказов и способствует защите окружающей среды. Утечки арматуры в отношении внешней среды могут быть выявлены при ее наружном осмотре по следам обмерзания корпуса, подтекам продукта, шуму и загазованности вблизи арматуры. Утечки же в затворе арматуры не имеют внешних признаков, но их можно выявить по акустическому сигналу, который, в большинстве случаев, сопровождает утечку.

Рис. 1. **Течеискатель Т2-8К**

Для обнаружения акустического сигнала утечки и нахождения неисправной арматуры, в настоящее время, предлагаются также одноканальные акустические течеискатели. Однако поиск неисправной арматуры в условиях действующего производства дополнительно осложнен присутствием различных помех. Учитывая то, что решение о наличии или отсутствии утечки в затворе арматуры принимает оператор, ясно, что его опыт и высокая квалификация имеет определяющее значение для эффективного поиска неисправной арматуры с использованием одноканального течеискателя. Контроль запорной трубопроводной арматуры с использованием *двухканального* течеискателя Т2-8К может осуществляться рядовым техническим персоналом ответственным за безопасную эксплуатацию оборудования.

Течеискатель позволяет проводить контроль утечек в затворе запорной трубопроводной арматуры в условиях эксплуатации, в том числе, контроль утечек в предохранительных клапанах со сбросом среды в закрытую систему.

Применение течеискателя позволяет оперативно обнаружить утечки продукта.

Механизмы возникновения акустических сигналов

Одним из механизмов возникновения акустических сигналов при утечке является турбулентность потока. Скорость потока возрастает при прохождении через канал утечки, характер течения становится турбулентным (в отличие от ламинарного), что сопровождается излучением звуковой энергии. Ламинарный и турбулентный режимы течения имеют место, как при течении жидкости, так и при течении газа, но вследствие

низкой вязкости и больших скоростей режим течения газа через канал утечки в основном турбулентный.

Другим механизмом излучения акустических сигналов при утечке жидкости может являться кавитация, при которой в жидкости образуются газовые пузырьки и полости. Кавитация возникает при падении статического давления жидкости ниже давления насыщенных паров и характеризуется появлением пузырьков заполненных паром (или растворенными в жидкости газами) и их последующим схлопыванием, при попадании в зону повышенного давления (иначе нет условия схлопывания). Уровень акустического сигнала, возникающего в результате кавитации, может превышать уровень сигнала от турбулентности потока. Акустические сигналы, возникающие в результате кавитации, похожи на удары, в отличие от непрерывного характера сигнала, вызванного турбулентностью. Источник акустического сигнала, вызванный утечкой в затворе арматуры, расположен вблизи арматуры со стороны отводящего трубопровода.

Распространение акустических сигналов

Прежде чем достигнуть приемного преобразователя течеискателя акустический сигнал от утечки распространяется по рабочей среде в трубопроводе (газ или жидкость) и металлу трубопровода. Расстояние, которое проходит сигнал по каждой среде, оказывает влияние на его уровень и частотный состав.

Первую часть пути до приемного преобразователя сигнал от утечки проходит по внутренней среде трубопровода, где затухание выше, чем в металле, таким образом, потери сигнала до перехода его в металл трубопровода прямо пропорциональны диаметру трубопровода и обратно пропорциональны плотности внутренней среды.

Типичные значения затухания акустического сигнала в металле трубопровода составляет 3 дБ/м для частот до 20 кГц и 4 дБ/м для частот до 90 кГц. При наличии теплоизоляции затухание сигнала в металле трубопровода будет выше.

Кроме сигнала от утечки преобразователь течеискателя принимает различного рода шумы, которые являются помехами (например: шумы от потока продукта, шумы от работы машинного оборудования).

Принцип работы течеискателя Т2–8К

Двухканальный корреляционный течеискатель Т2–8К представляет собой аппаратно-программное устройство с автономным питанием.

Аппаратная часть течеискателя выполняет следующие функции:

- преобразование механических колебаний, распространяющихся по трубопроводу, в электрический сигнал;
- усиление и фильтрацию сигнала;
- преобразование сигнала в цифровую последовательность (данные);
- запись данных в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ);
- передачу данных из ОЗУ во встроенный, малогабаритный компьютер (КПК);
- электропитание течеискателя от аккумуляторных батарей, включая КПК и зарядку батарей от электросети.

Программное обеспечение течеискателя состоит из следующих программ:

- программа КАТ (версия 2007) для КПК, которая выполняет сбор, хранение, первичную обработку данных, а также их экспорт в персональный компьютер (ПК) для дальнейшей обработки;
- программа Р1020 (версия 2010) для ПК, которая выполняет обработку данных и определяет состояние контролируемой арматуры: 1 — утечка есть, 2 — утечки нет или выдает сообщение о необходимости проведения дополнительного контроля;
- программа РПУ (версия 2010) для ПК, которая выполняет расчет параметров утечки.

Течеискатель производит обработку акустического сигнала принятого двумя разнесенными по трубопроводу приемными преобразователями, установленными вблизи контролируемой арматуры. Признаком наличия утечки в затворе арматуры является наличие вблизи арматуры источника узкополосного акустического сигнала.

На рис. 2 приведена схема сбора данных, на которой показан участок трубопровода с арматурой, имеющей утечку в затворе и приемные преобразователи течеискателя А и В. Акустический сигнал, изображенный в виде стрелок с номерами, распространяется по трубопроводу в обе стороны от контролируемой арматуры.

При включении течеискателя осуществляется синхронная запись данных по двум каналам приема (А и В) в ОЗУ течеискателя.

В соответствии со схемой, первым записанным в ОЗУ канала А будет участок сигнала с номером 4, а первым записанным в ОЗУ канала В будут участок сигнала с номером 7.

На момент окончания записи в ОЗУ течеискателя будут сохранены две равные по длине последовательности данных А и В, сдвинутые друг относительно друга на три отсчета (см. рис. 2). После окончания записи данные из ОЗУ

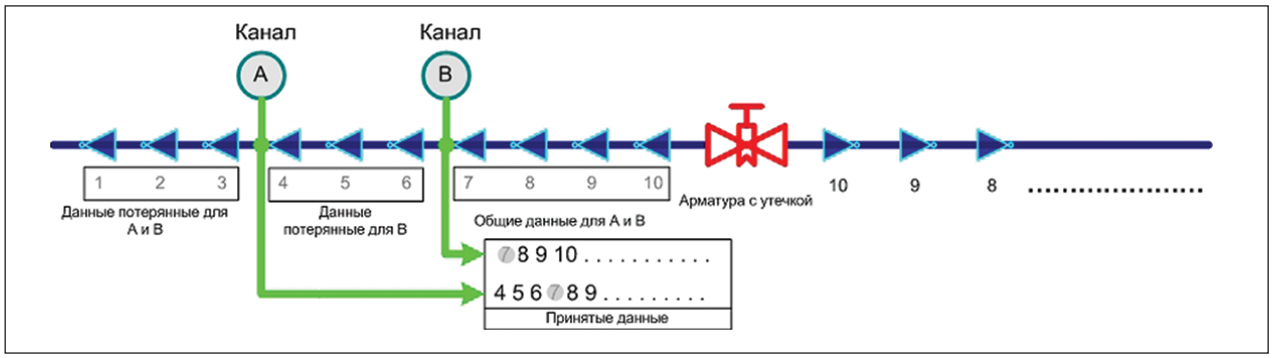


Рис. 2. **Схема сбора данных**

передаются в КПК течеискателя для обработки. Передача данных из ОЗУ в КПК осуществляется с использованием стандарта последовательной передачи данных RS-232.

С течеискателем используются два типа приемных преобразователей 1Tt и 2Tl:

• 1Tt используется при поиске утечек жидкости, вибропреобразователи ДН-4-М1, рабочая полоса частот 5,0–12,6 кГц, рабочая температура –30...+70°С, тип принимаемых волн — поперечные, крепление на трубопроводе — магнитное, диаметры отверстий утечки от 0,7 мм до 1,3 мм, избыточное давление в подводящем трубопроводе 0,6 МПа, истечение под уровень;

• 2Tl используется при поиске утечек газов, аэпреобразователи ПЭК 20–120 (специально подобранные): рабочая полоса частот 20–120 кГц, рабочая температура +70...–40°С, тип принимаемых волн — продольные и поперечные, крепление на трубопроводе — магнитное, диаметры отверстий утечки от 0,8 до 3,0 мм, избыточное давление в подводящем трубопроводе 0,6 МПа, сбросе воздуха в атмосферу.

Преимущества:

• контроль выполняется в рабочих условиях, происходит в реальном времени и занимает несколько минут;

• сокращение потерь продукта и затрат на обслуживание оборудования;

• минимизация вредных выбросов в окружающую среду.

Апробация течеискателя Т2–8К

Для апробации течеискателя Т2–8К был собран лабораторный стенд. Основные части стенда показаны на рис. 3.

Трубопровод с наружным диаметром 21 мм и толщиной стенки 2 мм.

Стенд использовался для имитации утечки воды и воздуха через одну из приоткрытых трубопроводных арматур (7 или 8) или сверление диаметром 0,9 мм. Истечение происходит: для воды в предварительно заполненный отводящий трубопровод, (под уровень 200 мм вод. ст.) или в атмосферу (при полностью открытой арматуре) через сверление отверстия диаметром 0,9 мм. Сверление может быть перекрыто при помощи

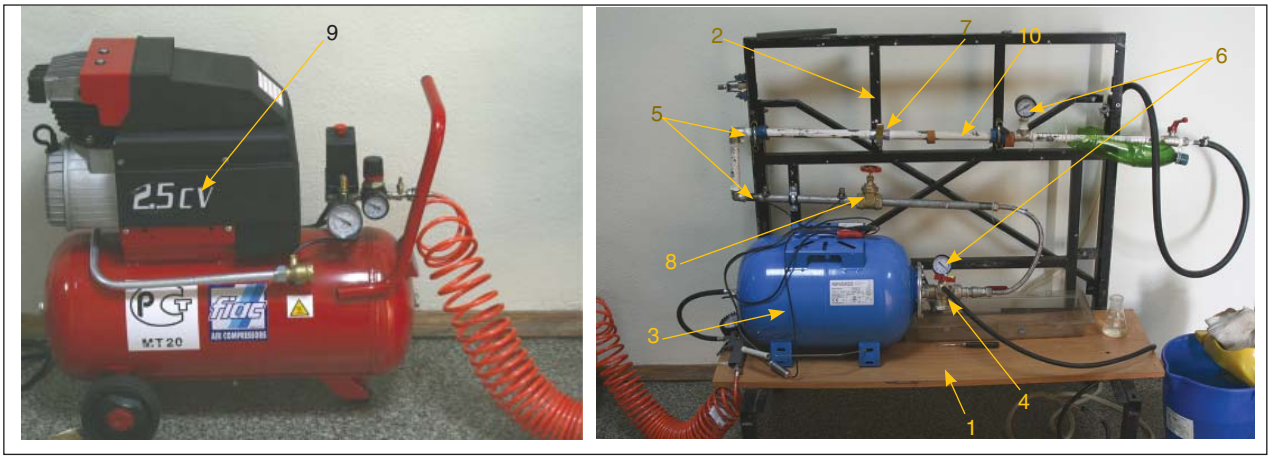


Рис. 3. **Лабораторный стенд: 1 — опорная плита; 2 — опорная рама; 3 — гидроаккумулятор; 4 — тройник; 5 — отвод; 6 — манометры; 7 — шаровой кран; 8 — клиновая задвижка; 9 — воздушный компрессор**

Рис. 4. **Переходник для подключения компрессора**

магнита и резинового уплотнения. В качестве рабочей среды в стенде используется водопроводная вода или сжатый воздух. Конструкция стенда позволяет создавать избыточное давление в подводящем трубопроводе до 0,8 МПа. Давление в трубопроводе стенда создается поршневым одноступенчатым воздушным компрессором с ресивером. Контроль давления в трубопроводе стенда осуществляется манометрами, а давление в ресивере компрессора задается при помощи реле давления. Для обеспечения стабильных параметров утечки воды в конструкцию стенда входит гидроаккумулятор емкостью 25 л. Ресивер компрессора подключается к гидроаккумулятору при помощи гибкого шланга через специальный клапан, имеющийся в днище гидроаккумулятора (при подключенном шланге клапан открыт). Сжатый воздух воздействует на резиновую камеру внутри гидроаккумулятора, которая заполнена водой. Таким образом, вода не насыщается воздухом и не контактирует с металлическим корпусом гидроаккумулятора. При работе стенда на сжатом воздухе ресивер компрессора подключается непосредственно на вход трубопровода стенда, минуя гидроаккумулятор через переходник (рис. 4).

На выходе гидроаккумулятора установлена арматура, которая обеспечивает заполнение камеры гидроаккумулятора и трубопровода стенда водой. Подача или сброс давления в трубопроводе стенда осуществляется клапаном с ручным управлением, имеющимся на гибком шланге (режим подачи или сброса давления зависит от положения крана на выходе ресивера компрессора). В конце трубопровода стенда имеется штуцер со шлангом, который используется при измерении расхода воды через утечку в затворе арматуры. Для улучшения акустического контакта приемных преобразователей течеискателя с трубопроводом, на трубопроводе стенда сделаны плоские площадки.

В результате испытаний было установлено, что течеискатель обнаруживает искусственно создаваемые утечки в затворе арматуры при односторонней установке приемных преобразователей на отводящем трубопроводе и следующих параметрах:

- давление в подводящем трубопроводе от 0,6 МПа (изб.);
- давление в отводящем трубопроводе до 200 мм вод. ст. (изб.)/атмосферное;
- диаметр утечки воды от 0,7 до 1,3 мм;
- диаметр утечки воздуха от 0,8 до 3,0 мм;
- уровень шума от работы компрессора до 50 дБ (примерно, шум в вагоне метро).

Испытания течеискателя на лабораторном стенде показали его пригодность для выявления искусственно создаваемых утечек воды и сжатого воздуха в затворе трубопроводной арматуры при односторонней (относительно арматуры) установке приемных преобразователей на фоне шумов.

Конструкция и технические характеристики течеискателя позволяют проводить контроль трубопроводной арматуры в условиях эксплуатации. Время непрерывной работы течеискателя от комплекта батарей составляет 2 ч.

Контроль трубопроводной арматуры на МНПЗ

С 2004 г. течеискатель Т2–8К применяется для контроля предохранительных клапанов оборудования Московского нефтеперерабатывающего завода.

Так например, в январе 2007 года был проведен контроль предохранительных клапанов колонны К1 с маркировкой 2, 3, 7, 6, 5 и колонны К5 и с маркировкой 1,10 на установке 22/4. Контроль проводился при следующих условиях: уровень окружающего шума около 55 дБ (шум в вагоне метро), температура +3°С, ветер 5–7 м/с. По результатам контроля предохранительный клапан К1 с маркировкой 7 имеет утечку в затворе, остальные клапаны исправны. Результаты контроля переданы в ОТН.

A. D. Prituzhalov, N. L. Kapitonov, A. V. Vorontsov, A. M. Kapitonov

A Leakage Detection in Valves during Operation

A topicality of valve leakage inspection is considered. The description, principle of operation, advantages and results of operation testing of T2-8K leak detector, developed by NTP Truboprovod company, is presented.

Key words: *leakage detection, leak detector, valve.*

Опыт расчета и проектирования трансферных трубопроводов

Т. В. Кузнецова, А. Н. Краснокутский

Рассматривается опыт решения такой сложной инженерной задачи, как проектирование или реконструкция трансферного трубопровода. Данная задача требует комплексного подхода, выполнения гидравлического и теплового расчета двухфазного течения, прочностного расчета, поиска компромисса при удовлетворении зачастую противоречащих друг другу требований к конфигурации и конструкции трубопровода. Обсуждаются способы снижения вибрации трубопровода.

Ключевые слова: трансферный трубопровод, проектирование, реконструкция, экспертиза, расчет двухфазного течения, оценка прочности, пульсация, вибрация.

ООО «НТП Трубопровод» и ЗАО «ИПН» имеют большой опыт проектирования и экспертизы трансферных трубопроводов для различных нефтеперерабатывающих производств (Московского, Афипского, Антипинского НПЗ и др.). Расскажем подробнее о специфике возникающих при этом инженерных проблем.

Трансферный трубопровод является связующим звеном между змеевиком печи и ректификационной колонной или реактором. Перекачиваемым продуктом обычно являются нефтепродукты: нефть, масляные дистилляты, отбензиненная нефть, мазут и другие нефтяные фракции. Колонна может быть как атмосферной, так и вакуумной.

Проектирование трансферного трубопровода требует комплексного подхода, выполнения гидравлических и прочностных расчетов, поиска компромисса при удовлетворении ряда зачастую противоречащих друг другу требований к конфигурации и конструкции трубопровода. Именно такой подход реализуется в ООО «НТП Трубопровод» и ЗАО «ИПН», для чего имеются необходимые программные и технические средства.

Длина и диаметр трансферного трубопровода, а также набор местных сопротивлений оказывают значительное влияние на режим работы печи и колонны или реактора. Поэтому точное значение гидравлического сопротивления, доли отгона и температуры продукта является важным, так как отклонение этих данных от расчетных как в сторону завышения, так и в сторону занижения приводит к отклонению требуемых качества продукта и производительности установки в целом. Это указывает на то, что при проектировании трансферных трубопроводов необходимо стремиться к созданию такого трубопровода, который бы обеспечивал минимальные гидравлические сопротивления и минимальное падение температуры. Перепад давления в трансферном трубопроводе можно существенно снизить, путем выбора оптимальных диаметров и трассировки трансферного трубопровода, а также разделением потока продукта на несколько потоков и увеличением диаметра части змеевика печи на участке испарения. Это особенно важно при вакуумной перегонке, т. к. скорости продукта могут быть близки к скорости звука. При неправильном подборе диаметров или неточном расчете скорость продукта в трансфере может превышать скорость звука, что в реальности ведет к критическому истечению, скачкам давления, отклонению от проектных данных, а возможно и к аварийной ситуации.

Выполнение таких точных расчетов затруднено двухфазностью продукта изменением температуры по длине трубопровода. В настоящее время расчет трансферных трубопроводов проводится с использованием программы «Гидросистема», в которой заложены современные методики расчета двухфазных потоков.

Для исключения пульсаций парожидкостной смеси, уменьшения потерь давления к конструкции трансферного трубопровода предъявляется ряд требований. Помимо оптимального выбора диаметров трансфера, а также диаметров змеевика печи, повороты (отводы), переходы с одного диаметра на другой должны быть плавными, разность высот между выходом из печи и входом в колонну должна быть минимально возможной. Схема трансферного трубопровода должна иметь вид как можно ближе к S-образному. Кроме того, опыты сотрудников БашНИИ НП (Л. Б. Худайдатовой и др.) показывают, что для обеспечения равновесного состояния время пребывания потока в трансфере должно быть не менее 0,85 с, а расход водяного пара, подаваемого в змеевик печи не более 0,3% от общего расхода.

В условиях двухфазного газожидкостного потока возникает опасность возникновения высокой вибрации трубопроводов, причиной которой являются вынужденные колебания, возникающие вследствие пробкового (снаряд-

Допускаемые значения амплитуд вибрации трубопроводов, мкм

Диапазон	Частота, Гц									
	2	4	6	8	10	20	30	40	50	60
1	120	115	100	90	85	60	50	45	40	50
2	250	230	200	180	165	120	95	85	75	70
3	500	450	400	360	330	230	180	145	135	130
4	1250	1100	950	800	750	500	420	350	320	300

ного) режима течения, а также критического режима течения в местных гидравлических сопротивлениях. При этом максимальная вибрация возникает в месте, где совпадает направление воздействия потенциального пробкового или критического течения с максимальной амплитудой собственных колебаний.

При обнаружении трубопроводов с повышенной вибрацией проводится вибродиагностика с помощью прибора OneproD MVP-200 фирмы 01dB/Metravib, AREVA Group, Франция, и программного обеспечения VibGraf XPR.

Для определения мест замеров вибрации трубопроводов с максимальными колебаниями определяются собственные частоты и формы их колебаний. Учитывая сложную геометрию и условия закрепления трубопроводов, для этого используется метод конечных элементов в объемной постановке с использованием ПК ANSYS.

При оценке полученных данных, помимо общего уровня вибрации [1], используются амплитудно-частотные характеристики участков трубопроводов. При этом амплитуды виброперемещений нормируются в зависимости от частоты вибрации [2,3].

Различаются пять опорных уровней вибрации:

1) расчетный при проектировании;

2) допускаемый при эксплуатации;

3) требующий исправления, реконструкции системы;

4) уровень появления аварийных ситуаций.

В таблице даны дискретные значения допускаемых значений вибрации трубопроводов в зависимости от частоты.

В случае превышения уровня вибрации 2-го уровня необходимо провести реконструкцию трубопровода.

Как правило, реконструкция сводится к уменьшению количества отводов, увеличению их радиуса до 3…5 D, а также рациональному размещению арматуры, которая является основным источником критического течения среды.

Кроме того, проводится изменение расположения опор и модификация опорных конструкций с целью повышения низших частот собственных колебаний как минимум до 10Гц.

Все указанные мероприятия приводят к снижению самокомпенсирующей способности температурных деформаций трубопроводов. Поэтому, после внесенных изменений в конфигурацию трансферных трубопроводов, необходимо провести поверочный расчет по программе СТАРТ, с целью безусловного выполнения условий прочности трубопроводов и определения нагрузок на штуцера аппаратов. Прочность врезок штуцеров, а также косых врезок проверяется с помощью программы «Штуцер-МКЭ».

Накопленный ООО «НТП Трубопровод» и ЗАО ИПН опыт расчета и проектирования трансферных трубопроводов позволяет по согласованию с заказчиком выбирать их оптимальную конфигурацию и параметры и обеспечить их надежную работу.

Литература

1. ПБ 03–585–03. Правила устройства и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов. ГУП «НТЦ по безопасности в промышленности Ростехнадзора России.
2. РТМ 38. 001–94 «Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических, стальных трубопроводов», разработаны НТП «Трубопровод» и согласован с Госгортехнадзором России;
3. СА 03–003–07. Расчеты на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов. Стандарт Ассоциации «Ростехэкспертиза».

T. V. Kuznetsova, A. N. Krasnokutsky

Experience of Transfer Line Analysis and Designs

The article is devoted to experience of complex engineering problem — transfer line (from fired heater to column) design or rebuilding. This task demands comprehensive approach, including hydraulic and thermal two-phase flow analysis, stress analysis, and searching for compromise in fulfilling different, often conflicting requirements on pipeline geometry and construction. The ways of piping vibration reduction are discussed.

Key words: *transfer line, design, rebuilding, expertise, two-phase flow analysis, strength estimation, pulsation, vibration.*

Автоматизации управления изделиями и материалами в монтажном проектировании

А. И. Тимошкин, О. В. Полозова, Е. Е. Шапиро

В статье описан эффективный подход к выбору изделий трубопроводов и арматуры при проектировании промышленных объектов как составная часть управления материалами, а также комплекс программных средств автоматизации управления материалами, выпуска проектной документации и интеграции САПР СУБД ПРОЕКТ.

Ключевые слова: СУБД Проект, монтажное проектирование, управление материалами, трубопроводы, фитинги, арматура, фланцы, классы материалов трубопроводов, выбор элементов трубопроводов.

Монтажное проектирование – одна из наиболее трудоемких частей проектирования промышленных производств, в процессе которого проектируется дорогостоящая часть объекта, требует пристального внимания к управлению сортаментом изделий.

Детализация проекта — компоновка оборудования и пространственное решение трубопроводов составляют основной предмет монтажного проектирования. Конструкторская деятельность проектировщика-монтажника заключается в проектировании расположения трубопроводов и определения требуемых изделий — труб, деталей трубопроводов, арматуры, опор и др., и их соединений.

Естественным образом возникает задача управления материалами — классификация и отбор используемых в проекте изделий с учетом требования нормативно-технической документации (НТД), пожеланий заказчика и особенностей проектируемого объекта, формирование заказных спецификаций с учетом специфики выпускаемых изделий конкретными изготовителями.

Из соображений технической и экономической целесообразности, как в процессе строительства, так и во время эксплуатации, при проектировании стремятся сократить перечень используемых изделий, максимально его унифицировав.

Для этого используется подход, ставший уже традиционным: проведение единой технической политики, заключающейся в использовании одинаковых изделий в одинаковых условиях и применение «классов» изделий [1]. Под классом понимается минимальный набор элементов трубопроводов, достаточный для создания проекта в данных условиях. Для создания классов производится анализ монтажно-технологической (МТ) схемы и/или экспликации участков и выделяются участки с близкими с точки зрения применимости изделий характеристиками.

Характеристики участка, влияющие на выбор изделий:

- транспортируемый продукт (горючесть, химическая агрессивность);
- расчетное давление;
- диапазон температур, (от температуры холодной пятидневки до расчётной температуры продукта);
- диаметр условного прохода.

Целесообразно создавать отдельные классы для трубопроводов (и их элементов) и арматуры, так как арматура имеет более узкий ассортимент. Разделение позволяет комбинировать классы при назначении класса на участки трубопровода, уменьшая тем самым общее число классов.

Создание классов является творческой инженерной задачей, при решении которой требуется учесть множество факторов, в числе которых правила безопасности (ПБ), условия работоспособности изделий, требования технологического процесса, различные конфигурации элементов (например, тип присоединительной поверхности) и множество других.

Классификация и обобщение, проводимые в процессе создания классов, сходны с АВС-анализом [3], идея которого строится на основании принципа Парето: «за большинство возможных результатов отвечает относительно небольшое число причин».

Применение готовых классов не только сокращает перечень используемых изделий, но и значительно упрощает дальнейшее проектирование с их применением [11]. В идеальном случае для заданных условий отобран единственный элемент, который используется автоматически, без дальнейшего анализа. В остальных случаях проектировщик имеет дело только с небольшим количеством вариантов (рис. 1).

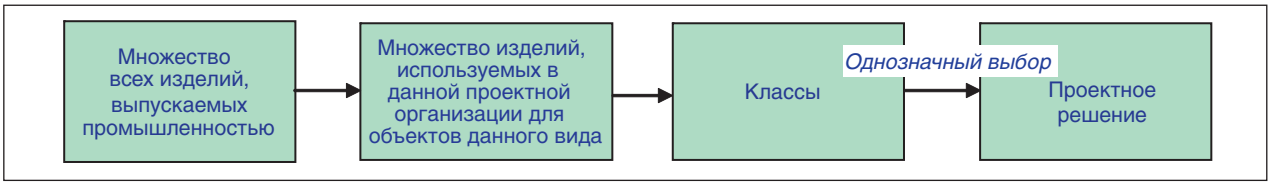


Рис. 1. **Отбор и использование изделий в процессе монтажного проектирования**

Целесообразно в процессе отбора изделий в классы проводить прочностной расчет на допускаемое давление, позволяющий отсеять изделия с недостаточной толщиной стенки. Для большинства участков, которые обеспечены хорошей компенсацией деформаций от действующих нагрузок, изделия с минимальной толщиной стенки, отобранные на основе прочностного расчета, успешно проходят поверочный расчет на прочность всего участка.

Современный процесс проектирования обязательно включает в себя использование средств автоматизации (САПР). В автоматизации проектирования сложных объектов, в том числе промышленных производств, центральное место занимает графическая система трехмерного проектирования. Наибольшее распространение в мире, в том числе России и странах СНГ, получили зарубежные «тяжелые» системы — AVEVA PDMS, Intergraph PDS и SmartPlant3d, Bentley OpenPlant [4].

К сожалению, уровень их адаптации к российским условиям — стандартам на материалы и изделия и требованиям к выходной документации — крайне низок, что обусловлено значительными различиями в классификации изделий и отсутствием актуализированных баз данных отечественных изделий. Учитывая, что зарубежная классификация материалов и изделий, а также правила оформления проектно-конструкторской документации (ПКД) отличаются от отечественных (часто они устроены проще), внедрение этих систем затруднено и требует значительных усилий. В итоге применение подобных систем оправдано для достаточно крупных проектов, либо с участием иностранных компаний и с применением импортных изделий.

Для решения комплекса описанных проблем — управления материалами, формирования выходной документации по отечественным стандартам, а также с целью интеграции различных, в т. ч. отечественных программ автоматизации ПКД, в ООО «НТП Трубопровод» разработан программный комплекс «СУБД ПРОЕКТ».

При создании системы были поставлены и решены следующие задачи:

1. Произвести сравнительный анализ НТД и выработать единую систематику в описании изделий, используемых при проектировании трубопроводов, для создания на её основе структуры базы данных;

2. Выработать принципы построения классов, максимально учитывающие факторы, влияющие на отбор изделий с целью его наиболее полной автоматизации;

3. Разработать универсальный подход к описанию и хранению информации о конкретном проекте, что позволит реализовать удобный проектировщику способ ввода данных по трубопроводам, получать произвольные выходные документы, и интегрироваться с различными проектными системами, в первую очередь — трехмерного проектирования.

Решение этих задач получили воплощение в составных частях системы.

СУБД ПРОЕКТ разработан как совокупность нескольких компонентов, которые могут быть использованы совместно или независимо (рис. 2)

Универсальная база данных (УБД) — универсальная база данных труб, деталей, арматуры и прочих элементов трубопроводов. Структура БД построена на основе вышеупомянутой классификации, что позволяет хранить информацию без дублирования, обеспечивая при этом полные сведения о параметрах элементов и сортаменте, выпускаемом конкретными производителями.

УБД служит первичным хранилищем и источником данных для остальных частей системы, и может использоваться в качестве справочника по перечню и параметрам изделий. В БД вместе с данными об изделиях хранятся правила выбора, позволяющие ограничить множество используемых в данный момент изделий по определенным критериям, а также классы.

УБД имеет редактор данных для пополнения и средства просмотра содержимого базы с мощными средствами фильтрации. Интерфейс УБД ориентирован на пользователей, не имеющих специальной подготовки в области работы с электронными базами данных.

Генератор классов (ГК) — интеллектуальная программа для создания классов деталей трубопроводов и арматуры.

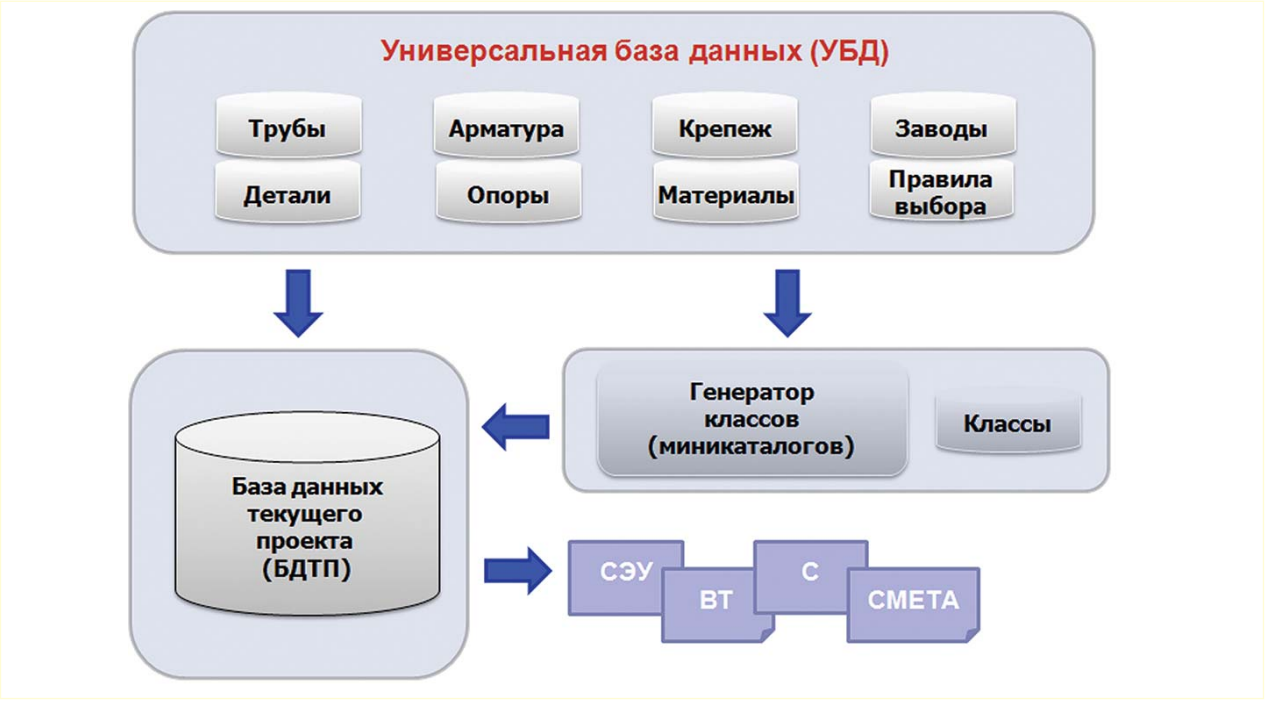


Рис. 2. **Структура СУБД ПРОЕКТ**

Функционально ГК содержит:

• средства фильтрации изделий по значениям атрибутов (параметрам)

• отбор изделий на основе правил выбора. В поставляемые правила выбора входят требования к устройству и эксплуатации и Правил Безопасности для трубопроводов [7–9].

• механизм определения требуемой толщины стенок труб и фасонных деталей, рассчитанных на условия, для которых формируется класс (расчет на прочность от действия давления при заданной температуре [10, 12])

Классы могут быть экспортированы в базу данных графической системы трехмерного проектирования.

База данных текущего проекта (БДТП) предназначена для управления данными конкретного проекта. Это многопользовательская клиент-серверная программа с централизованным хранением данных.

Использование БДТП подразумевает совместную работу проектировщиков различных специальностей — технологов, монтажников, проектировщиков тепловой изоляции. Данные программы состоят из перечня участков трубопроводов с их параметрами, а также входящих в участок элементов.

БДТП может интегрироваться с трехмерной графической системой проектирования для обмена с ней данными. Также данные БДТП могут быть использованы в других смежных программах автоматизации. Например, программа ООО «НТП Трубопровод» «Изоляция» для расчета и проектирования тепловой изоляции, имеет функцию импорта данных из БДТП. Это позволяет полностью избежать ввода исходных данных по составу и параметрам изолируемых объектов, а так же по назначению изоляции, полностью сохранив при этом структуру проекта.

Одна из основных функций БДТП — получение ПКД. Для этого используется встроенный генератор отчетов, формирующий документы в формате RTF[6] на основе шаблонов (также в формате RTF). Система шаблонов позволяет произвольным образом настраивать вид выходных документов.

В настоящее время БДТП формирует следующие выходные документы:

• сводная экспликация участков трубопроводов (СЭУ);

• ведомость трубопроводов (ВТ);

• заказная спецификация на трубы и изделия (С);

• задание сметному отделу.

В настоящее время разрабатывается также возможность формирования заданий отделу КИПиА на различные типы приборов.

Использование СУБД ПРОЕКТ совместно с другими системами (рис. 3) позволяет придать законченный вид решению по автоматизации монтажного проектирования.

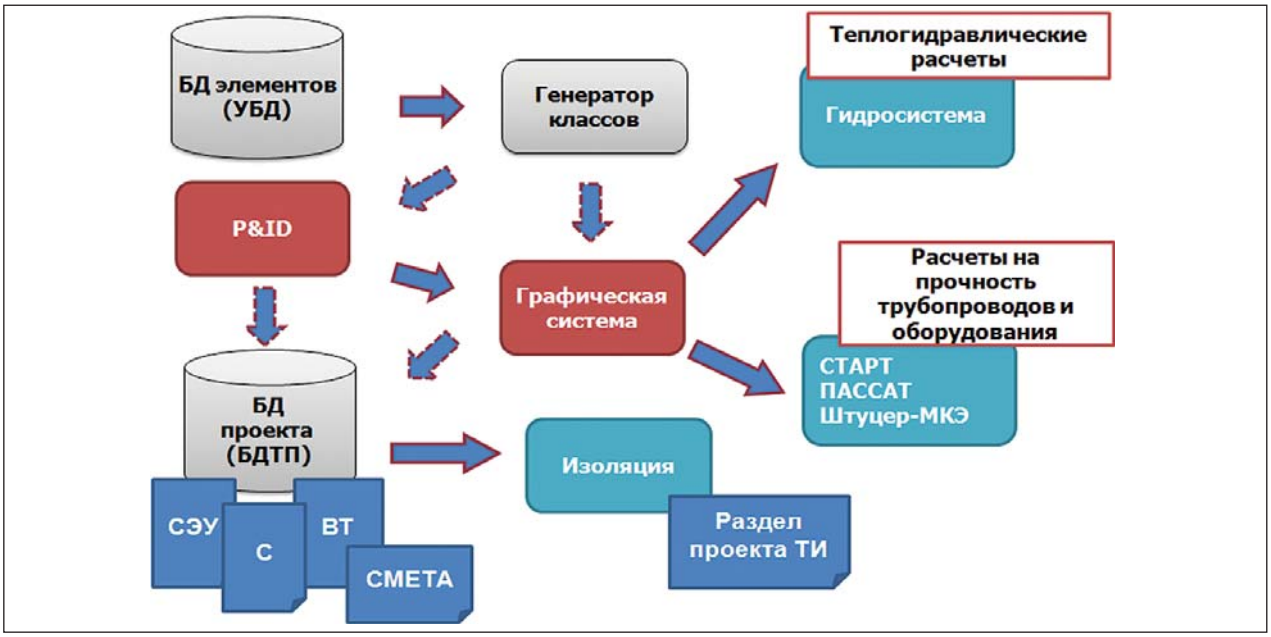


Рис. 3. **Схема интеграции СУБД ПРОЕКТ**

До появления в виде коммерческого продукта СУБД ПРОЕКТ несколько лет успешно эксплуатировалась ЗАО «Инженерно-промышленная нефтехимическая компания» при проектировании нефтеперерабатывающих производств, в том числе с использованием PDMS (AVEVA), и положительно себя зарекомендовала.

Литература

1. *Магалиф В. Я., Иткина Д. М., Корельштейн Л. Б.* Монтажное проектирование химических, нефтехимических, и нефтеперерабатывающих производств. — М., 2010. ???
2. *Rase H.* Piping Design for Process Plants. NewYork, 1963.
3. *Фишер А.* Методы выделения групп в АВС-анализе // Логистика и Управление. — 2008. — № 1.
4. *Корельштейн Л. Б., Тимошкин А. И.* Состояние и тенденции развития зарубежного и отечественного рынков программных продуктов для проектирования технологических установок. Аналитический обзор. — М., 2005.
5. *Karnie A., Reich Y.* Managing the Dynamic of New Product Development Processes. A new Product Lifecycle Management Paradigm. Springer. 2011.
6. Rich Text Format (RTF) Specification, http://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=10725.
7. ПБ 03-585–03. Правила устройства и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов.
8. ПБ 10-573–03. Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды.
9. СА 03-005–07. Технологические трубопроводы нефтеперерабатывающей, нефтехимической и химической промышленности. Требования к устройству и эксплуатации. Стандарт ассоциации РОСТЕХЭКСПЕРТИЗА.
10. СА 03–003–07. Расчеты на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов. Стандарт ассоциации РОСТЕХЭКСПЕРТИЗА.
11. *Полозова О. В., Шапиро Е. Е.* «Как упростить выбор изделий трубопроводов при монтажном проектировании // Трубопроводная арматура и оборудование. — 2011. — №6.
12. РД 10-249–98. НОРМЫ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды. ЗАО «НТЦ ПБ», 2010.

A. I. Timoshkin, O. V. Polozova, E. E. Shapiro

Piping Material Management Automation in Plant Design

The effective approach of pipe, fitting and valve selection in plant design as part of material management is described, as well as Russian Piping Material database management software system for material management, design documentation generation and integration with CAD systems.

Key words: *piping material classes, piping element selection, pipe, fitting, valve, material management.*

Система автоматизированного проектирования ЗАО «ИПН»

А. З. Миркин, П. А. Капылов

В статье описываются принципы разработки и внедрения, структура и текущее состояние системы САПР в ЗАО ИПН. Рассказано о входящем в систему программном обеспечении и его интеграции между собой.

Ключевые слова: проектирование технологических установок, САПР.

В современных условиях проектирования по требованию заказчиков проектные организации вынуждены сокращать сроки проектирования при сохранении высокого качества выпускаемых проектов. Выполнение этих требований невозможно без высокой организации и автоматизации процесса проектирования.

Для создания в ЗАО «ИПН» автоматизированной системы проектирования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств необходимо было решить следующие проблемы:

1) подбор квалифицированных кадров;

2) создание нормативно-технической базы;

3) автоматизация выпуска проектной документации;

4) оптимизация выбора конструктивных и технологических параметров;

5) внедрение электронного архива и документооборота.

Решение кадровой проблемы

Проектирование современных эффективных технологических производств, обеспечивающих экологическую и промышленную безопасность, даже с применением современных САПР может выполняться только высококвалифицированными специалистами-проектировщиками, в совершенстве владеющими предметом проектирования и принимающими адекватные решения. Наиболее сложной и ответственной задачей является создание команды профессионалов — проектировщиков по всем разделам проекта. Специалисты подбирались не только в Москве, но и в других регионах России — Грозном, Волгограде, Саратове, Самаре, Тамбове и др.

Дополнительно для повышения квалификации специалистов проводилось обучение по нормам и правилам Ростехнадзора, а в рамках самого предприятия — по отдельным специальностям. Второй этап обучения — применение программ: AutoCAD со специализированными решениями, PDMS, СТАРТ и др.

На протяжении ряда лет ЗАО «ИПН» принимало на работу молодых специалистов — выпускников МГТУ им. Н. Э. Баумана, МЭИ, РХТУ им. Д. И. Менделеева, РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. В 2010 г. был открыт филиал кафедры «Информатики и компьютерного проектирования» РХТУ им. Д. И. Менделеева. Молодые специалисты прикрепляются к опытным специалистам-наставникам и в ряде случаев посещают специальные курсы обучения.

С целью внедрения САПР в структуре ЗАО «ИПН» был создан отдел САПР. Поскольку отделу предстояло работать на стыке специальностей, была создана команда, не только хорошо разбирающаяся в САПР, но и понимающая процесс проектирования, разговаривающая с проектировщиками «на одном языке». Хорошим подспорьем в решении стоящих задач является энтузиазм сотрудников.

Создание нормативно-технической базы

Для эффективного и оперативного применения действующих стандартов всеми проектировщиками в состав библиотеки стандартов включены справочно-информационные системы Гранд-СтройИнфо, Стройконсультант, NormaCS, Техэксперт, RusSteel, WinAlloy, WinSteel, заключены договора их регулярного обновления. Дополнительно ряд стандартов отсканированы и помещены в библиотеку стандартов. Специалистами НТП Трубопровод и ЗАО «ИПН» разработаны 18 стандартов предприятия, 5 из которых рекомендованы Ростехнадзором для межотраслевого применения:

1. Расчеты на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов. СА-03-003–07.

2. Расчет на прочность сосудов и аппаратов СА 03-004–07.

3. Сосуды и аппараты. Расчет на сейсмические воздействия. СТО-СА-03.003–2009.

4. Тепловые сети. Нормы и методы расчета на прочность. СТО 10.001–2009.

5. Технологические трубопроводы нефтеперерабатывающей, нефтехимической и химической промышленности. СА 03-005-07.

Прежде чем приступить к разработке системы автоматизированного проектирования, необходимо было детально проанализировать процесс проектирования, выявить все маршруты передачи информации между проектными подразделениями в процессе проектирования, определить наиболее трудоемкие операции. В течение длительного времени разрабатывались процедуры и практики на все операции выполнения проектов, управления процессом проектирования и делопроизводством. Мы понимали, что эффективно автоматизировать можно только хорошо отлаженный и систематизированный процесс, а беспорядок автоматизировать в принципе невозможно. Всего было разработано 9 руководств по качеству, 118 процедур и практик.

В процессе подготовки к внедрению САПР были разработаны 65 электронных шаблонов проектных документов и порядка 100 форм заданий исходных данных. Единообразное оформление проектной документации в соответствии с ЕСКД и СПДС обеспечено разработкой шаблонов чертежей, содержащих единые настройки текстовых стилей, слоев и размерных стилей. Библиотеки символов выполненные в соответствии с принятыми внутренними стандартами, не только гарантируют качество выпускаемой документации, но и сокращают трудозатраты при проектировании.

Для эффективного функционирования САПР аппаратное обеспечение подбиралось с учетом системных требований программного обеспечения и выполняемых задач. Каждое рабочее место комплектовалось персональным компьютером, по конфигурации соответствующим содержанию выполняемой работы. Развертывание сетевой инфраструктуры осуществлялось в расчете на перспективы роста нагрузки с возможностью масштабирования. Особое внимание уделялось вопросу сохранности информации и защиты от несанкционированного доступа. Для обеспечения надежности хранения информация на серверах было организовано резервное копирование и архивирование.

Проектные подразделения были оснащены современной техникой для печати и размножения выпускаемой документации, а отдел выпуска широкоформатным сканером для сканирования архивных чертежей и хранения их в электронном архиве.

Автоматизация выпуска проектной документации

Программное обеспечение для выпуска проектной документации можно разделить на 3 группы (рис. 1):

1. Системное программное обеспечение общего назначения (на схеме не показано).

• Операционные системы

• MS Office (MS Word, MS Excel и т.д.): работа с текстовой частью проекта;

• MS-Project: программа управления проектами;

• другое системное программное обеспечение.

2. Программное обеспечение для автоматизированного выпуска проектной документации, в том числе:

• AutoCAD со специализированными решениями: Выполнение чертежей, монтажно-технологических схем, генпланов, строительных и архитектурных чертежей.

• ***СУБД «Проект»****: система, реализующая функции хранения информации о трубопроводных изделиях, их использования в проекте и выдачи на основе этой информации текстовых документов по проекту. Состоит из Универсальной базы данных (УБД), Генератора классов (ГК) и Базы данных текущего проекта (БДТП). Подробнее о данной системе рассказано в статье «Автоматизация управления изделиями и материалами в монтажном проектировании».

• AVEVA PDMS: трехмерная система проектирования промышленных предприятий (рис. 2). Автоматическое получение из модели полного набора чертежей, в том числе деталировочных чертежей трубопроводов (так называемых «изометричек»). Преимуществом системы является многолетняя история, что позволило разработчикам накопить большой опыт, следствием чего является отлаженность системы, устойчивая ее работа, что чрезвычайно важно с точки зрения сохранности данных проекта в условиях ограниченности сроков проектирования.;

• ElectriCS: Разработка принципиальной электрической схемы;

• САПР-Альфа: Составление принципиальных электрических схем, создание заказной документации на щиты, документации по внешнему монтажу электропроводок;

• ***Изоляция***: Расчет теплоизоляции и выпуск техномонтажных ведомостей, ведомостей объемов работ и ведомостей материалов;

• ГРАНД-Смета: составление смет.

* Здесь и далее выделены разработки ООО «НТП Трубопровод».

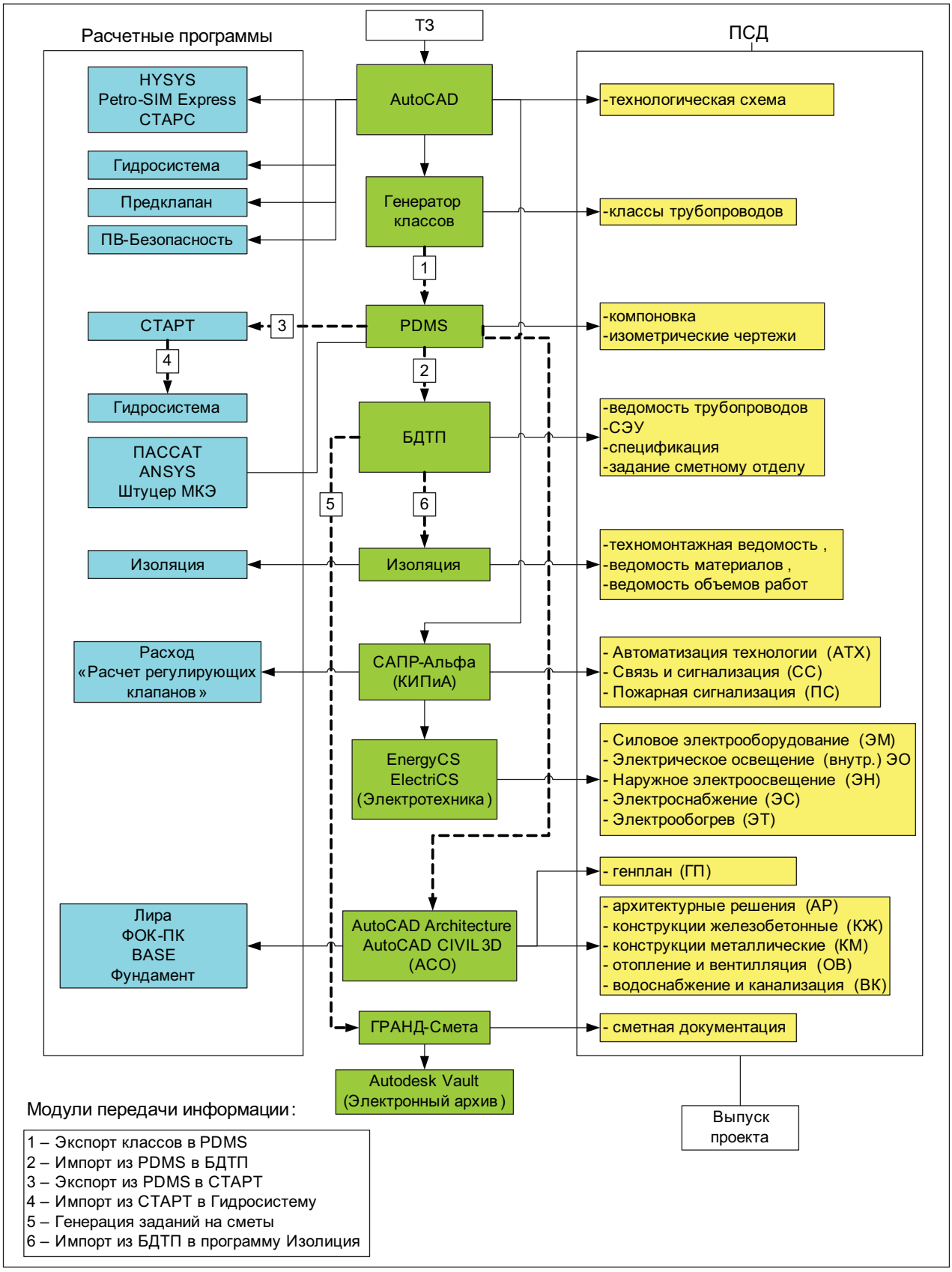


Рис. 1. **Принципиальная блок-схема САПР ЗАО «ИПН»**

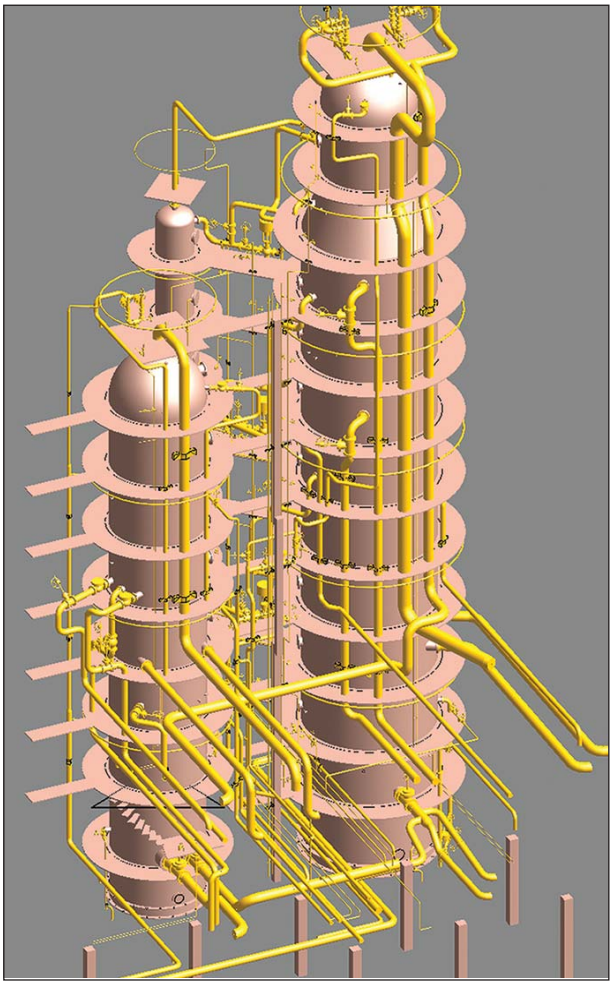


Рис. 2. **Компоновка блока колонн, выполненная в системе AVEVA PDMS**

3. Программное обеспечение для автоматизации подготовки заданий между отделами.

При использовании разноплатформенных систем возникла необходимость их интеграции. Поскольку НТП «Трубопровод» сам является разработчиком программного обеспечения, для исключения повторного ручного ввода данных были разработаны модули экспорта/импорта данных между ПО собственной разработки и сторонним ПО. В некоторых случаях для облегчения передачи информации между специалистами при невозможности реализации автоматической передачи данных были разработаны модули, генерирующие задания в нужном формате, сокращая тем самым трудозатраты на ручной сбор информации и ее оформление. Таким образом, были существенно сокращены трудозатраты и повышена эффективность использования программ автоматизации.

Для успешного внедрения и эксплуатации системы трехмерного проектирования важным условием является наличие базы данных по российским стандартам. В связи с разработкой в нашей компании собственной базы элементов трубопроводов, входящей в систему СУБД Проект, и нецелесообразностью параллельного ведения нескольких баз, возникла необходимость в комплексной интеграции системы СУБД Проект и AVEVA PDMS. В настоящее время ведется разработка программы интеграции. Уже выполнена в тестовом режиме на рабочем проекте передача классов из Генератора классов в PDMS, и последующая выгрузка данных по модели из PDMS в БДТП.

При проведении прочностного расчета расчетная модель трубопроводов для СТАРТ получается из PDMS с использованием модуля PDMS-СТАРТ.

Для выпуска проекта по тепловой изоляции трубопроводов используется программа Изоляция, данные для которой получаются при помощи интерфейса с БДТП.

Оптимизация выбора конструктивных и технологических параметров

Для технологических расчетов используются следующие программы:

- HYSYS и Petro-Sim Express: моделирование стационарных и динамических режимов работы технологических систем;
- ***Гидросистема***: теплогидравлический расчет и выбор диаметров трубопроводов;
- ***Предклапан***: расчет и выбор предохранительных устройств;
- Расход: Расчет сужающих устройств;
- Расчет регулирующих устройств;
- ***СТАРС***: Расчет теплофизических свойств и фазового равновесия веществ по их составу;
- ПВ-Безопасность: Расчетно-справочная система по пожаровзрывобезопасности.
- Токси+Риск: Оценка зоны воздействия поражающих факторов при авариях.

Для расчета прочности и конструктивных параметров используются следующие программы:

- ***СТАРТ***: прочностной расчет трубопроводов, определение толщины стенки труб и деталей трубопроводов, выбор конфигурации трубопровода, типов, количества и размещения опор.
- ***Пассат***: прочностной расчет сосудов и аппаратов, подбор конструктивных параметров.
- ***Штуцер МКЭ***: расчет на прочность узлов врезок;
- ANSYS: расчеты МКЭ общего назначения;

• BASE: система общестроительных расчетов;

• LIRA: расчет пространственных железобетонных и металлоконструкций;

• ФОК, Фундамент: расчет и проектирование фундаментов;

Экономическая эффективность от внедрения САПР

Снижение капитальных и эксплуатационных оптимизаци выбора диаметра, толщины стенки и материала труб и деталей трубопроводов, типоразмеров арматуры, материала и толщины теплоизоляции, размеров строительных конструкций, оптимизаци выбора сосудов, аппаратов, насосов, компрессоров и режимов работы, включая устройства для нагрева и охлаждения потоков. Сокращени сроков и затрат на пусконаладочные работы и ремонт оборудования.

В снижении капитальных и эксплуатационных расходов должен быть заинтересован заказчик — собственник проектируемого объекта. Но такой анализ обычно не проводится.

Экономический эффект в проектной организации от внедрения САПР может быть получен в основном за счет внедрения программ, которые обеспечивают выпуск проектно-сметной документации или автоматизированное выполнение трудоемких работ, которые ранее производились без применения программ. В САПР ЗАО «ИПН» к таким работам, в частности, относятся:

1. Генерирование классов трубопроводов, компоновка оборудования и выпуск изометрических чертежей, выпуск документации по трубопроводам и изоляции, КИП и электротехнике, выпуск смет.

2. Формирование и передача информации:

• экспорт классов в PDMS;

• импорт из PDMS в БДТП;

• экспорт из PDMS в СТАРТ;

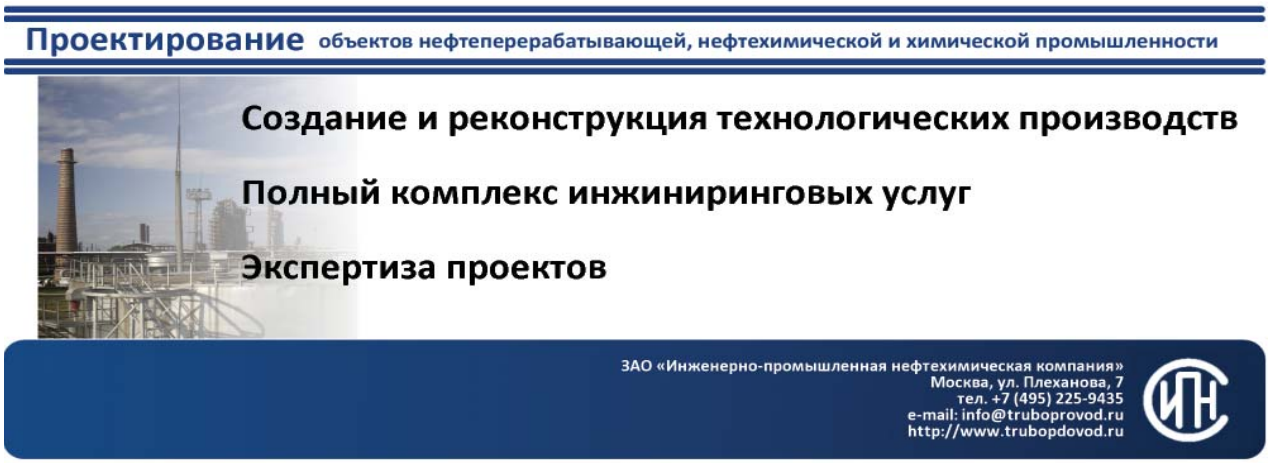
• выдача заданий на сметы;

• импорт из БДТП в программу ИЗОЛЯЦИЯ.

Кроме того, внедрение комплексной автоматизации позволяет на этапе проектирования освободить от выполнения рутинных операций инженеров –проектировщиков и сконцентрировать их внимание на инженерной проработке проекта. Применение САПР позволяет еще на этапе проектирования выявлять ошибки, осуществлять автоматический поиск коллизий. Более качественный проект приводит к сокращению затрат заказчика при выявлении и исправлении ошибок на стадии строительства. При этом снижаются затраты проектной организации не только на исправление допущенных ошибок, но и на штрафные санкции со стороны заказчика в случаях, предусмотренных контрактами.

A. Z. Mirkin, P. A. Kapylov

CAD system in ZAO IPN

The principles of development and implementation of CAD systems in ZAO IPN, its structure and current state are described. The software included into the system is listed, the problems of software integration are considered.

Key words: *plant design, CAD system.*