

## “Семейство” программных комплексов АСТРА-НОВА<sup>TM</sup> 2021<sup>TM</sup>

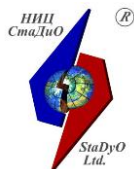
для автоматизированных расчетов трубопроводных систем  
по выбору основных размеров, на статическую и циклическую прочность, на  
сейсмические воздействия, вибропрочность и динамические процессы  
в соответствии с российскими нормативными требованиями

### Общее описание

- АСТРА-АЭС<sup>TM</sup>** (аттестационный паспорт Ростехнадзора №292 от 14.04.2011, рег. №614 от 16.09.2009) – ПНАЭ Г-7-002–86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. МТ-Т.0.03.326-13. Методика расчетного анализа сейсмостойкости элементов действующих АЭС в рамках метода граничной сейсмостойкости
 
- АСТРА-ТЭС<sup>TM</sup>** (сертификат соответствия № RA.RU.АБ86.Н01185 от 06.08.2019) – РД 10-249–98. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды
 
- АСТРА-НЕФТЕХИМ<sup>TM</sup>** (сертификат соответствия № RA.RU.АБ86.Н01185 от 06.08.2019) – РТМ 38.001–94. Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических стальных трубопроводов, ГОСТ 32388-2013 Трубопроводы технологические. Нормы и методы расчета на прочность, вибрацию и сейсмические воздействия
 
- АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ<sup>TM</sup>** (сертификат соответствия № RA.RU.АБ86.Н01185 от 06.08.2019) – РД 10-400–01. Нормы расчета на прочность трубопроводов тепловых сетей, ГОСТ Р 55596-2013 Сети тепловые. Нормы и методы расчета на прочность и сейсмические воздействия
 
- АСТРА-МАГИСТР<sup>TM</sup>** (сертификат соответствия № RA.RU.АБ86.Н01185 от 06.08.2019) – СНиП 2.05.06–85. Магистральные трубопроводы, СП 36.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 2.05.06–85\*) Магистральные трубопроводы ГОСТ Р 55989-2014 Магистральные газопроводы. ГОСТ Р 55990-2014 Промысловые трубопроводы
 
- АСТРА-СВД<sup>TM</sup>** (сертификат соответствия № RA.RU.АБ86.Н01185 от 06.08.2019) – РТМ 26-01-44-78. Детали трубопроводов на давление свыше 10 до 100 МПа. ГОСТ Р 55600-2013. Трубы и детали трубопроводов на давление свыше 100 до 320 МПа. Нормы и методы расчета на прочность
 
- АСТРА-СУДПРОМ<sup>TM</sup>** (сертификат соответствия № RA.RU.АБ86.Н01185 от 06.08.2019) – РД5Р.4322-86. Трубопроводы судовые. Методика расчетов на статическую и малоцикловую прочность. РД5Р.5137-73. Фланцевые соединения судовых трубопроводов и систем. Методика и нормы расчета на прочность и плотность
 
- АСТРА-СТАДИО<sup>TM</sup>** (аттестационный паспорт Ростехнадзора №292 от 14.04.2011, рег. №614 от 16.09.2009) – уточненный расчет температурного поля, НДС и прочности деталей трубопроводов: тройников, отводов, переходов, линзовых компенсаторов и др. (оболочечные и трехмерные упругие и упругопластические схемы МКЭ)
 







**Научно-исследовательский центр СтаДиО**

Инв.№ \_\_\_\_\_

**“Утверждаю”**  
Генеральный директор ЗАО НИЦ СтаДиО

\_\_\_\_\_ **А.М.Белостоцкий**  
“ ” \_\_\_\_\_ 2021 г.

**“Семейство” программных комплексов АСТРА-НОВА’2021™**  
(релиз 202105)

**Автоматизированные расчеты трубопроводных систем  
по выбору основных размеров, на статическую и циклическую прочность,  
на сейсмические воздействия, вибропрочность и динамические процессы  
в соответствии с российскими нормативными требованиями**

**Общее описание**

Руководитель разработки  
член-корр. РААСН, докт.техн.наук, профессор **А.М. Белостоцкий**

Ответственные исполнители  
**Г.А. Воронова**  
**А.Л. Потапенко**  
**А.А. Аул**  
**К.И. Островский**  
**И.В. Кушнаренко**  
**О.Ю. Клепец**



*СТАДИО, АСТРА-НОВА, АСТРА-АЭС, АСТРА-ТЭС, АСТРА-НЕФТЕХИМ, АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ, АСТРА-МАГИСТР, АСТРА-СВД, АСТРА-СУДПРОМ, АСТРА-ДЕТАЛЬ, АСТРА-СТАЦ, АСТРА-ФОРМ, АСТРА-СЕЙСМ, АСТРА-ВИБР, АСТРА-ДИН, АСТРА-СТАДИО, ПРЕ-АСТРА, ПОСТ-АСТРА* являются зарегистрированными в России и др. странах СНГ торговыми марками ЗАО “Научно-исследовательский центр СтаДиО” (НИЦ СтаДиО).

IBM является зарегистрированной торговой маркой корпорации International Business Machines. Windows, Word, Visual C++ являются зарегистрированными торговыми марками Microsoft Corporation. AutoCAD является зарегистрированной торговой маркой AutoDesk, Inc., CADWorx/PIPE – зарегистрированной торговой маркой COADE, NetWare – зарегистрированной торговой маркой Novell, Inc, Compaq Visual Fortran 6.6 – зарегистрированной торговой маркой корпорации Compaq, Intel Fortran 11 – зарегистрированной торговой маркой корпорации Intel. Другие названия фабричных марок или продуктов являются зарегистрированными торговыми марками соответствующих компаний.

**"Семейство" программных комплексов *АСТРА-НОВА'2021* (релиз 202105). Автоматизированные расчеты трубопроводных систем по выбору основных размеров, на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия, вибропрочность и динамические процессы в соответствии с российскими нормативными требованиями. Общее описание.**

Настоящий документ содержит общее описание методических и нормативных основ, алгоритмов и программ комплекса *АСТРА-НОВА'2021* (Windows-версия для IBM-совместимых компьютеров), предназначенного для автоматизированного расчета произвольных пространственных разветвленных трубопроводных систем на статическую и циклическую прочность (программа *АСТРА-СТАЦ*), на сейсмические воздействия (*АСТРА-СЕЙСМ*), на вибропрочность (*АСТРА-ВИБР*) и неустановившиеся динамические процессы (*АСТРА-ДИН*), для уточненных расчетов деталей по оболочечным и трехмерным схемам МКЭ (*АСТРА-СТАДИО*), а также для «предварительного» расчёта по выбору основных размеров (*АСТРА-ДЕТАЛЬ*) в соответствии с требованиями действующих Норм ПНАЭ Г-7-002-86 (*АСТРА-АЭС*), РД 10-249-98 (*АСТРА-ТЭС*), РГМ 38.001-94, ГОСТ 32388-2013 (*АСТРА-НЕФТЕХИМ*), РД 10-400-01, ГОСТ Р 55596-2013 (*АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ*), СНиП 2.05.06-85, СП 36.13330.2012, ГОСТ Р 55989-2014, ГОСТ Р 55990-2014 (*АСТРА-МАГИСТР*) и ГОСТ Р 55600-2013, РД РГМ 26-01-44-78 (*АСТРА-СВД*), РД5Р 4322-86, РД5Р 5137-73 (*АСТРА-СУДПРОМ*). Приведено описание сеанса работ с комплексом *АСТРА-НОВА'2021*, включая режимы препроцессорной подготовки исходных данных (*ПРЕ-АСТРА*), проведения расчетов и постпроцессорной обработки результатов расчетов (*ПОСТ-АСТРА*), процедуры инсталляции комплекса и сводки диагностических сообщений.



## Аннотация

Настоящий документ содержит общее описание методических и нормативных основ, алгоритмов и программ “семейства” **АСТРА-НОВА’2021** (версия для ПЭВМ IBM-совместимых, релиз 202105), предназначенного для автоматизированного проектирования и поверочных расчетов произвольных пространственных разветвленных и протяженных трубопроводных систем на статическую и циклическую прочность (программы **АСТРА-СТАЦ** и **АСТРА-СТАДИО**), на сейсмические воздействия (**АСТРА-СЕЙСМ** и **АСТРА-СТАДИО**), на вибропрочность (**АСТРА-ВИБР**), неустановившиеся динамические процессы (**АСТРА-ДИН**), а также для расчёта по выбору основных размеров (**АСТРА-ДЕТАЛЬ**) в соответствии с требованиями действующих российских Норм ПНАЭ Г-7-002-86 (**АСТРА-АЭС**), РД 10-249-98 (**АСТРА-ТЭС**), РТМ 38.001-94, ГОСТ 32388-2013 (**АСТРА-НЕФТЕХИМ**), РД 10-400-01, ГОСТ Р 55596-2013 (**АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ**), СНиП 2.05.06-85, СП 36.13330.2012, ГОСТ Р 55989-2014, ГОСТ Р 55990-2014 (**АСТРА-МАГИСТР**), ГОСТ Р 55600-2013, РД РТМ 26-01-44-78 (**АСТРА-СВД**), РД5Р.4322-86, РД5Р.5137-73 (**АСТРА-СУДПРОМ**).

Приведено также описание сеанса работ с комплексом семейства **АСТРА-НОВА’2021**, включая режимы препроцессорной подготовки исходных данных – построения расчетной модели (**ПРЕ-АСТРА**) – и постпроцессорной обработки результатов расчетов (**ПОСТ-АСТРА**), сводки диагностических сообщений, процедуры инсталляции семейства, его сопровождения и обновления.

В версии **АСТРА-НОВА’2021**, являющейся законной и достойной преемницей поколения комплексов **АСТРА-АЭС** и **АСТРА-ТЭС** “доперсональной” эры (1976–1989 гг.), аттестованной в Госатомнадзоре РФ версии 6.1 комплекса **АСТРА-АЭС** (аттестационный паспорт № 40 от 21.12.1995г.), комплекса **АСТРА-АЭС’2009**, аттестованный в Ростехнадзоре (аттестационный паспорт № 292 от 14.04.2011 г.), версии на ЕС ЭВМ, VAX/VMS и ПЭВМ) и ранних версий **АСТРА-НОВА** (6.2, -99, -2001, -2003, -2005, -2007, -2009, -2011, -2013, -2015, -2017), реализованы модули расчета на прочность трубопроводов теплосетей (**АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ**) и магистральных газо-, нефте- и нефтепродуктопроводов (**АСТРА-МАГИСТР**). Программы **АСТРА-ТЭС**, **-НЕФТЕХИМ**, **-ТЕПЛОСЕТЬ**, **-МАГИСТР**, **-СВД**, **-СУДПРОМ** в очередной раз сертифицированы в “органе по сертификации программной продукции в строительстве” ООО ЦСПС на соответствие требованиям следующих нормативных документов: РД 10-249-98, РД 10-400-01, ГОСТ Р 55596-2013, РТМ 38.001-94, ГОСТ 32388-2013, СНиП 2.05.06-85, СП 36.13330.2012, ГОСТ Р 55989-2014, ГОСТ Р 55990-2014, ГОСТ Р 55600-2013, РД РТМ 26-01-44-78, РД5Р.4322-86, РД5Р.5137-73, СНиП 2.01.07-85, СП 20.13330.2016, СНиП II-7-81, СП 14.13330.2018, (сертификат соответствия № РОСС RU.СП15.Н00100, срок действия с 01.07.2009 г. по 01.07.2011 г., сертификат соответствия № РОСС RU.СП15.Н00415, срок действия с 01.07.2011 г. по 30.06.2013 г., сертификат соответствия № РОСС RU.СП15.Н00630, срок



действия с 12.07.2013 г. по 11.07.2015 г., сертификат соответствия № РОСС RU.СП15.Н00848, срок действия с 13.07.2015 г. по 12.07.2017 г., сертификат соответствия № RA.RU.АБ86.Н01034 срок действия с 13.07.2017 по 12.07.2019 г., сертификат соответствия № RA.RU.АБ86.Н01185, срок действия с 06.08.2019 г. по 05.08.2022 г.).

Существенно расширены возможности “традиционных” расчетных пре- и постпроцессора (**ПРЕ-АСТРА** и **ПОСТ-АСТРА**), реализована двусторонняя связь с известными САПР ПГС (CADWorx/PIPE, PDS, SmartPlant 3D и др.). Дополнительно реализованы: отрывы трубопроводов от опор трения (односторонние связи), вязкоупругие демпферы, собственные температурные перемещения промежуточных опор, оболочечная податливость не только отводов (эффект Кармана), но и тройниковых соединений, оценка герметичности фланцевых соединений, расчет напряжений в “ненормализованных” линзовых и сильфонных компенсаторах, поиск коллизий в исходном и деформированном состояниях, много других полезных функций.

Важный качественный шаг сделан и в уточненном учете статических и динамических характеристик сложных подсистем (детали, опорные конструкции и оборудование) в составе общей модели трубопроводной системы – формирование и использование т.н. редуцированных суперэлементных матриц влияния (жесткости, масс, нагрузок) Крейга-Бемптона.

В составе и при полной совместимости с **АСТРА-НОВА'2021** (а также автономно) поставляется подсистема **АСТРА-СТАДИО** для уточненного расчета температурных полей, напряженно-деформированного состояния (по пространственно-оболочечным и трехмерным схемам метода конечных элементов), статической, циклической и сейсмической прочности тяжело нагруженных деталей трубопроводов – ортогональных и косых тройников (сварных и штампованных, с накладками и плакировкой), отводов и гибов (в том числе, секторных с учетом эллиптичности и переменной толщины сечения), косых стыков, конических переходов, линзовых/сильфонных компенсаторов, сварных соединений и др. Подчеркнем, что **АСТРА-СТАДИО** является мощным инструментом не только в руках расчетчика-проектировщика, но и (в еще большей степени, по сути, безальтернативно) – исследователя и диагноста.

Настоящая версия допускает расчетное обоснование существенно более сложных трубопроводных систем (с ощутимо большей скоростью счета) при полной совместимости по исходным данным и при подтвержденной идентичности сопоставимых результатов с версиями 6.1, 6.2, -99, '2001, '2003, '2005, '2007, '2009, '2011, '2013, '2015, '2017.

Документация по всему семейству выходит в компактном “карманно-коробочном” формате, поставляется в бумажном виде, Word- и pdf-файлами. С учетом вышесказанного выпущены также отдельные полноценные документы *Общее описание. Приложения* (полезная, но необязательная для “рядового” пользователя информация), *Сеанс работы* и **АСТРА-СТАДИО. Общее описание. Сеанс работы**, который включен в комплект поставки *только* для пользователей **АСТРА-СТАДИО**.

## Содержание

Аннотация.....	6
1. Введение .....	9
2. Нормативно-методические основы, исходные данные и результаты расчетов	14
2.1. Расчёт по выбору основных размеров.....	14
2.2. Поверочный расчёт на прочность.....	25
3. Расчетные модели трубопроводных систем .....	54
4. Вычислительные алгоритмы.....	67
5. “Семейство” программных комплексов <i>АСТРА-НОВА</i> .....	91
5.1. Общие положения. Требования к системе и оборудованию .....	91
5.2. Количественные ограничения расчетной модели .....	92
5.3. Программный модуль <i>АСТРА-ДЕТАЛЬ</i> .....	92
5.4. Программный модуль <i>АСТРА-СТАЦ</i> .....	93
5.5. Программный модуль <i>АСТРА-ФОРМ</i> .....	103
5.6. Программный модуль <i>АСТРА-СЕЙСМ</i> .....	103
5.7. Программный модуль <i>АСТРА-ВИБР</i> .....	104
5.8. Программный модуль <i>АСТРА-ДИН</i> .....	105
5.9. Программный модуль <i>ПРЕ-АСТРА</i> .....	105
5.10. Программный модуль <i>ПОСТ-АСТРА</i> .....	106
5.11. Программный модуль <i>АСТРА-СТАДИО</i> .....	106
5.12. Диагностические и информационные сообщения.....	108
6. Сеанс работы с комплексом (краткое описание) .....	112
6.1. Использование визуального интерактивного препроцессора .....	114
6.2. Импорт данных из альтернативных программ расчета и САПР.....	119
6.3. Проведение расчетов .....	121
6.4. Постпроцессор.....	124
7. Установка комплекса программ семейства <i>АСТРА-НОВА</i> .....	127
7.1. Соглашение по директориям.....	127
7.2. Соглашение по файлам.....	127
7.3. Поддержка проектов предыдущих версий <i>АСТРА-НОВА</i> .....	128
7.4. Комплект поставки.....	128
7.5. Установка .....	129
8. Сопровождение и обновление семейства <i>АСТРА-НОВА</i> .....	142
Литература.....	143
Приложение 1. Основные условные обозначения и сокращения.....	152
Приложение 2. Алгоритм статического расчета трубопроводных систем .....	155
Приложение 3. Численная методика расчета подземных трубопроводов .....	170
Приложение 4. Определение местной жесткости узлов врезки штуцера .....	181

## 1. Введение

Комплексы программ семейства *АСТРА-НОВА’2021* (версия для IBM-совместимых, релиз 202105), аккумулирующие многолетний опыт разработок и интенсивной эксплуатации, предназначены для поверочных расчетов произвольных пространственных разветвленных и протяженных трубопроводных систем атомных и тепловых (пара и горячей воды) энергетических установок, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств, тепловых сетей, магистральных газо-, нефте- и нефтепродуктопроводов, трубопроводов высокого давления и судовых трубопроводов на статическую и циклическую прочность (программные модули *АСТРА-СТАЦ* и *АСТРА-СТАДИО*), на сейсмические воздействия, заданные спектрами ответа и акселерограммами (*АСТРА-СЕЙСМ*, *АСТРА-СТАДИО*), на вибропрочность для установившихся режимов моно- и полигармонических колебаний (*АСТРА-ВИБР*) и на неустановившиеся динамические процессы (*АСТРА-ДИН*) в соответствии с требованиями действующих российских нормативных документов Норм ПНАЭ Г-7-002-86 (*АСТРА-АЭС*), РД 10-249-98 (*АСТРА-ТЭС*), РТМ 38.001-94, ГОСТ 32388-2013 (*АСТРА-НЕФТЕХИМ*), РД 10-400-01, ГОСТ Р 55596-2013 (*АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ*) и СНиП 2.05.06-85, СП 36.13330.2012, ГОСТ Р 55989-2014, ГОСТ Р 55990-2014 (*АСТРА-МАГИСТР*), ГОСТ Р 55600-2013, РД РТМ 26-01-44-78 (*АСТРА-СВД*), РД5Р.4322-86, РД5Р.5137-73 (*АСТРА-СУДПРОМ*) в процессе автоматизированного проектирования и (или) диагностики-мониторинга.

В составе и при полной совместимости с *АСТРА-НОВА’2021* (а также автономно) существенно развита подсистема *АСТРА-СТАДИО* для уточненного расчета температурных полей и НДС (по оболочечным и трехмерным схемам метода конечных элементов), статической, циклической и сейсмической прочности тяжело нагруженных деталей трубопроводов – ортогональных и косых радиальных тройников (сварных и штампованных, с накладками и плакировкой), отводов, гибов и колен (в том числе, секторных, с учетом присоединенных труб, эллиптичности и переменной толщины сечения), косых стыков, линзовых и сильфонных компенсаторов, конических переходов, сварных соединений и др.

Важный качественный шаг сделан и в уточненном учете статических и динамических характеристик сложных подсистем (детали, опорные конструкции и оборудование) в составе общей суперэлементной модели трубопроводной системы – формирование и использование т.н. редуцированных матриц влияния (жесткости, масс и нагрузок) Крейга-Бемптона.

Другой по сложности «полюс» прочностных расчетов представлен, начиная с настоящей версии *АСТРА-НОВА’2021*, вновь разработанным по многочисленным «заявкам публики» модулем *АСТРА-ДЕТАЛЬ* – расчет по выбору основных размеров деталей.

Версия *АСТРА-НОВА’2021* допускает расчетное обоснование

существенно более сложных трубопроводных систем (с большей скоростью счета) при полной совместимости по исходным данным и при подтвержденной идентичности результатов с версиями 6.1, 6.2, ‘99, ‘2001, ‘2003, ‘2005, ‘2007, ‘2009, ‘2011, ‘2013, ‘2015, ‘2017.

Настоящий документ содержит описание нормативно-методических основ, расчетных моделей, вычислительных алгоритмов, основных характеристик и возможностей комплекса программ *АСТРА-НОВА*’2021, а также сеанса работы пользователя с комплексом, включая диалоговую систему подготовки исходных данных (*ПРЕ-АСТРА*) и постпроцессорное представление результатов расчета (*ПОСТ-АСТРА*). Приводятся основные сведения о двусторонней связи с известными САПР ПГС (CADWorx/PIPE, PDS, SmartPlant 3D и др.). Приводится описание комплекса и процедуры его инсталляции.

Программные комплексы семейства *АСТРА-НОВА*’2021 детально документированы и верифицированы.

Корневой “системообразующий” комплекс *АСТРА-АЭС* был первым из отечественных ПК *аттестован в Госатомнадзоре РФ (паспорт № 40 от 21.12.1995 г., рег. № 9 от 05.06.1995 г.)*, в 2009-2011 гг. прошел “плановую” переаттестацию в *Ростехнадзоре* (с учетом всех новых возможностей, *паспорт № 292 от 14.04.2011 г., рег. № 614 от 16.09.2009 г.*), внедрен в ведущих фирмах отрасли (ОАО “Атомэнергопроект”, ОКБ “Гидропресс”, ПКФ “Росэнергоатом”, СвЕРДНИИХИММаш, АО РОСЭП, ЗАО “Сельэнергопроект”, ОАО ЗИОМАР, ЗАО “Технопроект”, НТЦ Госатомнадзора РФ, ЗАО «РАОПРОЕКТ», Киевский и Харьковский “Энергопроект”, НПО “Вектор”, НТЦ ЯРБ Украины, Энергопроект (Болгария), Игналинская АЭС и др.) и де-факто является стандартом в “постсоветской” атомной энергетике. Накоплен многолетний и многогранный опыт широкого внедрения комплекса и его использования в расчетных исследованиях трубопроводных систем, важных для безопасности Курской, Смоленской, Ленинградской, Билибинской, Кольской, Запорожской, Нововоронежской, Балаковской, Волгодонской, Армянской, Белоярской и Игналинской АЭС, АЭС “Козлодуй” и “Белене” (Болгария), “Пакш” (Венгрия), “Ловиза” (Финляндия), “Бушер” (Иран), “Куданкулам” (Индия), “Тяньвань” (Китай) и проектов АС нового поколения. Имеются положительные референции специалистов ведущих зарубежных фирм Siemens AG (Германия), EDF (Франция) и Westinghouse (США).

Комплексы *АСТРА-ТЭС, -НЕФТЕХИМ, -ТЕПЛОСЕТЬ, -МАГИСТР, -СВД, -СУДПРОМ* в очередной раз *сертифицированы в “органе по сертификации программной продукции в строительстве” ООО ЦСПС* (сертификат соответствия № РОСС RU.СП15.Н00100, срок действия с 01.07.2009 г. по 01.07.2011 г., сертификат соответствия № РОСС RU.СП15.Н00415, срок действия с 01.07.2011 г. по 30.06.2013 г., сертификат соответствия № РОСС RU.СП15.Н00630, срок действия с 12.07.2013 г. по 11.07.2015 г., сертификат соответствия № РОСС RU.СП15.Н00848, срок действия с 13.07.2015 г. по 12.07.2017 г., сертификат соответствия № RA.RU.АБ86.Н01034, срок действия с 13.07.2017 г. по 12.07.2019 г., сертификат соответствия № RA.RU.АБ86.Н01185, срок действия с 06.08.2019 г. по

05.08.2022 г.) и используются в “флагманах” соответствующих отраслей: ОАО “Атомэнергопроект”, ОАО “С-П. Атомэнергопроект”, ФГУП “ГСПИ”, УралОргРЭС, ПИЦ “УралТЭП”, ОГК-5 (Екатеринбург), Киевский “Энергопроект”, “Энергомаш” (С-Петербург), АО “Теплопроект”, ОАО ЗИОМАР, Подольский машиностроительный завод, ОАО “ЭМАльянс” (Подольск), АО “Гипрокислород”, ОАО “Мосэнергопроект”, Казанский и Днепропетровский НИПИЭнергопром, ЗАО “Зарубежэнергопроект” (Иваново), ИАЦ “Кузбасстехэнерго”, АО “Красный котельщик” (Таганрог), ОАО “Инженерный центр энергетики Урала” (Екатеринбург), Иркутскэнергоремонт, ЗАО “КОТЭС-Сибирь” (Новосибирск), НВП “Турбокомплект” (Владивосток), ДонОргРЭС (Донецк), “Азовгипромез” (Мариуполь), Белэнергоремналадка (Минск), “Вильнюс электриной”, Литовская ГРЭС, “КазРосЭнергоПроект” (Павлодар), АО “Рязанский НПК”, АО “ЛУКОЙЛ-ПНОС” (Пермь), АО “СлавНефть-ЯНОС” (Ярославль), ПО “НАФТАН” (Новополоцк), АО ВНИПИНефть, ВолгоградНИПИНефть, АО ЛенНИИХиммаш, АО ИркНИИХиммаш, “Лонас технолджи”, ПО “Химтехнология” (Северодонецк), ОАО “Ангарскнефтехимпроект”, Саянский “Полимерпласт”, АО “Омскнефтехимпроект”, АО “Криогенмаш”, Укрнефтехимпроект, НПЗ Комсомольск-на-Амуре, ЮжНИИГипроГаз (Донецк), ООО “УралПромБезопасность”, ГУП “Мосинжпроект”, “Моспромтранспроект”, ОАО “Московская теплосетевая компания”, АО “ИнжГео” (Краснодар), ВНИПИтрансгаз (Киев), НТЦ “Надымгазпром”, Гипротюменнефтегаз, во многих средних и малых фирмах.

Университетские версии **АСТРА-НОВА** широко используются в процессе обучения, практики, дипломных работ и исследований студентов /аспирантов/докторантов/преподавателей рядом ведущих ВУЗов: МГСУ (МИСИ), МЭИ (ТУ), МГТУ им. Баумана, Академия нефти и газа им. Губкина, Пермский, Иркутский, Уфимский, Орловский и Ивано-Франковский технические университеты, ряд других.

Некоторые сравнительные характеристики версий ‘2001 (2001г.) и ‘2021, приведенные ниже, убедительно свидетельствуют о впечатляющем росте вычислительных возможностей, позволяющих теперь моделировать и анализировать трубопроводные системы произвольной сложности.

Характеристики	АСТРА ‘2001	АСТРА ‘2021
Число узлов стыковки суперэлементов	1 – 250	<b>0 – 4 000</b>
Число неразветвленных суперэлементов	1 – 500	<b>1 – 4 000</b>
Число «матричных» суперэлементов	–	<b>0 – 4 000</b>
Число элементов (отрезков)	2 – 20 000	<b>1 – 1 600 000</b>
Число динамических степеней свободы	3 – 1 500	<b>1 – 60 000</b>
Число собственных частот и форм	1 – 200	<b>1 – 4 000</b>
Число шагов интегрирования по времени	1 – 600	<b>1 – 60 000</b>
“Скорость” счета (условные единицы)	5	<b>10–20</b>
Тип ПЭВМ (не ниже)	Pentium	<b>IBM-совместимые</b>

	32Mb RAM	<b>512Mb RAM</b>
Основные языки программ	NDP Fortran Grafor, Connel	<b>Intel Visual Fortran 13, Visual C++, FastReport</b>

Суммируя многочисленные преимущества *АСТРА-НОВА’2021*, имеющие важное самостоятельное значение, констатируем впервые в отечественной практике достигнутый и закреплённый уже многолетним опытом использования качественно новый уровень комплексного автоматизированного расчётного обоснования статической и циклической прочности, сейсмостойкости, вибрационной и динамической прочности на доступных персональных компьютерах: *трубопроводные системы произвольной сложности можно (и следует) оперативно и точно моделировать с использованием преимуществ реализованных современных численных методов, Windows- и САПР-технологий, анализировать в полном соответствии с требованиями действующих российских норм и оптимизировать по прочностным критериям, не прибегая к вынужденным и, зачастую, необоснованным упрощениям и умолчаниям.*

Комплексы программ семейства *АСТРА-НОВА’2021* разработаны в ЗАО “Научно-исследовательский центр СтаДиО” (НИЦ СтаДиО) под руководством генерального директора, члена-корреспондента РААСН, доктора технических наук, профессора Белостоцкого А.М., ответственные исполнители – гл. специалист Воронова Г.А., гл. специалист Потапенко А.Л., научный сотрудник Аул А.А., инженер Кушнарченко И.В. и научный сотрудник Клепец О.Ю. В разработке принимали участие ст. инженер Шишкина А.Н., инженер-математик Нагибович А.И. и инженер Дядченко Ю.И., в тестировании алгоритмов и программ – вед. инженер Коновицкая Л.В., научный сотрудник Аул А.А. и к.т.н. инженер Островский К.И., в документировании – вед. инженер Трофимова Г.И., ст. инженер Петрова О.А., референты Руцкая С.А. и Руцкая А.М.

В инженерно-практической постановке ряда задач и анализе полученных результатов деятельное участие принимали специалисты “Гидропроект” и ОАО “Атомэнергопроект” (Руцкой А.В., Мебель В.А., Новикова И.В., Осипова З.Н., Чекарчев Е.С., Подольская Е.П., Котова Н.В. и др.), ОКБ “Гидропресс” (Лякишева М.Д., Сероштан С.И.), АО “РОСЭП” (Хромова И.В.), ПКФ “Росэнергоатом” (Зубцов Е.Ф.), АО “Криогенмаш” (Хованский Д.А.), ФГУП “Мосинжпроект” (Куликов В.В., Юнусов Ю.У.), НПО “Стройполимер” (Овчинников Д.В.), АО Гипротюмнефтегаз (Лимарь О.И.), Киевского “Энергопроекта” (Шамис Л.Б., Антоненко Г.И., Гончаренко Л.Ф.), ОАО “Московская теплосетевая компания” (Лейтман А.И., Ларченков А. В.), ОГК-5 (Акуленко В.В.), ОАО “ВНИИНЕФТЕМАШ” (Вольфсон Б.С.) и “ЕМТ R” (ныне – “Софтинжиниринг Менеджмент”) – фирмы-дистрибьютора *АСТРА-НОВА* (Локтев В.Д., Панявкин В.М., Топоркова Ю.Н., Белов А.Ю., Савельев В.П.).

Прошедшие годы только увеличивают ценность вклада (и нашу благодарность “вкладчикам”), который внесли в инициирование “стартовых” версий АСТРА-АЭС (1976–1980 гг.) Д.Л. Костовецкий и А.И.Рейнов (НПО ЦКТИ), Н.И.Якубович (Белорусский ВНИПИЭнергопром), Е.Г.Пикус и Е.А.Вашуров (Гидропроект).

Семейство программных комплексов ***АСТРА-НОВА’2021*** детально верифицировано, прошло апробацию в ЗАО НИЦ СтаДиО и ведущих научно-исследовательских и проектно-конструкторских фирмах профильных отраслей.

## 2. Нормативно-методические основы, исходные данные и результаты расчетов

### 2.1. Расчёт по выбору основных размеров

Расчёт по выбору основных размеров осуществляется в соответствии с положениями **Норм** [1-12].

Расчет выполняется на основании следующих исходных данных:

1) геометрия (осевая линия) детали (-ей) трубопровода. Для её внесения в расчётную модель возможны два подхода:

1.1. При необходимости расчёта отдельных деталей трубопровода допускается их задание не связанными друг с другом. В этом случае необходимы исходные данные, перечисленные ниже в 2.1.1 – 2.1.4;

1.2. При проведении расчёта по выбору основных размеров для уже скомпонованной трубопроводной системы возможно внесение в расчёт деталей трубопровода с привязкой к их местоположению. В этом случае дополнительно требуются следующие данные:

а) аксонометрическая схема трубопроводной системы, как правило и желательно, в общей со строительными конструкциями (при их наличии) правосторонней декартовой системе координат  $X_1 (X)$ ,  $X_2 (Y)$ ,  $X_3 (Z)$ , где ось  $X_3$ , как правило, направлена вертикально вверх, ось  $X_1$  – в направлении, обратном обозначению строительных осей, ось  $X_2$  – в направлении, обратном нумерации строительных рядов; допускается (а для ряда компоновок – удобно) задание схемы или ее фрагментов в цилиндрической и (или) сферической системах координат;

б) указание местоположения и спецификации сортамента прямых труб, переходников, отводов (гибов, колен и секторных) и косых стыков, тройниковых узлов (сварных, сварных с усиливающими накладками, штампованных и штампосварных, кованных).

Не смотря на большую трудоёмкость второго подхода, он оказывается более рациональным, если после расчёта по выбору основных размеров будет проводиться поверочный расчёт трубопроводной системы на прочность. В этом случае оказывается, что большая часть исходной информации (геометрия, детализация, физико-механические характеристики материалов, часть расчётных нагрузок и воздействий) по трубопроводу уже сформирована, и, таким образом, модель для расчёта по выбору основных размеров как с внесёнными в неё результатами этого расчёта (номинальной толщиной стенки  $s$ , либо деталями трубопроводов из сортамента) так и без таковых, может являться прототипом модели поверочного расчёта на прочность трубопроводной системы (см. 2.3).

Первые две группы данных, составляющие 95% всего объема исходной информации, в современных условиях можно (и должно) сформировать с использованием встроенных пополняемых баз данных (по деталям и свойствам материалов) либо в препроцессоре **ПРЕ-АСТРА**, либо средствами САПР ПГС (например, CADWorx/PIPE, PDS), а затем экспортировать в **АСТРА-НОВА**.



На основании указанной выше информации с привлечением соответствующих **ОСТов**, **ГОСТов** и **Норм** [1–64] формируются (непосредственно или с использованием встроенных баз данных по деталям, свойствам материалов и параметрам нагрузок-воздействий) приведенные ниже исходные данные, непосредственно используемые в расчетах.

### **2.1.1. Геометрические характеристики сечений прямых труб, отводов, переходов и тройников**

- D** – номинальный наружный диаметр сечения трубы (разделки под сварку, колена, гiba, перехода, штуцера или корпуса тройника). Задаётся при подборе номинальной толщины стенки, мм;
- D<sub>y</sub>** – условный диаметр (проход) деталей трубопровода. Задаётся в случае выбора деталей из сортамента, мм;
- R** – радиус оси криволинейной трубы (гiba, колена, секторного колена), мм.

#### **2.1.1.1. АСТРА-АЭС, СУДПРОМ:**

- s<sub>s</sub>** – толщина стенки штуцера в зоне “прилива” тройникового узла, мм;
- s<sub>m</sub>** – толщина стенки магистрали в зоне “прилива” тройникового узла, мм;
- c** – расчетная прибавка к толщине стенки трубы, мм;
- A(a)** – эллиптичность (овальность) поперечного сечения гiba или колена (отношение разности максимального и минимального наружного диаметра сечения к их полусумме), %.

#### **2.1.1.2. АСТРА-ТЭС:**

- c** – расчетная прибавка к толщине стенки трубы, мм;
- A(a)** – эллиптичность (овальность) поперечного сечения гiba или колена (отношение разности максимального и минимального наружного диаметра сечения к их полусумме), %;

**TypRed** – тип перехода: концентрический или эксцентрический.

#### **2.1.1.3. АСТРА-НЕФТЕХИМ (РТМ 38.001-94):**

- c** – расчетная прибавка к толщине стенки трубы, мм;
- A(a)** – эллиптичность (овальность) поперечного сечения гiba или колена (отношение разности максимального и минимального наружного диаметра сечения к их полусумме), %;

**TypRed** – тип перехода: концентрический или эксцентрический.

#### **2.1.1.4. АСТРА-НЕФТЕХИМ (ГОСТ 32388-2013):**

**TypElb** – тип отвода: гнутые и крутоизогнутые (1), секторные (2), штампосварные со сварными швами в плоскости кривизны (3), штампосварные со сварными швами по нейтральной линии (4);

**TypRed** – тип перехода: концентрический или эксцентрический;

**TypTee** – тип тройника: сварной (1), сварной с укрепляющими накладками (2), штампосварной (3), штампованный с тянутой горловиной (4);

- c<sub>11</sub>** – прибавка для компенсации допуска на минимальную толщину

- стенки заготовки, мм;
- c<sub>12</sub>** – прибавка для компенсации максимального утонения при технологических операциях, мм;
- c<sub>2</sub>** – прибавка для компенсации коррозии и эрозии, мм;
- α** – угол скоса секторного отвода, град;
- h<sub>bs</sub>** – высота ответвления тройника, мм;
- h<sub>b</sub>** – высота горловины штампованного или штампосварного тройника, мм;
- s<sub>b</sub>** – толщина горловины штампованного или штампосварного тройника, мм;
- r** – радиус горловины штампованного или штампосварного тройника, мм;
- b<sub>n</sub>** – ширина усиливающей накладки, мм;
- s<sub>n</sub>** – толщина усиливающей накладки, мм;
- A(a)** – эллиптичность (овальность) поперечного сечениягиба или колена (отношение разности максимального и минимального наружного диаметра сечения к их полусумме), %;
- L<sub>ef</sub>** – эффективная длина трубы, мм;
- n<sub>y</sub>** – коэффициент запаса местной устойчивости.

*При наличии колец жёсткости дополнительно задаются следующие данные:*

- l** – расстояние между осями колец жёсткости, мм;
- l<sub>k</sub>** – ширина поперечного сечения кольца жесткости в месте его приварки к трубе, мм;
- A<sub>k</sub>** – площадь поперечного сечения кольца жесткости, м<sup>2</sup>;
- I<sub>k</sub>** – момент инерции поперечного сечения кольца жесткости относительно оси, проходящей через центр тяжести, м<sup>4</sup>;
- e** – расстояние между центром тяжести поперечного сечения кольца жесткости и срединной поверхностью сечения трубы, мм.

#### **2.1.1.5. АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ (РД 10-400-01):**

- c** – расчетная прибавка к толщине стенки трубы, мм;
- TypElb** – тип отвода: гнутые и крутоизогнутые (1), секторные (2), штампосварные со сварными швами в плоскости кривизны (3), штампосварные со сварными швами по нейтральной линии (4);
- TypRed** – тип перехода: концентрический или эксцентрический;
- TypTee** – тип тройника: сварной (1), сварной с укрепляющими накладками (2), штампованный и штампосварной (3);
- r** – радиус горловины штампованного тройника, мм;
- b<sub>n</sub>** – ширина усиливающей накладки, мм;
- s<sub>n</sub>** – толщина усиливающей накладки, мм.

#### **2.1.1.6. АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ (ГОСТ Р 55596-2013):**

- TypElb** – тип отвода: гнутые и крутоизогнутые (1), секторные (2), штампосварные со сварными швами в плоскости кривизны (3), штампосварные со сварными швами по нейтральной линии (4);

**TypRed** – тип перехода: концентрический или эксцентрический;

**TypTee** – тип тройника: сварной (1), сварной с укрепляющими накладками (2), штамповсварной (3), штампованный с тянутой горловиной (4);

**c<sub>11</sub>** – прибавка для компенсации допуска на минимальную толщину стенки заготовки, мм;

**c<sub>12</sub>** – прибавка для компенсации максимального утонения при технологических операциях, мм;

**c<sub>2</sub>** – прибавка для компенсации коррозии и эрозии, мм;

**$\alpha$**  – угол скоса секторного отвода, град;

**h<sub>bs</sub>** – высота ответвления тройника, мм;

**h<sub>b</sub>** – высота горловины штампованного или штамповсварного тройника, мм;

**s<sub>b</sub>** – толщина горловины штампованного или штамповсварного тройника, мм;

**r** – радиус горловины штампованного или штамповсварного тройника, мм;

**b<sub>n</sub>** – ширина усиливающей накладки, мм;

**s<sub>n</sub>** – толщина усиливающей накладки, мм.

#### **2.1.1.7. АСТРА-МАГИСТР (СНУП 2.05.06-85, СП 36.13330.2012):**

**TypRed** – тип перехода: концентрический или эксцентрический;

**TypTee** – тип тройника: сварной (1), сварной с укрепляющими накладками (2), штампованный и штамповсварной (3);

**r** – радиус горловины штампованного тройника, мм;

**b<sub>n</sub>** – ширина усиливающей накладки, мм;

**s<sub>n</sub>** – толщина усиливающей накладки, мм.

#### **2.1.1.8. АСТРА-МАГИСТР (ГОСТ Р 55989-2014):**

**$\theta_{ВТУ}$**  – овальность прямых труб, допускаемая из условия прохождения ВТУ, %;

**TypElb** – тип отвода: холодногнутый (1), другой (2);

**TypRed** – тип перехода: концентрический или эксцентрический;

**TypTee** – тип тройника: сварной (1), штампованный (2);

*Для штампованных тройников дополнительно задаются:*

**r** – радиус горловины штампованного тройника, мм;

**ConTee** – конструкция штампованного тройника: «а» или «б» (рис. А.1, [9]);

**L<sub>1</sub>** – полудлина расчётной зоны усиления, мм;

**H<sub>1</sub>** – высота расчётной зоны усиления, мм;

**$\gamma$**  – коэффициент, зависящий от технологии изготовления тройника, задаётся для тройников конструкции «а».

#### **2.1.1.9. АСТРА-МАГИСТР (ГОСТ Р 55990-2014):**

**$\theta_{ВТУ}$**  – овальность прямых труб, допускаемая из условия прохождения ВТУ, %;

**c** – добавка к толщине стенки трубы на общую коррозию, мм;

**TypElb** – тип отвода: холодногнутый (1), другой (2);

**TypRed** – тип перехода: концентрический или эксцентрический;

**TypTee** – тип тройника: сварной (1), штампованный (2);

*Для штампованных тройников дополнительно задаются:*

**r** – радиус горловины штампованного тройника, мм;

**ConTee** – конструкция штампованного тройника: «а» или «б» (рис. А.1, [10]);

**L<sub>1</sub>** – полуудлина расчётной зоны усиления, мм;

**H<sub>1</sub>** – высота расчётной зоны усиления, мм;

**ξ** – коэффициент, зависящий от технологии изготовления тройника;

**k** – коэффициент, зависящий от технологии изготовления тройника, задаётся для тройников конструкции «а».

#### **2.1.1.10. АСТРА-СВД (ГОСТ Р 55600-2013):**

**c<sub>1</sub>** – прибавка, учитывающая плюсовой допуск на наружный диаметр, мм;

**c<sub>2</sub>** – прибавка, учитывающая минусовой допуск на толщину стенки, мм;

**c<sub>3и</sub>** – прибавка на износ наружной поверхности, мм;

**c<sub>3в</sub>** – прибавка на износ внутренней поверхности, мм;

**TypTee** – тип тройника: А, Б, В, Г, Д (рис. 10-14, [12]);

**TypAng** – тип угольника: А, Б (рис. 15, 16 [12]).

#### **2.1.1.11. АСТРА-СВД (РД РТМ 26-01-44-78):**

**c<sub>1</sub>** – прибавка, учитывающая минусовой допуск на толщину стенки и необходимое утолщение стенки по технологическим, монтажным и другим соображениям проектирующих организаций и заводов-изготовителей, мм;

**c<sub>2</sub>** – прибавка на коррозию, эрозию и другие виды износа, мм;

**c<sub>3</sub>** – прибавка дополнительная, мм;

**δ<sub>1</sub>** – минусовый допуск на изготовление по толщине стенки, %.

Задаётся только для прямых труб, подбираемых из сортамента;

**δ<sub>2</sub>** – плюсовой допуск на изготовление по наружному диаметру, %

Задаётся только для прямых труб, подбираемых из сортамента;

**TypTee** – тип тройника: тип 1, тип 2 (рис. 9-12 [11]), приварной патрубков;

**TypAng** – тип угольника: тип 1, тип 2 (рис. 9-12 [11]).

#### **2.1.2. Нагрузки и воздействия**

**p** – расчетное внутреннее давление в трубопроводе, МПа;

**T** – расчетная температура стенки трубы (средняя температура), °C;

*Для трубопроводов бесканальной прокладки в грунте (АСТРА-НЕФТЕХИМ (ГОСТ 32388-2013), АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ):*

**q<sub>тр</sub>** – нагрузка от веса детали, кН/м;

**q<sub>из</sub>** – нагрузка от веса изоляции, кН/м;

**q<sub>пр</sub>** – нагрузка от веса продукта, кН/м.

Для трубопроводов из полимерных материалов АСТРА-НЕФТЕХИМ (ГОСТ 32388-2013) задаётся температурная история нагружения:

$t_i$  – температура в стенке трубы или детали, °С;

$\tau_i$  – время непрерывного действия температуры  $t_i$ , которое материал может выдержать без разрушения, ч;

**ТипТем** – тип температуры: принимает значения *Рабочая*, *Аварийная* или *Максимальная*. Типы *Аварийная* и *Максимальная* задаются только один раз в температурной истории.

### 2.1.3. Физико-механические характеристики материалов

#### 2.1.3.1. АСТРА-АЭС, СУДПРОМ:

**ТипMat** – тип материала: аустенитная или неаустенитная сталь;

$R_{p0,2}^T$  – условный предел текучести при расчётной температуре, МПа;

$R_m^T$  – минимальное временное сопротивление при расчётной температуре, МПа;

$R_{mt}^T$  – длительный предел прочности (для времени  $t$  эксплуатации высокотемпературных трубопроводов) при расчётной температуре, МПа;

$\phi$  – коэффициент снижения прочности продольного сварного шва.

#### 2.1.3.2. АСТРА-ТЭС:

[ $\sigma$ ] – допускаемое номинальное напряжение при расчётной температуре, МПа (раздел 2 [2], в зависимости от расчетного ресурса);

$\tau_0$  – расчётный ресурс, ч;

$\phi_w$  – коэффициент снижения прочности продольного сварного шва.

#### 2.1.3.3. АСТРА-НЕФТЕХИМ (РТМ 38.001-94):

[ $\sigma^{20}$ ] – допустимые напряжения при  $T=20^\circ\text{C}$ , МПа (п.п.3.1 и 3.2 [3]);

$A_T$  – температурный коэффициент определяемый по таблице 3.1 [3];

$\phi$ , – коэффициент снижения прочности продольного сварного шва.

#### 2.1.3.4. АСТРА-НЕФТЕХИМ (ГОСТ 32388-2013):

**ТипMat** – тип материала: углеродистая сталь (1), низколегированная сталь (2), аустенитная сталь (3), алюминий и его сплавы (4), медь и её сплавы (5), титан и его сплавы (6), полимерный материал (тип 1) (7), полимерный материал (тип 2) (8).

Для типов материалов 1-6 (металл):

$\sigma_{b/t}$  – минимальное значение временного сопротивления (предела прочности) при растяжении при расчетной температуре, МПа;

$\sigma_{p/t}$  – минимальное значение предела текучести при расчетной температуре, МПа;

$\sigma_{1/t}$  – минимальное значение условного предела текучести (напряжение, при котором остаточное удлинение составляет 1,0%) при расчетной температуре, МПа;

$\sigma_{0,2/t}$  – минимальное значение условного предела текучести (напряжение, при котором остаточное удлинение составляет

- 0,2%) при расчетной температуре, МПа;
- $\sigma_{в/20}$**  – минимальное значение временного сопротивления (предела прочности) при растяжении при холодной температуре, МПа;
- $\sigma_{р/20}$**  – минимальное значение предела текучести при холодной температуре, МПа;
- $\sigma_{1/20}$**  – минимальное значение условного предела текучести (напряжение, при котором остаточное удлинение составляет 1,0%) при холодной температуре, МПа;
- $\sigma_{0,2/20}$**  – минимальное значение условного предела текучести (напряжение, при котором остаточное удлинение составляет 0,2%) при холодной температуре, МПа;
- $\sigma_{2 \cdot 10^5/t}$**  – условный предел длительной прочности на ресурс  $2 \cdot 10^5$  ч при расчетной температуре, МПа;
- $\sigma_{1/2 \cdot 10^5/t}$**  – условный предел ползучести при растяжении, обуславливающий деформацию 1% за  $2 \cdot 10^5$  ч при расчетной температуре, МПа;
- $\epsilon_{в/t}$**  – относительная пластическая деформация в момент потери устойчивости при расчетной температуре;
- $\epsilon_{в/20}$**  – относительная пластическая деформация в момент потери устойчивости при холодной температуре;
- $\phi_y$**  – коэффициент снижения прочности продольного сварного шва;
- $n_b$**  – коэффициент запаса по пределу прочности, (пп. 5.3, 12.1 [4]);
- $n_T$**  – коэффициент запаса по пределу текучести, (пп. 5.3, 12.1 [4]);
- $n_{дп}$**  – коэффициент запаса по пределу длительной прочности, (пп. 5.3, 12.1 [4]). Используется для высокотемпературных трубопроводов;
- $n_{п}$**  – коэффициент запаса по пределу ползучести, (пп. 5.3, 12.1 [4]). Используется для высокотемпературных трубопроводов;
- $\eta$**  – поправочный коэффициент, учитывающий условия эксплуатации трубопроводов.

*Для типов материалов 7-8 (полимер):*

- $E_{20}$**  – модуль ползучести материала при растяжении при холодной температуре, МПа;
- A1** – коэффициент для ветви 1 кривой длительной прочности А (таблица 13.2 [4]);
- B1** – коэффициент для ветви 1 кривой длительной прочности В (таблица 13.2 [4]);
- G1** – коэффициент для ветви 1 кривой длительной прочности G (таблица 13.2 [4]);
- J1** – коэффициент для ветви 1 кривой длительной прочности J (таблица 13.2 [4]);
- A2** – коэффициент для ветви 2 кривой длительной прочности А (таблица 13.2 [4]). Задаётся для типа материала «Полимерный материал (тип 2)»;
- B2** – коэффициент для ветви 2 кривой длительной прочности В

- (таблица 13.2 [4]). Задаётся для типа материала «Полимерный материал (тип 2)»;
- G2** – коэффициент для ветви 2 кривой длительной прочности G (таблица 13.2 [4]). Задаётся для типа материала «Полимерный материал (тип 2)»;
- J2** – коэффициент для ветви 2 кривой длительной прочности J (таблица 13.2 [4]). Задаётся для типа материала «Полимерный материал (тип 2)»;
- K<sub>i(1)</sub>** – расчётный коэффициент запаса прочности для рабочей температуры < 20 град (таблица 13.4 [4]);
- K<sub>i(2)</sub>** – расчётный коэффициент запаса прочности для рабочей температуры ≥ 20 град (таблица 13.4 [4]);
- K<sub>i(3)</sub>** – расчётный коэффициент запаса прочности для максимальной температуры (таблица 13.4 [4]);
- K<sub>i(4)</sub>** – расчётный коэффициент запаса прочности для аварийной температуры (таблица 13.4 [4]);
- K<sub>y</sub>** – коэффициент условий работы трубопровода (таблица 13.5 [4]);
- K<sub>c</sub>** – коэффициент прочности соединения труб и деталей (таблица 13.6 [4]);
- K<sub>x</sub>** – коэффициент химической стойкости материала труб;
- K<sub>п</sub>** – коэффициент условий прокладки;
- K<sub>e</sub>** – коэффициент, учитывающий влияние температуры на деформационные свойства материала (таблица 13.7 [4]).
- 2.1.3.5. АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ (РД 10-400-01):**
- [σ]** – допускаемое номинальное напряжение при расчётной температуре, МПа (раздел 3 [2], в зависимости от расчетного ресурса);
- τ<sub>0</sub>** – расчётный ресурс, ч;
- Φ<sub>y</sub>** – коэффициент снижения прочности продольного сварного шва.
- 2.1.3.6. АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ (ГОСТ Р 55596-2013):**
- σ<sub>b/t</sub>** – минимальное значение временного сопротивления материала разрыву (предела прочности) при расчетной температуре, МПа;
- σ<sub>p/t</sub>** – минимальное значение предела текучести материала при расчетной температуре, МПа;
- Φ<sub>y</sub>** – коэффициент снижения прочности продольного сварного шва.
- 2.1.3.7. АСТРА-МАГИСТР (СНиП 2.05.06-85, СП 36.13330.2012):**
- R<sub>1</sub><sup>n</sup>** – нормативное сопротивление растяжению-сжатию металла труб и сварных соединений, равное минимальному значению временного сопротивления при расчётной температуре, МПа;
- m** – коэффициент условий работы трубопровода (таблица 1 [7], [8]);
- k<sub>1</sub>** – коэффициент надежности по материалу (таблица 9 [7], таблица 10 [8]);
- k<sub>n</sub>** – коэффициент надежности по назначению (ответственности)

трубопровода (таблица 11 [7], таблица 12 [8]);  
**n** – коэффициент надежности по нагрузке (таблица 13\* [7], таблица 14 [8]).

#### 2.1.3.8. АСТРА-МАГИСТР (ГОСТ Р 55989-2014):

**$\sigma_n$**  – нормативное сопротивление материала труб и сварных соединений, равное нормативному пределу прочности (временному сопротивлению) при расчётной температуре, МПа;  
 **$\sigma_y$**  – нормативное сопротивление материала труб и сварных соединений, равное нормативному пределу текучести при расчётной температуре, МПа;  
 **$\gamma_d$**  – коэффициент условий работы трубопровода при расчете его на прочность, устойчивость и деформативность (таблица 13 [9]);  
 **$\gamma_{mu}$**  – коэффициент надежности по материалу труб при расчёте по прочности (таблица 12 [9]);  
 **$\gamma_{my}$**  – коэффициент надежности по материалу труб при расчёте по текучести;  
 **$\gamma_n$**  – коэффициент надежности по ответственности газопровода;  
 **$\gamma_{fp}$**  – коэффициент надежности по нагрузке (внутреннему давлению) (табл. 11 [9]);

**ТипTSu**– тип транспортируемых веществ: не указано (1), импульсный или топливный газ (2).

#### 2.1.3.9. АСТРА-МАГИСТР (ГОСТ Р 55990-2014):

**$\sigma_n$**  – нормативное сопротивление материала труб и сварных соединений, равное нормативному пределу прочности (временному сопротивлению) при расчётной температуре, МПа;  
 **$\sigma_y$**  – нормативное сопротивление материала труб и сварных соединений, равное нормативному пределу текучести при расчётной температуре, МПа;  
 **$\gamma_d$**  – коэффициент условий работы трубопровода при расчете его на прочность, устойчивость и деформативность (таблица 13 [10]);  
 **$\gamma_{ds}$**  – коэффициент условий работы трубопровода, транспортирующего сероводородсодержащие продукты, при расчете его на прочность, устойчивость и деформативность (таблица 14 [10]);  
 **$\gamma_{mu}$**  – коэффициент надежности по материалу труб при расчёте по прочности (таблица 12 [10]);  
 **$\gamma_{my}$**  – коэффициент надежности по материалу труб при расчёте по текучести;  
 **$\gamma_n$**  – коэффициент  **$\gamma_{fp}$**  – коэффициент надежности по нагрузке (внутреннему давлению) (табл. 11 [10]);

**ТипTSu**– тип транспортируемых веществ: не указано (1), сероводородсодержащие продукты (2).

#### 2.1.3.10. АСТРА-СВД (РД РТМ 26-01-44-78):

**ТипMat**– тип материала: углеродистая (1), низколегируемая (2),



- аустенитная (3) сталь;
- $\sigma_b$  – минимальное значение временного сопротивления материала разрыву (предела прочности) при расчетной температуре, МПа;
- $\sigma_T$  или  $\sigma_{0,2}$  – минимальное значение предела текучести или условного предела текучести материала при расчетной температуре, МПа;
- $\sigma_d$  – среднее значение условного предела длительной прочности (напряжения, вызывающего разрушение при расчетной температуре через  $10^5$  час), МПа;
- $\sigma_n$  – среднее значение условного предела ползучести (напряжения, вызывавшего накопление остаточной деформации при расчетной температуре 1% за  $10^5$  час), МПа;
- $\eta$  – поправочный коэффициент, учитывающий условия эксплуатации трубопроводов;
- $\varphi$  – коэффициент снижения прочности продольного сварного шва.

#### **2.1.3.11. АСТРА-СВД (ГОСТ Р 55600-2013):**

- $R_{m/t}$  – минимальное значение временного сопротивления (предела прочности) материала при расчётной температуре, МПа;
- $R_{T/t}$  – минимальное значение принятого в расчет предела текучести материала при расчётной температуре, МПа.

*Для трубопроводов бесканальной прокладки в грунте (АСТРА-НЕФТЕХИМ (ГОСТ 32388-2013), АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ):*

- $E$  – модуль (модули) упругости материала трубы для основного расчетного режима, МПа. Для полимерных материалов тип 1 и 2 (АСТРА-НЕФТЕХИМ, ГОСТ 32388-2013) задаётся модуль ползучести материала при растяжении.

#### **2.1.4. Дополнительные характеристики подземных и наземных трубопроводов бесканальной прокладки в грунте**

- $D_k$  – диаметр кожуха изоляции, мм;
- $H$  – высота засыпки (глубина заложения по верхней отметке), мм;
- $B$  – ширина траншеи на уровне верхней образующей кожуха изоляции, мм;

**TypGru** – тип грунта (таблица 2.2, прим. [5]).

##### **2.1.4.1. Характеристики грунта основания, засыпки, откосов**

- $E_{gr}$  – модуль деформации грунта, МПа;
- $\nu_{gr}$  – коэффициент Пуассона грунта;
- $\rho_{gr}$  – плотность грунта, т/м<sup>3</sup>;
- $\varphi_{gr}$  – угол внутреннего трения грунта, град.

##### **2.1.4.2. Характеристики изоляции**

**TypIso** – тип изоляции: нет (1), пенополиуретан (2), полимербетон (3), армопенобетон (4), битумперлит (5), битумкерамзит (6), (задаётся для АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ);

- $k_{oi}$  – коэффициент постели изоляции (для АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ (РД 10-400-01) определяется программой по заданному типу изоляции), кН/м<sup>3</sup>.

**2.2.** Результатом расчёта по выбору основных размеров являются номинальные толщины стенок деталей трубопровода и геометрические характеристики дополнительных укрепляющих элементов тройниковых соединений, либо выбранные детали трубопроводов из отраслевых сортаментов. Для каждой детали вычисляется допускаемое давление. Также, для подземных магистральных трубопроводов (при расчёте по АСТРА-МАГИСТР (ГОСТ Р 55989-2014, ГОСТ Р 55990-2014) определяется овальность поперечного сечения трубопровода после укладки и засыпки. В прямо- и криволинейных трубах трубопроводов высокого и сверхвысокого давления (АСТРА-СВД (ГОСТ Р 55600-2013) проверяется необходимость автофретирования, а также подбор для них оптимального давления автофретирования.

$s_p$  – расчётная толщина стенки прямолинейной трубы, криволинейной трубы (при расчёте по АСТРА-АЭС, АСТРА-ТЭС, АСТРА-НЕФТЕХИМ (ГОСТ 32388-2013), АСТРА-СВД, АСТРА-СУДПРОМ вычисляется как максимум среди расчётных толщин на боковой, вогнутой и выпуклой поверхностях), перехода в зоне большего и меньшего диаметров, магистрали и ответвления тройника, угольника, мм

$s$  – номинальная толщина стенки детали, мм;

$[p]$  – допускаемое давление детали (вычисляется для АСТРА-АЭС, ТЭС, НЕФТЕХИМ, СВД, СУДПРОМ), МПа.

### **2.2.1. АСТРА-АЭС, ТЭС, НЕФТЕХИМ, МАГИСТР, СУДПРОМ:**

$A$  – площадь сечения укрепляющих элементов тройника, мм<sup>2</sup>.

### **2.2.2. АСТРА-МАГИСТР (ГОСТ Р 55989-2014, ГОСТ Р 55990-2014):**

$\theta$  – овальность сечения подземного трубопровода после укладки и засыпки.

### **2.2.3. АСТРА-СВД (ГОСТ Р 55600-2013):**

$s_{II}$  – исполнительная толщина стенки детали, мм;

$n_{вф}$  – фактический коэффициент запаса по пределу прочности;

$n_{тф}$  – фактический коэффициент запаса по пределу текучести;

**NeedA** – определение необходимости автофретирования для прямолинейных и криволинейных труб;

$p_a^*$  – оптимальное давление автофретирования прямолинейных и криволинейных труб, МПа.

*Дополнительные результаты для тройников, угольников:*

$D_r$  – размер укрепленного участка основной трубы, мм;

$D_o$  – размер укрепленного участка отвода, мм.

### **2.2.4. АСТРА-СВД (РД РТМ 26-01-44-78):**

*Дополнительные результаты для отводов:*

$s_3$  – толщина стенки исходной заготовки, мм;

$D_3$  – номинальный наружный диаметр исходной заготовки, мм.

*Дополнительные результаты для тройников, угольников:*

$D_1$  – диаметр цилиндрической части основной трубы, мм;

$D_2$  – диаметр цилиндрической части отвода, мм;

$D_{T1}$  – диаметр укрепления основной трубы, мм;

- D<sub>T2</sub>** – диаметр укрепления отвода, мм;  
**L<sub>1</sub>** – расчётная длина (длина укрепления) основной трубы, мм;  
**L<sub>2</sub>** – расчётная длина (длина укрепления) отвода, мм;  
**B<sub>1</sub>** – ширина укрепления основной трубы, мм;  
**B<sub>2</sub>** – ширина укрепления отвода, мм.

*Дополнительные результаты для приварных патрубков:*

- S<sub>пр</sub>** – расчётная толщина стенки патрубка, мм;  
**S<sub>п</sub>** – толщина стенки патрубка, мм;  
**H** – высота патрубка, мм.

## 2.2. Поверочный расчёт на прочность

Поверочный расчет на прочность проводят после расчета (см. п. 2.1) по выбору основных размеров (номинальных толщин стенок *s* элементов) для низко-, средне- и высокотемпературных трубопроводов в соответствии с положениями **Норм ПНАЭ Г-7-002-86** [1] (*АСТРА-АЭС*), **РД 10-249-98** [2] (*АСТРА-ТЭС*), **РТМ 38.001-94** [3], **ГОСТ 32388-2013** [4] (*АСТРА-НЕФТЕХИМ*), **РД 10-400-01** [5], **ГОСТ Р 55596-2013** [6] (*АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ*), **СНиП 2.05.06-85** [7], **СП 36.13330.2012** [8], **ГОСТ Р 55989-2014** [9], **ГОСТ Р 55990-2014** [10] (*АСТРА-МАГИСТР*), **ГОСТ Р 55600-2014** [12], **РД РТМ 26-01-44-78** [11] (*АСТРА-СВД*), **РД5Р.4322-86** [13], **РД5Р.5137-73** [14] (*АСТРА-СУДПРОМ*), “Руководств...” [26, 28], **РТМ** [15, 17] и на основании следующих исходных данных.

Первоначальными данными для поверочного расчета на прочность являются:

1) аксонометрическая схема трубопроводной системы, как правило и желательно, в общей со строительными конструкциями (при их наличии) правосторонней декартовой системе координат **X<sub>1</sub> (X)**, **X<sub>2</sub> (Y)**, **X<sub>3</sub> (Z)**, где ось **X<sub>3</sub>**, как правило, направлена вертикально вверх, ось **X<sub>1</sub>** – в направлении, обратном обозначению строительных осей, ось **X<sub>2</sub>** – в направлении, обратном нумерации строительных рядов; допускается (а для ряда компоновок – удобно) задание схемы или ее фрагментов в цилиндрической и (или) сферической системах координат;

2) указание местоположения и спецификации сортамента прямых труб, переходников, отводов (гибов, колен и секторных) и косых стыков, тройниковых узлов (сварных, сварных с усиливающими накладками, штампованных и штампосварных, кованных) и врезок, линзовых, сильфонных и сальниковых компенсаторов, фланцевых соединений, “арматуры” (клапаны, задвижки и т.п.), оборудования (включенного в расчетную модель), пружинных подвесок (по **МВН-043-63**, **ОСТ 108.764.01-80**, **ОСТ 24.125.109-01**, “спецпружины” **ВНИПИЭТ**, пружинных опор фирмы **LISEGA**, “пружины постоянного усилия” и пружин пользователя), жестких подвесок-тяг, опор скольжения, катковых и направляющих опор, пружинных опор (**ОСТ 24.125.166-01**, **ОСТ 108.275.69-80**),

специальных опорных конструкций, сейсмо- и виброамортизаторов и (или) вязкоупругих демпферов, противоаварийных опор-ограничителей;

3) величины монтажного натяга, заданных температурных перемещений промежуточных и “мертвых” опор, статических и температурных нагрузок для режимов нагружения **НЭ** (нормальных условий эксплуатации), **ННЭ** (нарушения нормальных условий эксплуатации), **ГИ** (испытаний) и **АС** (аварийных ситуаций) [1, 2] или их аналогов для нефтехимии, теплосетей и магистральных трубопроводов [3–12] – **ПДН** (постоянных и длительных нагрузок) и **ПДК(ОН)** (постоянных, длительных, кратковременных и особых нагрузок);

4) амплитудно-частотные и (или) временные характеристики сейсмических, вибрационных (гидродинамических), импульсных и аварийных (**МПА**) воздействий.

Первые две группы данных, составляющие 80-95% всего объема исходной информации, в современных условиях можно (и должно) сформировать с использованием встроенных пополняемых баз данных (по деталям и свойствам материалов) в препроцессоре **ПРЕ-АСТРА**, либо средствами САПР ПГС (например, CADWorx/PIPE, PDS), а затем экспортировать в **АСТРА-НОВА**.

На основании указанной выше информации с привлечением соответствующих **ОСТов**, **ГОСТов** и **Норм** [1–64] формируются (непосредственно или с использованием встроенных баз данных по деталям, свойствам материалов и параметрам нагрузок-воздействий) приведенные ниже исходные данные, непосредственно используемые в расчетах.

### **2.2.1. Геометрические характеристики сечений прямых труб, отводов, переходов и тройников**

**D** – номинальный наружный диаметр сечения прямолинейной трубы (разделки под сварку, колена, гiba, перехода, штуцера или корпуса тройника), мм;

**S** – номинальная толщина стенки прямолинейной трубы (разделки под сварку, колена, гiba, перехода, штуцера или корпуса тройника), мм;

**S<sub>min</sub>, S<sub>max</sub>** – минимальная и максимальная толщины стенки криволинейной трубы (колена или гiba), мм;

**S<sub>s</sub>** – толщина стенки штуцера в зоне “прилива” тройникового узла, мм;

**S<sub>A</sub>** – толщина антикоррозионной наплавки, мм;

**S<sub>и</sub>** – толщина изоляции, мм

**α** – угол раствора криволинейной трубы, град;

**TypRed** – тип перехода: концентрический или эксцентрический.

**R** – радиус оси криволинейной трубы (гiba, колена, секторного колена), мм.

#### **2.2.1.1. АСТРА-АЭС, АСТРА-СУДПРОМ:**

**c** – расчетная прибавка к толщине стенки детали, мм.

*Дополнительные параметры для отводов:*

**A(a)** – эллиптичность (овальность) поперечного сечения гiba или

колена (отношение разности максимального и минимального наружного диаметра сечения к их полусумме), %.

*Дополнительные параметры для тройников:*

**ТипTee** – тип конструкции тройника: сварной (1), штампованный (2);

**s<sub>s</sub>** – толщина стенки штуцера в зоне “прилива” тройникового узла, мм;

**s<sub>m</sub>** – толщина стенки магистрали в зоне “прилива” тройникового узла, мм.

### **2.2.1.2. АСТРА-ТЭС, АСТРА-НЕФТЕХИМ (РТМ 38.001-94):**

**c** – расчетная прибавка к толщине стенки детали, мм.

*Дополнительные параметры для отводов:*

**A(a)** – эллиптичность (овальность) поперечного сечениягиба или колена (отношение разности максимального и минимального наружного диаметра сечения к их полусумме), %.

*Дополнительные параметры для тройников:*

**ТипTee** – тип конструкции тройника: сварной (1), штампованный (2).

### **2.2.1.3. АСТРА-НЕФТЕХИМ (ГОСТ 32388-2013):**

**c<sub>11</sub>** – прибавка для компенсации допуска на минимальную толщину стенки заготовки, мм;

**c<sub>12</sub>** – прибавка для компенсации максимального утонения при технологических операциях, мм;

**c<sub>2</sub>** – прибавка для компенсации коррозии и эрозии, мм;

**v** – скорость коррозии, мм/год.

*Дополнительные параметры для прямых труб:*

**L<sub>ef</sub>** – эффективная длина трубы, мм;

**n<sub>y</sub>** – коэффициент запаса местной устойчивости;

**n<sub>y</sub>** – коэффициент запаса местной устойчивости для расчетных режимов;

**n<sub>y</sub><sup>n</sup>** – коэффициент запаса продольной устойчивости;

**l** – расстояние между осями колец жёсткости, мм;

**l<sub>k</sub>** – ширина поперечного сечения кольца жесткости в месте его

приварки к трубе, мм;

**A<sub>k</sub>** – площадь поперечного сечения кольца жесткости, м<sup>2</sup>;

**I<sub>k</sub>** – момент инерции поперечного сечения кольца жесткости относительно оси, проходящей через центр тяжести, м<sup>4</sup>;

**e** – расстояние между центром тяжести поперечного сечения кольца жесткости и срединной поверхностью сечения трубы, мм;

**Ф<sub>k</sub>** – коэффициент снижения прочности сварных швов колец жёсткости.

*Дополнительные параметры для отводов:*

**ТипElb** – тип конструкции криволинейной трубы (отвода,гиба, колена): гнутый или крутоизогнутый (1), секторный с углом скоса ≤ 22,5 град, (2), штампосварной со сварными швами в плоскости кривизны (3), штампосварной со сварными швами по

нейтральной линии (4);

**ТипJoi** – тип стыковки криволинейной трубы (отвода, гiba, колена) с примыкающими деталями: на сварке (1), на фланцах (2), на сварке и на фланцах (3);

**A(a)** – эллиптичность (овальность) поперечного сечения гiba или колена (отношение разности максимального и минимального наружного диаметра сечения к их полусумме), %.

*Дополнительные параметры для тройников:*

**ТипTee** – тип конструкции тройника: сварной (1), сварной с укрепляющими накладками (2), штампосварной (3), штампованный с тянутой горловиной (4);

**h<sub>bs</sub>** – высота ответвления тройника, мм;

**h<sub>b</sub>** – высота горловины штампованного или штампосварного тройника, мм;

**s<sub>b</sub>** – толщина горловины штампованного или штампосварного тройника, мм;

**r** – радиус горловины штампованного или штампосварного тройника, мм;

**b<sub>n</sub>** – ширина усиливающей накладки, мм;

**s<sub>n</sub>** – толщина усиливающей накладки, мм.

#### **2.2.1.4. АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ (РД 10-400-01):**

**c** – расчетная прибавка к толщине стенки детали, мм.

*Дополнительные параметры для отводов:*

**ТипElb** – тип конструкции криволинейной трубы (отвода, гiba, колена): гнутый со стыками на сварке (1), на фланцах (2), на сварке и на фланцах (3), секторный со стыками на сварке (4), штампосварной со сварными швами в плоскости кривизны со стыками на сварке (5), на фланцах (6), на сварке и на фланцах (7), штампосварной со сварными швами по нейтральной линии со стыками на сварке (8), на фланцах (9), на сварке и на фланцах (10).

*Дополнительные параметры для тройников:*

**ТипTee** – тип конструкции тройника: сварной (1), сварной с укрепляющими накладками (2), штампованный и штампосварной (3);

**r** – радиус горловины штампованного или штампосварного тройника, мм;

**b<sub>n</sub>** – ширина усиливающей накладки, мм;

**s<sub>n</sub>** – толщина усиливающей накладки, мм.

#### **2.2.1.5. АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ (ГОСТ Р 55596-2013):**

**c<sub>11</sub>** – прибавка для компенсации допуска на минимальную толщину стенки заготовки, мм;

**c<sub>12</sub>** – прибавка для компенсации максимального утонения при технологических операциях, мм;

- $c_2$  – прибавка для компенсации коррозии и эрозии, мм;  
 $v_1, v_2$  – скорость внутренней и наружной коррозии, мм/год.  
*Дополнительные параметры для труб:*  
 $L_{ef}$  – эффективная длина трубы, мм;  
 $n_y^n$  – коэффициент запаса продольной устойчивости.

*Дополнительные параметры для отводов:*

- TypElb** – тип конструкции криволинейной трубы (отвода, гiba, колена): гнутый или крутоизогнутый (1), секторный с углом скоса  $\leq 22,5$  град, (2), штампосварной со сварными швами в плоскости кривизны (3), штампосварной со сварными швами по нейтральной линии (4);  
**TypJoi** – тип стыковки криволинейной трубы (отвода, гiba, колена) с примыкающими деталями: на сварке (1), на фланцах (2), на сварке и на фланцах (3).

*Дополнительные параметры для тройников:*

- TypTee** – тип конструкции тройника: сварной (1), сварной с укрепляющими накладками (2), штампосварной (3), штампованный с тянутой горловиной (4);  
 $h_{bs}$  – высота ответвления тройника, мм;  
 $h_b$  – высота горловины штампованного или штампосварного тройника, мм;  
 $s_b$  – толщина горловины штампованного или штампосварного тройника, мм;  
 $r$  – радиус горловины штампованного или штампосварного тройника, мм;  
 $b_n$  – ширина усиливающей накладки, мм;  
 $s_n$  – толщина усиливающей накладки, мм.

## **2.2.1.6. АСТРА-МАГИСТР (СНиП 2.05.06-85, СП 36.13330.2012):**

*Дополнительные параметры для прямых труб:*

- $l_m$  – длина участка деформации газопровода с учетом его работы за пределами муфты сдвига, мм;  
 $l$  – длина участка однозначных деформаций земной поверхности в полумуфте сдвига, пересекаемого газопроводом, мм;  
 $\xi_0$  – максимальное сдвигание земной поверхности в полумуфте, пересекаемой газопроводом, мм;  
 $u_{max}$  – перемещение, соответствующее наступлению предельного значения сопротивления грунта продольным перемещениям трубопровода, мм;  
 $k_{u.b.}$  – коэффициент запаса общей устойчивости;  
 $k_{H.s.}$  – коэффициент учета высоты засыпки;  
 $\varepsilon_b$  – предельно допустимая изгибная деформация;  
 $\theta_0$  – расчётная начальная овальность сечений труб, %;

$\rho$  – заданный радиус кривизны оси трубопровода, мм;

*Дополнительные параметры для тройников:*

**TypTee** – тип конструкции тройника: сварной (1), сварной с укрепляющими накладками (2), штампованный и штампосварной (3);

$r$  – радиус горловины штампованного или штампосварного тройника, мм;

$b_n$  – ширина усиливающей накладки, мм;

$s_n$  – толщина усиливающей накладки, мм.

### **2.2.1.7. АСТРА-МАГИСТР (ГОСТ Р 55989-2014, ГОСТ Р 55990-2014):**

*Дополнительные параметры для прямых труб:*

$l_m$  – длина участка деформации газопровода с учетом его работы за пределами муфты сдвижения, мм;

$l$  – длина участка однозначных деформаций земной поверхности в полумуфте сдвижения, пересекаемого газопроводом, мм;

$\xi_0$  – максимальное сдвижение земной поверхности в полумуфте, пересекаемой газопроводом, мм;

$u_{max}$  – перемещение, соответствующее наступлению предельного значения сопротивления грунта продольным перемещениям трубопровода, мм;

$k_{ц.б.}$  – коэффициент запаса общей устойчивости;

$k_{н.с.}$  – коэффициент учета высоты засыпки;

$\varepsilon_b$  – предельно допустимая изгибная деформация;

$\theta_0$  – расчётная начальная овальность сечений труб, %;

$\rho$  – заданный радиус кривизны оси трубопровода, мм;

*Дополнительные параметры для тройников:*

**TypTee** – тип конструкции тройника: сварной (1), штампованный (2);

$r$  – радиус горловины штампованного тройника, мм.

### **2.2.1.8. АСТРА-СВД (ГОСТ Р 55600-2013):**

*Дополнительные параметры для отводов:*

**TypElb** – тип конструкции криволинейной трубы (отвода,гиба, колена): гнутый неотпущенный (1), другой (2).

### **2.2.2. Характеристики опорных конструкций, линзовых и сильфонных компенсаторов, арматуры, стержней некольцевого сечения, фланцев и оборудования**

$k_{x1}, k_{x2}, k_{x3}$  – линейные жесткости опорных конструкций (связей), в том числе, опор скольжения, катковых и направляющих опор по направлениям общей (глобальной)  $X_1, X_2, X_3$  или местной (локальной)  $x_1', x_2', x_3'$  декартовой системы, кН/м;

$k_\alpha, k_\beta, k_\gamma$  – угловые жесткости опорных конструкций (связей) вокруг осей  $X_1, X_2, X_3$  или  $x_1', x_2', x_3'$ , кН м/рад;

$f_{r1}, f_{r2}$  – коэффициенты трения в опорах скольжения, катковых и направляющих опорах в направлениях вдоль и поперек оси



- трубы (для опор скольжения обычно принимается  $f_{r1}=f_{r2}=0,3$ , для катковых опор  $f_{r1}=0,1$ ,  $f_{r2}=0,3$ );
- $k_{x1}^d$ ,  $k_{x2}^d$ ,  $k_{x3}^d$  – линейные динамические жесткости сейсмо- и виброамортизаторов и сейсмо- и вибродемпферов, кН/м (учитываются при динамических расчетах);
- $k_{\alpha}^d$ ,  $k_{\beta}^d$ ,  $k_{\gamma}^d$  – угловые динамические жесткости сейсмо- и вибродемпферов, кНм/рад (учитываются при динамических расчетах);
- $C_{x1}$ ,  $C_{x2}$ ,  $C_{x3}$  – линейные коэффициенты демпфирования сейсмо- и вибродемпферов, кН·с/м (в динамических расчетах);
- $C_{\alpha}$ ,  $C_{\beta}$ ,  $C_{\gamma}$  – угловые коэффициенты демпфирования сейсмо- и вибродемпферов, кНм·с/рад (в динамических расчетах);
- $\Delta_+$ ,  $\Delta_-$  – зазоры в связях нестандартных опор по и против направления связи, мм;
- StaSup** – статусы скользящих и направляющих опор (односторонняя или двусторонняя) или связей в нестандартных опорах (односторонняя по направлению связи (1), односторонняя против направления связи (2) или двусторонняя (3);
- $\{P_{1доп}, P_{2доп}, P_{3доп}, M_{1доп}, M_{2доп}, M_{3доп}\}$  – допускаемые линейные (кН) и угловые (кНм) и угловые статические и сейсмические нагрузки на опорные конструкции;
- $\{u_{1доп}, u_{2доп}, u_{3доп}, \alpha_{1доп}, \alpha_{2доп}, \alpha_{3доп}\}$  – допускаемые перемещения трубопровода в опорных конструкциях, мм;
- $\{M_{x1}, M_{x2}, M_{x3}, J_{x1}, J_{x2}, J_{x3}\}$  – сосредоточенные массы ( $m$ ) и моменты инерции вращения ( $m \cdot m^2$ ) относительно осей  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ , которыми может моделироваться жесткое оборудование и арматура, включенные в расчетную модель;
- $n_{ц}$  – количество цепей пружинной опоры (подвески);
- $l$  – длина тяги пружинной/жесткой подвески, мм;
- $k_{ц}$  – жесткости цепи пружинной опоры/подвески, кН/м (задается для выбранной структуры);
- $P_y$  – рабочая нагрузка на пружинную опору, кН (для выбранных пружин); для пружин постоянного усилия – постоянная нагрузка;
- $\Delta$  – изменение нагрузки на пружинную подвеску при переходе трубопровода из рабочего состояния в холодное, положительное действительное число, рекомендуется принимать 35%. Для трубопроводов, присоединенных к оборудованию, чувствительному к воздействию усилий от трубопроводов, рекомендуется значение <35% [17], соответственно следует увеличить количество приближений при выборе пружин. Для пружин LISEGA рекомендуемое значение 25%;
- $m$  – коэффициент запаса по нагрузке на пружины

(положительное значение, не меньше 1,0), рекомендуется принимать в соответствии с [17] значение  $m = 1,0 \div 1,3$ . Для пружин LISEGA рекомендуемое значение 1;

**TypSpr** – тип пружины: предусмотрены следующие типы (сортамент) пружин: ОСТ 108.764.01–80 [29], ОСТ 24.125.109–01 [30], МВН 049–63 [31], “спецпружины” ВНИПИЭТ (для горячих боксов-помещений) [32], пружины пользователя и подвески постоянного усилия пользователя, пружины LISEGA [33] и подвески постоянного усилия LISEGA [33].

*Для пружинных подвесок типа “спецпружины” ВНИПИЭТ дополнительно задаются следующие данные:*

**T<sub>пр</sub>** – температура “спецпружины” для расчётных режимов, °С;

**G<sub>пр</sub>** – модуль сдвига для материала тяги подвески “спецпружин” для расчётных режимов, МПа (кг/см<sup>2</sup>);

**β<sub>пр</sub>** – коэффициент линейного расширения для материала тяги подвески “спецпружин” для расчётных режимов, 1/град.

### 2.2.2.1. Характеристики компенсаторов

**TypCom** – типы компенсаторов в зависимости от компенсируемых им перемещений: осевой, сдвиговой, угловой, общего вида;

**k<sub>x</sub><sup>t</sup>, k<sub>y</sub><sup>t</sup>, k<sub>z</sub><sup>t</sup>**, – линейные жёсткости компенсаторов по направлениям осей локальной системы координат **X', Y', Z'**, кН/м;

**k<sub>x</sub><sup>r</sup>, k<sub>y</sub><sup>r</sup>, k<sub>z</sub><sup>r</sup>**, – угловые жёсткости компенсаторов вокруг осей **X', Y', Z'**, кН·м/рад;

**α<sub>z</sub>** – углы поворота компенсаторов вокруг своей оси **Z'**, град;

**A<sub>эф</sub>** – эффективные площади компенсаторов, м<sup>2</sup>;

**Δ<sub>p</sub>, Δ<sub>δ</sub>, Δ<sub>γ</sub>** – допускаемые осевые (мм), сдвиговые (мм), угловые (мм) перемещения торцов компенсаторов.

**δ<sub>к</sub>'** – предварительный натяг компенсаторов, мм;

*Для компенсаторов, в которых проводится расчёт напряжений в соответствии с РД 10-400-01, дополнительно задаются следующие данные:*

**TypCCo** – тип конструкции компенсаторов: сильфонный (1), линзовый (2), сильфонный с промежуточной вставкой (3), линзовый с промежуточной вставкой (4);

**D<sub>a</sub>** – наружный диаметр гибкого элемента, мм;

**D** – внутренний диаметр гибкого элемента, мм;

**s** – номинальная толщина стенки гибкого элемента, мм;

**q** – шаг гофров (ширина гофра), мм;

**n** – количество гофров (линз).

### 2.2.2.2. Характеристики арматуры

**x<sub>ш</sub>, y<sub>ш</sub>, z<sub>ш</sub>** – координаты центра масс штоков арматуры в глобальной СК относительно середины отрезка, моделирующего арматуру, мм;

**P<sub>доп</sub>, M<sub>доп</sub>** – допускаемые нагрузки на патрубки арматуры, кН, кНм.

### 2.2.2.3. Характеристики некольцевых сечений

$A$ ,  $I_x$ ,  $I_y$ ,  $I_z$ ,  $K_x$ ,  $K_y$  — геометрические характеристики стержней некольцевого сечения: площадь поперечного сечения,  $m^2$ , главные центральные моменты инерции,  $m^4$ , по локальным осям  $X'$  и  $Y'$ , крутильный момент инерции,  $m^4$ , коэффициенты формы (сдвига) по локальным осям  $X'$  и  $Y'$ ;

$\alpha_z$  — угол поворота стержней некольцевого сечения вокруг своей оси  $Z'$ , град.

### 2.2.2.4. Характеристики фланцев

$D$ ,  $d$  — наружный и внутренний диаметры прокладок фланцев, мм;

$P_y$  — условное (допускаемое) давление во фланцевых соединениях, МПа.

### 2.2.2.5. Характеристики штуцеров оборудования (врезок)

$s_{x1}$ ,  $s_{x2}$ ,  $s_{x3}$  — линейные жесткости “врезок” (узлов “штуцер-сосуд”, “штуцер-оборудование”) по направлениям местной (локальной)  $x_1'$ ,  $x_2'$ ,  $x_3'$  декартовой системы, кН/м;

$s_\alpha$ ,  $s_\beta$ ,  $s_\gamma$  — угловые жесткости “врезок” вокруг осей  $x_1'$ ,  $x_2'$ ,  $x_3'$ , кН м/рад.

### 2.2.3. Нагрузки и воздействия

$n_j$  — коэффициент(ы) надежности по нагрузке (перегрузке) (таблица 2.1 [3], таблица 6.1 [4], таблица 2.1 [5], таблица 6.1 [6], таблица 13\* [7], таблица 14 [8], таблица 11 [9], таблица 11 [10]);

$k_p$  — коэффициент перегрузки [15], [2], [4];

$\gamma_i$  — коэффициент перегрузки по температурным деформациям [3];

$N_i$  — “штатное” или фактическое число циклов нагружения для  $i$ -го расчетного режима (за время эксплуатации);

$r_i$  — коэффициент асимметрии цикла для  $i$ -го расчетного режима (за время эксплуатации);

$p_i$  — расчетное внутреннее (наружное) давление в трубопроводе для  $i$ -го расчетного режима, МПа;

$p_a$  — давление автофретирования, МПа. Задаётся для прямо- и криволинейных труб при расчёте по АСТРА-СВД (ГОСТ Р 55600-2013);

$T_i$  — расчетная температура стенки трубы (средняя температура) для  $i$ -го расчетного режим, °C;

$T_o$  — температура на внешней поверхности стенки трубы, °C;

$T_i(s)$  — распределение температуры по толщине стенки, °C;

$T_i(h)$  — распределение температуры по высоте сечения, °C;

$\{q\}=\{q_1, q_2, q_3\}$  — вектор распределенных погонных статических нагрузок на трубопровод по направлениям  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  ( $q_3$  — весовая нагрузка), кН/м;

$m_3$  — погонный распределенный момент от неравномерного распределения температуры по высоте сечения, кНм/м;

$\{P\}=\{P_1, P_2, P_3, M_1, M_2, M_3\}$  — вектор заданных сосредоточенных

- линейных ( $P_1, P_2, P_3$  – в кН) и угловых ( $M_1, M_2, M_3$  – в кНм) нагрузок (по осям  $X_1, X_2, X_3$ ) имитирующий статическое действие арматуры и оборудования, а также возможную статическую составляющую реакции сейсмо- и виброопор, кН;
- $\{u\}_0 = \{u_1, u_2, u_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\}_0$  – вектор заданных начальных (температурных) линейных ( $u_1, u_2, u_3$  – в мм) и угловых ( $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – в рад.) перемещений “мертвых” концов и опор; имитирует влияние оборудования и других систем, не включенных в расчетную схему;
- $\{\delta'\} = \{\delta'_1, \delta'_2, \delta'_3\}$  – монтажный натяг, заданный в местной системе координат ( $x'_1, x'_2, x'_3$ ) сечения прямолинейной части трубопровода, мм;
- $\{a_i(f_i)\}_{1,2,3}$  – расчетные спектры ответа; задаются в виде таблиц (оцифрованных графиков) максимальных реакций (ускорений  $a_i$  м/с<sup>2</sup>, по направлениям  $X_1, X_2, X_3$ ) линейного осциллятора, установленного на отметке крепления трубопровода, на сейсмическое воздействие уровня ПЗ и (или) МРЗ в зависимости от его собственной частоты  $f_i$  (Гц или рад/с) при заданном уровне демпфирования;
- $\{a_i(t_i)\}_{1,2,3}$  – расчетные акселерограммы: задаются в виде таблиц (оцифрованных графиков) сейсмических ускорений  $a_i$  (м/с<sup>2</sup>) отметки крепления трубопровода по направлениям  $X_1, X_2, X_3$  в дискретные моменты времени  $t_i$  (с);
- $\{a_i(t_i)\}_{1,2,3}, \{v_i(t_i)\}_{1,2,3}, \{u_i(t_i)\}_{1,2,3}$  – набор расчетных акселерограмм (ускорения, м/с<sup>2</sup>), велосиграм (скорости, м/с) и (или) сейсмограмм (перемещения, м) на различных отметках крепления трубопровода (для учета “неплатформенного” эффекта);
- $\theta_k$  –  $k$ -я частота детерминированного (гидро)динамического воздействия (включая собственные частоты акустических колебаний теплоносителя), Гц или рад/с;
- $\{F_k(\theta_k)\}_l$  – детерминированные полигармонические силовые воздействия, заданные в сечениях гибов, колен, тройников, переходников и арматуры в виде таблицы их амплитуд  $F_k$  (кН), частот (рад/с или Гц) и сдвигов по фазе  $\phi_k$  (град),  $l$  – номер сечения,  $k$  – номер гармоники силы в этом сечении;
- $\{F_i(t_i)\}_{1,2,3}$  – набор силовых возбуждений в различных сечениях трубопровода, которые задаются в виде таблиц (оцифрованных графиков) усилий  $F_i$  (кН), действующих в сечении трубопровода по направлениям  $X_1, X_2, X_3$  в дискретные моменты времени  $t_i$  (с);
- $\{P_i(t_i)\}$  – набор силовых возбуждений в различных сечениях трубопровода, которые задаются в виде таблиц (оцифрованных графиков) давлений  $P_i$  (МПа), действующих в сечении

трубопровода в дискретные моменты времени  $t_i$  (с);

$(\sigma)_2^{\text{доп}}$ ,  $(\sigma)_{\text{РК}}^{\text{доп}}$ ,  $(\sigma_{\text{аф}})_K^{\text{доп}}$  – дополнительные местные напряжения (задаются при расчёте по АСТРА-АЭС, АСТРА-СУДПРОМ) для 2, 3, 4 групп расчётных напряжений, МПа.

**Параметры температурных историй** (задаются для АСТРА-НЕФТЕХИМ (ГОСТ 32388-2013), АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ, АСТРА-МАГИСТР):

Для металлов:

$\tau_i$  – перепад температуры в цикле  $i$ -го типа, град;

$\Delta t_i$  – интервал времени, в рамках которого происходит повторение указанного количества циклов  $i$ -го типа;

$N_{0i}$  – частота повторений цикла за указанный интервал времени.

Для полимеров: (только АСТРА-НЕФТЕХИМ (ГОСТ 32388-2013):

$t_i$  – температура в стенке трубы или детали, °С;

$\tau_i$  – время непрерывного действия температуры  $t_i$ , которое материал может выдержать без разрушения, ч;

**ТурТем** – тип температуры: Принимает значения *Рабочая*, *Аварийная* или *Максимальная*. Типы *Аварийная* и *Максимальная* задаются только один раз в температурной истории.

## 2.2.4. Физико-механические характеристики материалов

**E** – модуль (модули) упругости материала трубы для расчетных режимов, МПа;

$\nu^T (\mu^T)$  – коэффициент Пуассона (для стали обычно принимается  $\nu^T=0,3$ );

$\beta^T (\alpha^T)$  – коэффициент линейного температурного расширения;  $1/^\circ\text{K}$ ;  $1/^\circ\text{C}$ ;

$\chi, \delta$  – коэффициенты усреднения и релаксации компенсационных напряжений, принимаются по [1–4], задаются для расчета высокотемпературных трубопроводов;

$\delta$  – декремент колебаний, зависящий от внутренней диссипации энергии в металле, сварных соединениях и системе “труба-теплоноситель” и т.п. (для оценки сейсмостойкости, вибропрочности и динамической реакции);

$R_{-1}^T$  – предел усталости при симметричном цикле, МПа. Задаётся для расчёта по АСТРА-ВИБР.

$\alpha$  – коэффициент пропорционального демпфирования по массе (для оценки сейсмостойкости, вибропрочности и динамической реакции),  $\text{с}^{-1}$ ;

$\beta$  – коэффициент пропорционального демпфирования по жёсткости (для оценки сейсмостойкости, вибропрочности и динамической реакции), с;

### 2.2.4.1. АСТРА-АЭС, СУДПРОМ:

**ТипMat**– тип материала: неаустенитная (1) или аустенитная (2) сталь;

- $R_{p0,2}^T$  – условный предел текучести для расчетных режимов, МПа;  
 $R_m^T$  – минимальное временное сопротивление для расчетных режимов, МПа;  
 $R_{mt}^T$  – длительный предел прочности (для времени  $t$  эксплуатации высокотемпературных трубопроводов) для расчетных режимов, МПа;  
 $[\sigma_a]$  – допускаемая амплитуда приведенных напряжений, МПа;  
 $\Phi, \Phi_w$  – коэффициенты снижения прочности продольного и поперечного сварного шва.

#### 2.2.4.2. АСТРА-ТЭС:

- TypMat**– тип материала: неаустенитная (1) или аустенитная (2) сталь;  
 $[\sigma]$  – допускаемое номинальное напряжение для расчетных режимов, МПа (раздел 2 [2], в зависимости от расчетного ресурса);  
 $\tau_0$  – расчётный ресурс, ч;  
 $[\sigma_a]$  – допускаемая амплитуда напряжений для заданного числа циклов нагружения (пусков) трубопровода за весь период эксплуатации, МПа (п.5.2.7.3, рис. 5.15 [2]);  
 $\Phi_w, \Phi_{bw}$ – коэффициенты снижения прочности продольного и поперечного сварного шва;  
 $R_m^T$  – минимальное временное сопротивление для расчетных режимов, МПа.

#### 2.2.4.3. АСТРА-НЕФТЕХИМ (РТМ 38.001-94):

- TypMat**– тип материала: неаустенитная (1) или аустенитная (2) сталь;  
 $[\sigma^{20}]$  – допустимые напряжения при  $T=20^\circ\text{C}$ , МПа (п.п.3.1 и 3.2 [3]);  
 $A_T$  – температурный коэффициент определяемый по таблице 3.1 [3];  
 $\Phi, \Phi_{wz}$  – коэффициенты снижения прочности продольного и поперечного сварного шва;  
 $R_m^T$  – минимальное временное сопротивление для расчетных режимов, МПа.

#### 2.2.4.4. АСТРА-НЕФТЕХИМ (ГОСТ 32388-2013):

- TypMat**– тип материала: углеродистая сталь (1), низколегированная сталь (2), аустенитная сталь (3), алюминий и его сплавы (4), медь и её сплавы (5), титан и его сплавы (6), полимерный материал (тип 1) (7), полимерный материал (тип 2) (8).

Для типов материалов 1-6 (металл):

- $\sigma_{B/t}$  –минимальное значение временного сопротивления (предела прочности) при растяжении для расчетных режимов, МПа;  
 $\sigma_{p/t}$  – минимальное значение предела текучести для расчетных режимов, МПа;  
 $\sigma_{1/t}$  – минимальное значение условного предела текучести (напряжение, при котором остаточное удлинение составляет 1,0%) для расчетных режимов, МПа;

- $\sigma_{0,2/t}$  – минимальное значение условного предела текучести (напряжение, при котором остаточное удлинение составляет 0,2%) для расчетных режимов, МПа;
  - $\sigma_{2 \cdot 10^5/t}$  – условный предел длительной прочности на ресурс  $2 \cdot 10^5$  ч для расчетных режимов, МПа;
  - $\sigma_{1/2 \cdot 10^5/t}$  – условный предел ползучести при растяжении, обуславливающий деформацию 1% за  $2 \cdot 10^5$  ч для расчетных режимов, МПа;
  - $\epsilon_B/t$  – относительная пластическая деформация в момент потери устойчивости для расчетных режимов;
  - $\sigma_{BC/t}$  – минимальное значение временного сопротивления (предела прочности) при сжатии для расчетных режимов, МПа;
  - $\sigma_{0,2C/t}$  – условный предел текучести при сжатии для расчетных режимов, МПа;
  - $\tau_B$  – предел прочности при чистом сдвиге для расчетных режимов, МПа;
  - $\tau_T$  – предел текучести при чистом сдвиге для расчетных режимов, МПа;
  - $A$  – коэффициент для расчёта малоциклового усталости, МПа;
  - $B$  – коэффициент для расчёта малоциклового усталости, МПа;
  - $A_t^2$  – коэффициент для расчёта малоциклового усталости, °C;
  - $\varphi_y$  – коэффициент снижения прочности продольного сварного шва;
  - $\varphi_w$  – коэффициент снижения прочности поперечного сварного шва при растяжении;
  - $\varphi_{bw}$  – коэффициент снижения прочности поперечного сварного шва при изгибе;
  - $n_B$  – коэффициент запаса по пределу прочности, (пп. 5.3, 12.1 [4]);
  - $n_T$  – коэффициент запаса по пределу текучести, (пп. 5.3, 12.1 [4]);
  - $n_{дп}$  – коэффициент запаса по пределу длительной прочности, (пп. 5.3, 12.1 [4]). Используется для высокотемпературных трубопроводов;
  - $n_{п}$  – коэффициент запаса по пределу ползучести, (пп. 5.3, 12.1 [4]). Используется для высокотемпературных трубопроводов;
  - $n_{bi}$  – коэффициент запаса по пределу прочности при испытаниях, (пп. 11.1.2 [4]);
  - $n_{Ti}$  – коэффициент запаса по пределу текучести при испытаниях, (пп. 11.1.2 [4]);
  - $\eta$  – поправочный коэффициент, учитывающий условия эксплуатации трубопроводов;
  - $n_N$  – коэффициент запаса прочности по числу циклов;
  - $n_\sigma$  – коэффициент запаса прочности по напряжениям.
- Для типов материалов 7-8 (полимер):*
- $E_{20}$  – модуль ползучести материала при растяжении при холодной температуре, МПа;

- A1** – коэффициент для ветви 1 кривой длительной прочности А (таблица 13.2 [4]);
  - B1** – коэффициент для ветви 1 кривой длительной прочности В (таблица 13.2 [4]);
  - G1** – коэффициент для ветви 1 кривой длительной прочности G (таблица 13.2 [4]);
  - J1** – коэффициент для ветви 1 кривой длительной прочности J (таблица 13.2 [4]);
  - A2** – коэффициент для ветви 2 кривой длительной прочности А (таблица 13.2 [4]). Задаётся для типа материала «Полимерный материал (тип 2)»;
  - B2** – коэффициент для ветви 2 кривой длительной прочности В (таблица 13.2 [4]). Задаётся для типа материала «Полимерный материал (тип 2)»;
  - G2** – коэффициент для ветви 2 кривой длительной прочности G (таблица 13.2 [4]). Задаётся для типа материала «Полимерный материал (тип 2)»;
  - J2** – коэффициент для ветви 2 кривой длительной прочности J (таблица 13.2 [4]). Задаётся для типа материала «Полимерный материал (тип 2)»;
  - K<sub>i(1)</sub>** – расчётный коэффициент запаса прочности для рабочей температуры < 20 град (таблица 13.4 [4]);
  - K<sub>i(2)</sub>** – расчётный коэффициент запаса прочности для рабочей температуры ≥ 20 град (таблица 13.4 [4]);
  - K<sub>i(3)</sub>** – расчётный коэффициент запаса прочности для максимальной температуры (таблица 13.4 [4]);
  - K<sub>i(4)</sub>** – расчётный коэффициент запаса прочности для аварийной температуры (таблица 13.4 [4]);
  - K<sub>y</sub>** – коэффициент условий работы трубопровода (таблица 13.5 [4]);
  - K<sub>c</sub>** – коэффициент прочности соединения труб и деталей (таблица 13.6 [4]);
  - K<sub>x</sub>** – коэффициент химической стойкости материала труб;
  - K<sub>n</sub>** – коэффициент условий прокладки;
  - K<sub>e</sub>** – коэффициент, учитывающий влияние температуры на деформационные свойства материала (таблица 13.7 [4]).
- 2.2.4.5. АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ (РД 10-400-01):**
- TypMat**– тип материала: неаустенитная (1) или аустенитная (2) сталь;
  - [σ]** – допускаемое номинальное напряжение для расчетных режимов, МПа (раздел 2 [2], в зависимости от расчетного ресурса);
  - τ<sub>0</sub>** – расчётный ресурс, ч;
  - R<sup>T</sup><sub>m</sub>** – минимальное временное сопротивление для расчетных режимов, МПа;
  - Φ<sub>w</sub>, Φ<sub>d</sub>** – коэффициенты снижения прочности сварного соединения и



ослаблений (отверстий).

#### 2.2.4.6. АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ (ГОСТ Р 55596-2013):

**TypMat**– тип материала: неаустенитная (1) или аустенитная (2) сталь;

$\sigma_{B/t}$  – минимальное значение временного сопротивления материала разрыву (предела прочности) для расчетных режимов, МПа;

$\sigma_{p/t}$  – минимальное значение предела текучести материала для расчетных режимов, МПа;

$\varphi_y$  – коэффициент снижения прочности продольного сварного шва;

$\varphi_w$  – коэффициент снижения прочности поперечного сварного шва при растяжении;

$\varphi_{bw}$  – коэффициент снижения прочности поперечного сварного шва при изгибе.

#### 2.2.4.7. АСТРА-МАГИСТР (СНП 2.05.06-85, СП 36.13330.2012):

**TypMat**– тип материала: неаустенитная (1) или аустенитная (2) сталь;

$R_1^H$  – нормативное сопротивление растяжению-сжатию металла труб и сварных соединений, равное минимальному значению временного сопротивления для расчетных режимов, МПа;

$R_2^H$  – нормативное сопротивление растяжению-сжатию металла труб и сварных соединений, равное минимальному значению предела текучести для расчетных режимов, МПа;

$m$  – коэффициент условий работы трубопровода (таблица 1 [7, 8]);

$k_1, k_2$  – коэффициенты надежности по материалу (таблицы 9, 10 [7], таблицы 10, 11 [8]);

$k_H$  – коэффициент надежности по назначению (ответственности) трубопровода (таблица 11 [7], таблица 12 [8]);

$n$  – коэффициент надежности по нагрузке (таблица 13\* [7], таблица 14 [8]).

#### 2.2.4.8. АСТРА-МАГИСТР (ГОСТ Р 55989-2014):

**TypMat**– тип материала: неаустенитная (1) или аустенитная (2) сталь;

$\sigma_H$  – нормативное сопротивление материала труб и сварных соединений, равное нормативному пределу прочности (временному сопротивлению) для расчетных режимов, МПа;

$\sigma_y$  – нормативное сопротивление материала труб и сварных соединений, равное нормативному пределу текучести для расчетных режимов, МПа;

$\gamma_d$  – коэффициент условий работы трубопровода при расчете его на прочность, устойчивость и деформативность (таблица 13 [9]);

$\gamma_{mu}$  – коэффициент надежности по материалу труб при расчёте по прочности (таблица 12 [9]);

$\gamma_{my}$  – коэффициент надежности по материалу труб при расчёте по текучести;

$\gamma_n$  – коэффициент надежности по ответственности газопровода;

$\gamma_{fr}$  – коэффициент надежности по нагрузке (внутреннему давлению) (табл. 11 [9]);

**TypTSu**– тип транспортируемых веществ: не указано (1), импульсный или топливный газ (2);

**WorCon** – условия работы: эксплуатация (1) или строительство (2).

#### 2.2.4.9. АСТРА-МАГИСТР (ГОСТ Р 55990-2014):

**TypMat**– тип материала: неаустенитная (1) или аустенитная (2) сталь;

$\sigma_n$  – нормативное сопротивление материала труб и сварных соединений, равное нормативному пределу прочности (временному сопротивлению) при расчётной температуре, МПа;

$\sigma_y$  – нормативное сопротивление материала труб и сварных соединений, равное нормативному пределу текучести при расчётной температуре, МПа;

$\gamma_d$  – коэффициент условий работы трубопровода при расчете его на прочность, устойчивость и деформативность (таблица 13 [10]);

$\gamma_{ds}$  – коэффициент условий работы трубопровода, транспортирующего сероводородсодержащие продукты, при расчете его на прочность, устойчивость и деформативность (таблица 14 [10]);

$\gamma_{mu}$  – коэффициент надежности по материалу труб при расчёте по прочности (таблица 12 [10]);

$\gamma_{my}$  – коэффициент надежности по материалу труб при расчёте по текучести;

$\gamma_n$ – коэффициент  $\gamma_{fr}$ –коэффициент надежности по нагрузке (внутреннему давлению) (табл. 11 [10]);

**TypTSu**– тип транспортируемых веществ: не указано (1), сероводородсодержащие продукты (2).

**WorCon** – условия работы: эксплуатация (1) или строительство (2).

#### 2.2.4.10. АСТРА-СВД (ГОСТ Р 55600-2013):

**TypMat**– тип материала: неаустенитная (1) или аустенитная (2) сталь;

$R_{p/t}$  – минимальное значение предела текучести для расчетных режимов, МПа;

$R_{m/t}$  – минимальное значение временного сопротивления (предела прочности) для расчетных режимов, МПа;

$\psi_t$  – относительное сужение образца для расчетных режимов, %;

$\delta_t$  – относительное удлинение образца для расчетных режимов, %;

$n_\sigma$  – коэффициент запаса прочности по напряжениям;

$n_N$  – коэффициент запаса прочности по числу циклов;

$K_\sigma$  – теоретический коэффициент концентрации приведенных упругих напряжений.

#### 2.2.4.11. АСТРА-СВД (РД РТМ 26-01-44-78):

**TypMat** – тип материала: углеродистая (1), низколегированная (2), аустенитная (3) сталь;

$\sigma_b$  – минимальное значение временного сопротивления материала разрыву (предела прочности) для расчётных режимов, МПа;

$\sigma_T$  или  $\sigma_{0,2}$  – минимальное значение предела текучести или условного предела текучести материала для расчётных режимов, МПа;

$\varphi, \varphi_{II}$  – коэффициенты снижения прочности продольного и поперечного сварного шва;

$n_\sigma$  – коэффициент запаса прочности по напряжениям;

$n_N$  – коэффициент запаса прочности по числу циклов;

$q$  – коэффициент чувствительности материала к концентрации;

$\alpha_\sigma$  – теоретический коэффициент концентрации;

$n$  – коэффициент запаса прочности.

#### 2.2.5. Дополнительные характеристики подземных и наземных трубопроводов бесканальной прокладки в грунте

$D_k$  – диаметр кожуха изоляции, мм;

$H$  – высота засыпки (глубина заложения по верхней отметке), мм;

$B$  – ширина траншеи на уровне верхней образующей кожуха изоляции, мм;

**TypGru** – тип грунта (таблица 2.2, прим. [5]);

$n_m$  – коэффициент, зависящий от конструкции изоляции и характера нагружения, [4, 5];

**TypCCu** – тип компенсирующей подушки: мягкая (1), средняя (2), жёсткая (3);

$s_n$  – толщина компенсирующей подушки, мм.

*Дополнительные параметры АСТРА-МАГИСТР (ГОСТ Р 55989-2014, ГОСТ Р 55990-2014):*

$\alpha$  – угол между основанием и откосом траншеи, град;

$k_{b.f.}$  – коэффициент, учитывающий уменьшение плотности грунта засыпки по сравнению с грунтом ненарушенной структуры.

#### 2.2.5.1. Характеристики грунта основания, засыпки, откосов

$E_{гр}$  – модуль деформации грунта, МПа;

$\nu_{гр}$  – коэффициент Пуассона грунта;

$\rho_{гр}$  – плотность грунта, т/м<sup>3</sup>;

$\Phi_{гр}$  – угол внутреннего трения грунта, град;

$c_{гр}$  – коэффициент сцепления грунта, МПа;

$e$  – коэффициент пористости грунта;

$R$  – несущая способность грунта, МПа;

$c_{x0}$  – коэффициент сопротивления продольным перемещениям грунта, кН/м<sup>3</sup>.

#### 2.2.5.2. Характеристики изоляции

### 2.2.5.2.1. АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ:

**TypIzo** – тип изоляции: нет (1), пенополиуретан (2), полимербетон (3), армопенобетон (4), битумперлит (5), битумкерамзит (6);

**E<sub>ппу</sub>** – модуль упругости пенополиуретана при рабочей температуре, МПа;

**E<sub>пэ</sub>** – модуль упругости полиэтиленовой оболочки при рабочей температуре, МПа;

**[σ]<sub>ппу</sub>** – допускаемое нормативное напряжение в пенополиуретане при рабочей температуре, МПа;

**[τ]<sub>ппу</sub>** – допускаемое напряжение сдвига в пенополиуретане при рабочей температуре, МПа;

**[σ]<sub>пэ</sub>** – допускаемое нормативное напряжение в полиэтиленовой оболочке при рабочей температуре, МПа.

### 2.2.5.2.2. АСТРА-НЕФТЕХИМ (ГОСТ 32388-2013), АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ:

**k<sub>oi</sub>** – коэффициент постели изоляции (для АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ (РД 10-400-01) определяется программой по заданному типу изоляции), кН/м<sup>3</sup>.

**2.4.** Результатом каждого вида поверочного расчета является, прежде всего, оценка напряженно-деформированного состояния и прочности всех элементов (сечений) трубопроводов по соответствующему критерию. Кроме того, определяются нагрузки на патрубки арматуры и оборудования, на опорные и строительные конструкции. Предусмотрен автоматизированный режим выбора “оптимальной” структуры пружинных подвесок сортамента ОСТ, МВН, специальных пружин ВНИПИЭТ (учет температурного удлинения тяг) и пружин фирмы LISEGA. Вычисляются также перемещения и силовые факторы (усилия и моменты) в торцевых сечениях фасонных элементов, которые затем могут быть использованы как граничные условия для их уточненного расчета (а также анализа устойчивости) или для расчета существенно более гибких трубопроводных систем, примыкающих к этим сечениям.

**{u}={u<sub>1</sub>, u<sub>2</sub>, u<sub>3</sub>, α<sub>1</sub>, α<sub>2</sub>, α<sub>3</sub>}** – вектор перемещений (линейных **u<sub>1</sub>, u<sub>2</sub>, u<sub>3</sub>**, мм, и угловых **α<sub>1</sub>, α<sub>2</sub>, α<sub>3</sub>**, рад.) сечений и узлов расчетной модели;

**{N}={Q<sub>x1</sub>, Q<sub>x2</sub>, Q<sub>x3</sub>, M<sub>x1</sub>, M<sub>x2</sub>, M<sub>x3</sub>}** – вектор нагрузок на “мертвую” опору (патрубок арматуры и оборудования, защемляющие опорные и строительные конструкции): силы **Q<sub>x1</sub>, Q<sub>x2</sub>, Q<sub>x3</sub>** (кН) и моменты **M<sub>x1</sub>, M<sub>x2</sub>, M<sub>x3</sub>** (кН·м);

**{N'}={N<sub>z</sub>', M<sub>x</sub>', M<sub>y</sub>', M<sub>z</sub>'}** – вектор значимых силовых факторов в расчетных сечениях:

**N<sub>z</sub>** – осевое усилие, кН;

**M<sub>x</sub>', M<sub>y</sub>', M<sub>z</sub>'** – изгибающие и крутящий моменты, кН·м;

**Q<sub>x</sub>', Q<sub>y</sub>'** – поперечные усилия в расчётных сечениях;

**{P}<sub>i</sub>={P<sub>x1</sub>, P<sub>x2</sub>, P<sub>x3</sub>}** – вектор нагрузок на опорные конструкции (пружинные подвески, опоры скольжения и др.), кН;

$\omega_i$  –  $i$ -я собственная частота колебаний,  $i=1, 2, \dots, p$  (Гц или рад/с);  
 $\{\Phi\}_i$  –  $i$ -я собственная форма колебаний системы;  
 $\gamma_i$  – коэффициент распределения для  $i$ -й собственной формы колебаний,  $i=1, 2, \dots, p$   
 $M_{ei}$  – эффективная масса для  $i$ -й собственной формы колебаний,  $i=1, 2, \dots, p$   
 $\bar{M}_{ei}$  – накопленная масса для  $i$ -й собственной формы колебаний,  $i=1, 2, \dots, p$

$\sigma_{\varphi(0)}$ ,  $\sigma_{z(y)}$ ,  $\sigma_r$  – окружная (кольцевая), продольная и радиальная компоненты нормальных напряжений, МПа;

$\tau$  – касательные (от кручения) напряжения, МПа;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения, МПа;

$[N]$  – допускаемое число циклов нагружения, соответствующее амплитудам низко- или высокочастотных напряжений;

$a=\Sigma N_i/[N]_i$  – накопленное усталостное повреждение от групп циклов за срок эксплуатации [5];

#### 2.4.1. Трубопроводы АЭУ (АСТРА-АЭС):

$(\sigma)_1$  – группа приведенных напряжений, определяемая по составляющим общих мембранных напряжений (группа 1), от действия рабочего давления, МПа;

$(\sigma)_2$  – расчетные приведенные напряжения (группа 2), определяемые по суммам составляющих общих или местных мембранных и общих изгибных напряжений, от действия весовой нагрузки и давления, МПа;

$(\sigma)_{RK}$  – максимальный размах приведенных напряжений (группа 3), определяемых по суммам составляющих ранее упомянутых напряжений, общих температурных, местных изгибных и сдвиговых напряжений, от действия давления, компенсации температурных расширений и смещения опор (концов), МПа;

$(\sigma_{aF})_K$  – амплитуда приведенных “низкочастотных” напряжений (группа 4), определяемая от действия тех же факторов, что и  $(\sigma)_{RK}$  с учетом концентрации напряжений и овальности сечений (для колен и гибов);

$(\sigma_s)_1$  – расчетные приведенные напряжения, определяемые как напряжения группы  $(\sigma)_1$  от действия давления, и сейсмических воздействий уровня ПЗ или МРЗ, МПа;

$(\sigma_s)_2$  – расчетные приведенные напряжения, определяемые как напряжения группы  $(\sigma)_2$  от действия давления, весовой нагрузки и сейсмических воздействий уровня ПЗ или МРЗ, МПа;

#### 2.4.2. Трубопроводы пара и горячей воды (АСТРА-ТЭС):

$\sigma_{np}$  – расчетное приведенное напряжение от внутреннего давления, МПа;

$\sigma_{\Phi}$  – расчетное эффективное напряжение, определяемое по составляющим общих и местных мембранных напряжений и

общих изгибных напряжений, от действия весовой нагрузки, внутреннего давления и рабочих нагрузок опор, МПа (этап I полного расчета, для оценки статической прочности, таблица 5.4 [2]);

- $\sigma_{\text{экв}}$  – расчетные эквивалентные напряжения, определяемые по суммам мембранных и изгибных напряжений, от действия всех нагружающих факторов для рабочего (этап II) и нерабочего (этап IV) состояний, МПа (для оценки статической прочности на этапе II и, только для высокотемпературных трубопроводов, на этапе IV, таблица 5.4 [2]);
- $\sigma_{\text{умax}}$  – расчетные эквивалентные максимальные условные “низкочастотные” напряжения, определяемые от действия внутреннего давления, температурного расширения, “собственных” смещений заземленных концевых сечений, усилий сопротивления промежуточных опор с учетом концентрации напряжений и овальности сечений (для колен и гибов), МПа (этап III полного расчета, для оценки усталостной прочности низкотемпературных трубопроводов, таблица 5.4 [2]);
- $\sigma_{\text{mms}}$  – расчетные мембранные напряжения, определяемые от действия внутреннего давления и сейсмических воздействий уровня ПЗ (НУЭ+ПЗ), МПа (таблица 11.3 [2]);
- $\sigma_{\text{mms}} + \sigma_{\text{bs}}$  – расчетные мембранные и общие изгибные напряжения, определяемые от действия давления, весовой нагрузки и сейсмических воздействий уровня ПЗ (НУЭ+ПЗ), МПа (таблица 11.3 [2]);

#### **2.4.3. Трубопроводы нефтехимии и нефтепереработки (АСТРА-НЕФТЕХИМ):**

*РТМ 38.001-94*

- $(\sigma)_e$  – эквивалентные напряжения при расчете несущей способности (этап 1) и статической прочности (этап 2), МПа;
- $(\sigma)_{ae}$  – амплитуда эквивалентных напряжений при расчете на циклическую прочность (этап 3а) и длительную циклическую прочность (этап 3б), МПа;
- $(\sigma)_{aev}$  – амплитуда эквивалентных вибронпряжений, МПа;

*ГОСТ 32388-2013*

- $\sigma_e$  – эквивалентные напряжения при расчете на статическую прочность (этап 2 для низкотемпературных, этап 1 для среднетемпературных, этапы 2 и 4 для высокотемпературных трубопроводов), МПа;
- $\Delta\sigma_e$  – амплитуды эквивалентных напряжений при расчете на циклическую прочность (этап 3 для низко- и среднетемпературных трубопроводов), МПа;
- $N_c$  – эквивалентное число полных циклов нагружения (этап 3 для низко- и среднетемпературных трубопроводов);

- N** – продольное осевое сжимающее усилие при проверке общей устойчивости (этапы 1, 2, 4), кН;  
**K** – эффективный коэффициент местной устойчивости (этапы 1, 2, 4).

#### **2.4.4. Трубопроводы теплосетей (АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ):**

*РД 10-400-01:*

- $\sigma_e$**  – эквивалентные напряжения в металле трубы при расчете на статическую и циклическую прочность (этапы 1, 2, 3, 4), МПа;  
 **$\sigma_{ппу}$**  – продольные напряжения в пенополиуретане, МПа (для трубопроводов бесканальной прокладки в грунте с ППУ+ПЭ изоляцией);  
 **$\tau_{ппу}$**  – напряжения сдвига в пенополиуретане, МПа (для трубопроводов бесканальной прокладки в грунте);  
 **$\sigma_{пэ}$**  – продольные напряжения в полиэтиленовой оболочке, МПа (для трубопроводов бесканальной прокладки в грунте);

*ГОСТ Р 55596-2014:*

- $\sigma_e$**  – эквивалентные напряжения при расчете на статическую прочность, МПа;  
 **$\Delta\sigma_e$**  – амплитуды эквивалентных напряжений при расчете на циклическую прочность, МПа;  
 **$N_c$**  – эквивалентное число полных циклов нагружения;  
**N** – продольное осевое сжимающее усилие при проверке общей устойчивости, кН;  
 **$\sigma_{ппу}$**  – продольные напряжения в пенополиуретане, МПа (для трубопроводов бесканальной прокладки в грунте с ППУ+ПЭ изоляцией);  
 **$\tau_{ппу}$**  – напряжения сдвига в пенополиуретане, МПа (для трубопроводов бесканальной прокладки в грунте);  
 **$\sigma_{пэ}$**  – продольные напряжения в полиэтиленовой оболочке, МПа (для трубопроводов бесканальной прокладки в грунте);

#### **2.4.5. Магистральные трубопроводы (АСТРА-МАГИСТР)**

*СНиП 2.05.06-85, СП 36.13330.2012:*

- $\sigma_{1.0}$**  – кольцевое напряжение от внутреннего давления, МПа;  
 **$\sigma_{2.0}$**  – продольное напряжение от внутреннего давления и продольной силы, МПа;  
 **$\sigma_{1\text{раст}}, \sigma_{2\text{раст}}$**  – главные напряжения в растянутой зоне, МПа;  
 **$\sigma_{1\text{сж}}, \sigma_{2\text{сж}}$**  – главные напряжения в сжатой зоне, МПа;  
 **$\sigma_{\text{экр}}^{\text{ос}}$**  – эквивалентное напряжение по нейтральной оси, МПа;  
 **$\sigma_{\text{экр}}^{\text{раст}}$**  – эквивалентное напряжение в зоне растяжения, МПа;  
 **$\sigma_{\text{экр}}^{\text{сж}}$**  – эквивалентное напряжение в зоне сжатия, МПа.

*ГОСТ Р 55989-2014, ГОСТ Р 55990-2014:*

- $\sigma_h$**  – кольцевые напряжения от внутреннего давления, МПа;  
 **$\sigma_l$**  – продольные напряжения, МПа;

- $\sigma_{eq}$  – эквивалентные напряжения по теории Мизеса, МПа;  
 $S$  – эквивалентное продольное осевое усилие при проверке общей устойчивости, кН;  
 $\epsilon_b/\epsilon_{1cr}$  – соотношение предельно допустимой изгибной и критической продольной только при изгибе газопровода деформаций.

#### 2.4.6. Трубопроводы высокого и сверхвысокого давления (АСТРА-СВД):

ГОСТ Р 55600-2013:

- $\sigma_{экр}$  – эквивалентные напряжения в металле трубы при расчете на статическую прочность, МПа;  
 $\sigma_a$  – амплитуда эквивалентных напряжений при расчете на циклическую прочность, МПа.

РД РТМ 26-01-44-78:

- $\sigma_{экр}^в$  – эквивалентные напряжения на внутренней поверхности трубы от совместного действия внутреннего давления и температурного перепада по толщине стенки;  
 $\sigma_{экр}^н$  – эквивалентные напряжения на наружной поверхности трубы от совместного действия внутреннего давления и температурного перепада по толщине стенки;

$\Sigma P_i/[P]_i$  – оценка прочности от дополнительных нагрузок.

- $\sigma_a$  – амплитуды эквивалентных напряжений при расчете на циклическую прочность, МПа;

#### 2.4.7. Судовые трубопроводы (АСТРА-СУДПРОМ):

- $\sigma^p_0$  – приведённые напряжения, определяемые по составляющим общих мембранных напряжений, от действия рабочего давления, МПа;  
 $\sigma_{пр1}$  – расчетные приведенные напряжения, определяемые по суммам составляющих общих или местных мембранных и общих изгибных напряжений, от действия весовой нагрузки и давления, МПа;  
 $\sigma_{пр2}$  – расчетные приведенные напряжения, определяемые при наличии дополнительных к давлению нагрузок, по суммам составляющих ранее упомянутых напряжений, общих температурных, местных изгибных и сдвиговых напряжений, от действия давления, компенсации температурных расширений и смещения опор (концов), МПа;  
 $\sigma_a^*$  – расчётные амплитуды приведенных условно упругих напряжений, определяемая от действия тех же факторов, что и  $\sigma_{пр2}$  с учетом концентрации напряжений и овальности сечений (для колен и гибов);

Дополнительно приводятся следующие результаты расчёта фланцевых соединений:

- $b$  – оптимальная ширина плоской прокладки, мм;  
 $M_{кл}$  – монтажный момент на ключе, кНм;



- $\sigma_{\text{пр}}$  – напряжение в цельном фланце, МПа;  
 $\sigma_{\text{пр}}$  – напряжение в наконечнике свободного фланца, МПа;  
 $\sigma_{\text{рез.к.}}$  – напряжение в кольце свободного фланца, МПа;  
 $M_{\text{кр}}$  – допускаемый крутящий момент, кНм;  
 $d_1$  – расчётный диаметр болтов/шпилек, мм;  
 $d_2$  – расчётный диаметр болтов/шпилек, мм;  
 $d_2$  – расчётный диаметр болтов/шпилек, мм.

**2.5.** По комплексам программ, входящих в семейство **АСТРА-НОВА'2021**, проводятся следующие виды (разделы) поверочного расчета на прочность трубопроводов [1–12] (“звездочками” помечены те расчеты для трубопроводов нефтехимии, теплосетей и магистралей, которые не регламентированы действующими российскими нормами, но потребны как по запросам практики, так и по современным мировым стандартам).

**2.5.1. АСТРА-АЭС [1]:**

- 1) расчеты на статическую прочность;
- 2) расчет на циклическую и длительную циклическую прочность;
- 3) расчет на прочность при нерабочем состоянии и испытаниях;
- 4) расчет на устойчивость;
- 5) расчет на сейсмические воздействия;
- 6) расчет на вибропрочность;
- 7) расчет на динамические воздействия.

**2.5.2. АСТРА-ТЭС [2]:**

- 1) расчеты на статическую прочность;
- 2) расчет на циклическую и длительную циклическую прочность;
- 3) расчет на прочность при нерабочем состоянии и испытаниях;
- 4) расчет на сейсмические воздействия;
- 5) расчет на вибропрочность;
- 6) расчет на динамические воздействия.

**2.5.3. АСТРА-НЕФТЕХИМ [3]:**

- 1) расчетная оценка несущей способности;
- 2) расчет на статическую прочность;
- 3) расчет на циклическую и длительную циклическую прочность;
- 4) расчет на прочность при нерабочем состоянии и испытаниях;
- 5\*) расчет на сейсмические воздействия;
- 6) расчет на вибропрочность;
- 7\*) расчет на динамические воздействия.

**2.5.4. АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ [5]:**

- 1) расчеты на статическую прочность;
- 2) расчет на циклическую прочность;
- 3) расчет на прочность при нерабочем состоянии и испытаниях;
- 4) расчет на устойчивость;
- 5\*) расчет на сейсмические воздействия;
- 6\*) расчет на вибропрочность;
- 7\*) расчет на динамические воздействия.

**2.5.5. АСТРА-МАГИСТР [7–10]:**

- 1) расчеты на статическую прочность;
- 2\*) расчет на циклическую прочность;
- 3) расчет на прочность при нерабочем состоянии и испытаниях;
- 4) расчет на устойчивость;
- 5) расчет на сейсмические воздействия;
- 6) расчет на вибропрочность;
- 7) расчет на динамические воздействия.

**2.5.6. АСТРА-СВД [11–12]:**

- 1) расчеты на статическую прочность;
- 2) расчет на циклическую прочность;
- 3) расчет на прочность при нерабочем состоянии и испытаниях;
- 4\*) расчет на сейсмические воздействия;
- 5\*) расчет на вибропрочность;
- 6\*) расчет на динамические воздействия.

**2.5.1. АСТРА-СУДПРОМ [13–14]:**

- 1) расчеты на статическую прочность;
- 2) расчет на циклическую и длительную циклическую прочность;
- 3\*) расчет на прочность при нерабочем состоянии и испытаниях;
- 4\*) расчет на сейсмические воздействия;
- 5\*) расчет на вибропрочность;
- 6\*) расчет на динамические воздействия.

Кроме перечисленных, нормативно регламентированных расчетов, может проводиться в линейно-упругой динамической постановке расчет последствий “мгновенного” разрыва трубопроводов и расчет от кинематических (спектры и акселерограммы) воздействий, вызванных внешними нагрузками на строительные конструкции (удар самолета, ударная воздушная волна и т.п.).

**2.6.** Поверочный расчет основан на оценке прочности по допускаемым напряжениям, перемещениям и деформациям, собственным частотам колебаний и усталостным повреждениям.

**2.7.** Расчетные напряжения на соответствующих этапах расчета определяются по теориям наибольших касательных напряжений [1, 5, 13] или энергии формоизменения [2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12] для прямых труб, отводов заданных типов (гибов, колен, секторных), переходов, ортогональных и косых радиальных тройниковых соединений (сварных, сварных с усиливающими накладками, штампованных и штампосварных) и “ненормализованных” линзовых и сильфонных компенсаторов (по методике [3, 5]) по заданному рабочему давлению и вычисленным значимым внутренним силовым факторам (осевая сила, изгибающие и крутящий моменты в сечении) и сопоставляются с допускаемыми значениями – непосредственно (оценки несущей способности, статической прочности и сейсмостойкости) или через суммирование повреждений от циклов и (или) факторов (оценки циклической прочности, длительной циклической прочности и циклической прочности с учетом высокочастотных составляющих – вибраций).

**2.7.1. АСТРА-АЭС.** Расчетные приведенные напряжения групп  $(\sigma)_1$ ,  $(\sigma)_2$ ,

$(\sigma)_{\text{РК}}$ ,  $(\sigma_{\text{аF}})_{\text{К}}$ ,  $(\sigma_{\text{s}})_2$  и  $(\sigma_{\text{аF}})_{\text{J}}$ , сопоставляемые с допускаемыми значениями, определяются по теории наибольших касательных напряжений через компоненты, вычисляемые согласно формул [1, 28] по заданному давлению, вычисленным значимым внутренним силовым факторам и, кроме того, местным (в том числе, остаточным) напряжениям в зонах сварки и других зон краевых эффектов. Для тяжело нагруженных отводов (гибов, колен, секторных) и ортогональных равно- и неравнопроходных тройников (сварных, с накладками, штампованных и штампосварных врезок) выполняется также расчет напряжений и оценка прочности по уточненным методикам [1, 28, 28]. Оценка циклической прочности при нескольких режимах работы трубопровода (этап 3 статического расчета) выполняется по формулам линейного суммирования повреждений, та же методика используется для оценки вибропрочности.

**2.7.2. АСТРА-ТЭС.** Расчетные приведенные, эффективные и эквивалентные напряжения групп  $\sigma_{\text{пр}}$ ,  $\sigma_{\text{эф}}$ ,  $\sigma_{\text{экв}}$ ,  $\sigma_{\text{умax}}$ ,  $\sigma_{\text{mms}}$  и  $\sigma_{\text{mms}} + \sigma_{\text{bs}}$ , для прямых труб, отводов, “ненормализованных” линзовых и сильфонных компенсаторов и равнопроходных (только!) тройников, сопоставляемые с допускаемыми значениями, определяются согласно формулам [2]. Оценка циклической прочности при нескольких режимах работы трубопровода (этап 3 статического расчета) выполняется по формулам линейного суммирования повреждений, та же методика используется для оценки вибропрочности.

**2.7.3. АСТРА-НЕФТЕХИМ.** Расчетные приведенные (эквивалентные) напряжения групп  $(\sigma)_{\text{е}}$ ,  $(\sigma)_{\text{ае}}$ ,  $(\sigma)_{\text{аев}}$  на соответствующих этапах расчета, сопоставляемые с допускаемыми значениями, определяются согласно формулам [3] по внутреннему давлению и вычисленным значимым внутренним силовым факторам. Длительная циклическая прочность высокотемпературных трубопроводов считается обеспеченной, если выполняются нормативные условия суммирования повреждений от усталости и ползучести.

**2.7.4. АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ.** Расчетные эквивалентные напряжения  $\sigma_{\text{е}}$  от давления и вычисляемых значимых силовых факторов, определяемые по теории наибольших касательных напряжений через компоненты (нормальные окружные  $\sigma_{\text{ф}}$ , осевые  $\sigma_{\text{y}}$  и радиальные  $\sigma_{\text{r}}$  и касательные  $\tau$ ) и главные напряжения  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  на этапах 1, 2 и 4 расчета для прямых труб, отводов 4-х типов (гнуемых, крутоизогнутых и штампованных, стыкуемых с трубами на сварке, на фланцах, на сварке и на фланцах, а также секторных), косых стыков, переходников, ортогональных тройников и врезок 3-х типов (сварных, сварных с накладками, штампованных и штампосварных) и “ненормализованных” линзовых и сильфонных компенсаторов, сопоставляются с допускаемыми значениями [5]. Оценка циклической прочности (этап 3 статического расчета) выполняется по формулам линейного суммирования повреждений для заданной “температурной истории” нагружения трубопровода с учетом концентрации напряжений в отводах, стыках, переходах и тройниках.

**2.7.5. АСТРА-МАГИСТР.** Расчетные значения  $\sigma_{1.0}$  (кольцевое напряжение от внутреннего давления),  $\sigma_{2.0}$  (продольное напряжение от внутреннего давления и продольной силы),  $\sigma_{1\text{раст}}$ ,  $\sigma_{2\text{раст}}$  (главные напряжения в

растянутой зоне),  $\sigma_{1сж}$ ,  $\sigma_{2сж}$  (главные напряжения в сжатой зоне),  $\sigma_{экв}^{ос}$  (эквивалентное напряжение по нейтральной оси),  $\sigma_{экв}^{раст}$  (эквивалентное напряжение в зоне растяжения),  $\sigma_{экв}^{сж}$  (эквивалентное напряжение в зоне сжатия) на этапах 1, 2 и 4 расчета для прямых труб, отводов, ортогональных тройников и врезок 3-х типов (сварных, сварных с накладками, штампованных и штампосварных) и “ненормализованных” линзовых и сильфонных компенсаторов сопоставляются с допускаемыми значениями [7, 8, 9, 10].

**2.7.6. АСТРА-СВД** Расчетные эквивалентные напряжения  $\sigma_e$  и амплитуды  $\sigma_a$  от давления, перепада температур по толщине стенки, автофретирования и вычисляемых значимых силовых факторов, определяемые по теории наибольших касательных напряжений через компоненты (нормальные окружные  $\sigma_\phi$ , осевые  $\sigma_y$  и радиальные  $\sigma_r$  и касательные  $\tau$ ) и главные напряжения  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  на этапе 2 расчета для прямых труб, отводов 2-х типов (гнутих из труб или других), сопоставляются с допускаемыми значениями [11, 12].

**2.7.7. АСТРА-СУДПРОМ.** Расчетные приведенные напряжения  $\sigma^P$ ,  $\sigma_{пр1}$ ,  $\sigma_{пр2}$ ,  $\sigma_a^*$  и  $\sigma_{ai}^*$ , сопоставляемые с допускаемыми значениями, определяются по теории наибольших касательных напряжений через компоненты, вычисляемые согласно формул [13] по заданному давлению, вычисленным значимым внутренним силовым факторам и, кроме того, местным (в том числе, остаточным) напряжениям в зонах сварки и других зон краевых эффектов. Оценка циклической прочности при нескольких режимах работы трубопровода (этап 3 статического расчета) выполняется по формулам линейного суммирования повреждений.

**2.8.** В комплексах реализованы дополнительные, по сравнению с нормативно регламентированными [1–12], возможности и (или) обоснованно скорректированы нестрогие или ошибочные формулы.

**2.8.1. АСТРА-АЭС.** Расчетные приведенные напряжения групп  $(\sigma)_1$ ,  $(\sigma)_2$ ,  $(\sigma)_{Rk}$ ,  $(\sigma_{aF})_k$  (группы 1, 2, 3 и 4) во всех расчетных сечениях участка (суперэлемента) и в тройниковых соединениях определяются по формулам Приложения 5 Норм [1] со следующими уточнениями:

1) для групп  $(\sigma)_1$ ,  $(\sigma)_2$ ,  $(\sigma_{aF})_k$  в качестве расчетных выдаются максимальные из двух напряжений, получаемых от различных силовых факторов, соответственно уменьшенных и увеличенных в  $k_n$  раз ( $k_n > 1$  – коэффициент “перегрузки” [2, 15]);

2) уточненный расчет напряжений в тройниковых соединениях проводится согласно “Руководству по расчету и конструированию тройников технологических трубопроводов” [26] и “Руководству по обоснованию прочности трубопроводов АЭС” [28], развивающих и уточняющих соответствующие положения уточненной методики Норм [1]. Уточненный расчет проводится для тех тройников, расчётные напряжения в которых по упрощенной методике Норм [1] превышают допускаемые.

В дополнение к положениям [1] – оценка герметичности фланцевых соединений, расчет напряжений и прочности «ненормализованных» линзовых и сильфонных компенсаторов.

**2.8.2. АСТРА-ТЭС.** В дополнение к [2] – оценка герметичности фланцевых соединений, расчет напряжений и прочности неравнопроходных тройников, «ненормализованных» линзовых и сильфонных компенсаторов.

**2.8.3. АСТРА-НЕФТЕХИМ.** Все формулы реализованы точно, без опечаток, содержащихся в первой редакции [3].

В дополнение к [3] – возможность расчета на сейсмические воздействия по методикам, принятым в атомной и тепловой энергетике [1, 2].

**2.8.4. АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ.** В целях унификации сохранена нумерация этапов расчета на статическую и циклическую прочность, принятая в других Нормах [1-3] и отраслевых комплексах.

Корректировка нестрогих формул [5]:

1) размахи напряжений ( $\Delta\sigma$ ) определяются не по ошибочной, в общем случае, формуле (5.12), а через внутреннее давление и силовые факторы, соответствующие переходу трубопровода из холодного состояния в рабочее (этап 3 в терминологии **АСТРА-НОВА**);

2) для “промежуточных” значений амплитуд условно-упругих напряжений  $[\sigma_{aF}]_i$  допускаемое число полных циклов  $[N]_i$  определяется как **min** ( $10^6$ ,  $[N]_i$ ), где  $[N]_i$  вычисляется по формулам (5.19) (углеродистые и легированные неаустенитные стали, **64,5 МПа** <  $[\sigma_{aF}]_i$  < **129 МПа**) или (5.21) для аустенитных сталей (**50,0 МПа** <  $[\sigma_{aF}]_i$  < **100 МПа**).

3) формула вычисления средних осевых напряжений от внутреннего давления, осевой силы и изгибающего момента (5.27) реализована как

$$\sigma_y = \sigma_{yp} + \sigma_{yn} \pm \sigma_{ym}$$

Введение расчета напряжений в косых стыках и переходах, а для подземных трубопроводов бесканальной прокладки – и учет компенсирующих подушек.

В дополнение к [5] – практически необходимые возможность расчета на сейсмические воздействия, на вибрацию и неустановившиеся динамические процессы.

**2.8.5. АСТРА-МАГИСТР.** Также сохранена нумерация этапов расчета на статическую и циклическую прочность, принятая в других Нормах [1-3] и отраслевых комплексах.

Реализована авторская доработка СНиПа [7], выполненная А.Б. Айнбиндером в части расчетной оценки прочности прямых труб и отводов. Формулы для расчета напряжений в тройниках и врезках, “ненормализованных” волнистых (линзовых и сильфонных) компенсаторах заимствованы из [3, 5] с некоторыми изменениями, обусловленными спецификой (“буквой”) СНиПа [7].

Обеспечиваются нормативно регламентированные виды динамических расчетов:

- на сейсмические воздействия (пп. 8.18–8.21, 8.53–8.61);
- на вибропрочность от пульсации давления (п.8.17, обвязочные трубопроводы КС и НПС);
- на динамические воздействия от поршней и других очистных устройств (п.8.17).

**2.8.6. АСТРА-СВД.** Также сохранена нумерация этапов расчета на статическую и циклическую прочность, принятая в других Нормх [1-3] и отраслевых комплексах.

Реализована возможность определения НДС и оценки прочности прямолинейных и криволинейных автофретированных труб в составе трубопроводной системы с учётом дополнительных (помимо внутреннего давления и температурного перепада по толщине стенки) нагрузок.

В дополнение к [11, 12] – практически необходимые возможность расчета на сейсмические воздействия, на вибрацию и неустановившиеся динамические процессы.

**2.8.7. АСТРА-СУДПРОМ.** Расчетные приведенные напряжения групп  $\sigma_{\theta}^p$ ,  $\sigma_{пр1}$ ,  $\sigma_{пр2}$ ,  $\sigma_a^*$  во всех расчетных сечениях участка (суперэлемента) и в тройниковых соединениях определяются по формулам [13] со следующими уточнениями:

1) Для высокотемпературных трубопроводов при определении допускаемого напряжения наряду с пределом прочности и текучести дополнительно используется предел длительной прочности, по аналогии с [1];

2) скорректирована формула определения коэффициента  $f_{\sigma}$  (п. 5.1.4.3): исправлен первое слагаемое в скобках, стало 2 вместо 1,2;

3) в формулах для вычисления компонент напряжений  $\sigma_{\theta}$  и  $\sigma_z$  для сечения Б-Б тройника в п. 6.3.5 вместо коэффициента перегрузки  $k_{\pi}$  используется коэффициент  $k_{\pi}^*$ ;

**2.9.** Проверка фланцевых соединений на герметичность выполняется по формуле (1) Приложения 3 РТМ 38.001-94 [3] по заданному рабочему давлению и вычисленным силовым факторам.

На фланцевые соединения трубопроводов, кроме внутреннего или наружного давления, действуют также осевая и перерезывающие силы, изгибающие и крутящий моменты, величины которых определяются из расчета напряженно-деформированного состояния трубопровода в целом. При выборе нормализованного фланцевого соединения указанные силовые факторы следует учитывать при определении условного давления, по которому выбираются нормализованные фланцы:

$$[P_y] \geq \frac{P + \frac{4}{3.14 \cdot G^2} \text{Max} \left\{ \left( N + \frac{4|M|}{G} \right); 0 \right\}}{A_T}, \text{ МПа}$$

где:

$$M = (M_x^2 + M_y^2)^{0.5},$$

$M_x$ ,  $M_y$  – изгибающие моменты, действующие в двух взаимно перпендикулярных плоскостях,

$N$  – осевая сила, действующая на фланцевое соединение:

– при растяжении принимается со знаком плюс;

– при сжатии – минус.

$G$  – эффективный диаметр прокладки:

1) для плоских прокладок шириной  $b < 15$  мм, а также для прокладок овального или восьмигранного сечения – средний диаметр прокладки;

2) для плоских прокладок с наружным диаметром  $D_n$  и шириной  $b > 15$  мм:

$$G = D_n - 3.87\sqrt{b}, \text{ мм}$$

$A_T$  – коэффициент, принимаемый для расчёта технологических трубопроводов по [3], в остальных случаях равен 1,

$D_n$  – наружный диаметр прокладки, мм

### 3. Расчетные модели трубопроводных систем

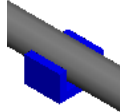

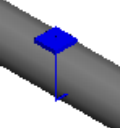

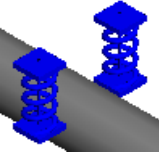

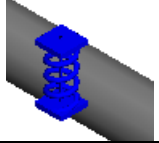

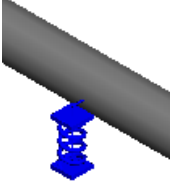
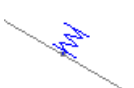
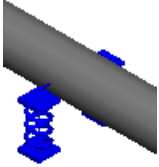

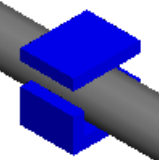

**3.1.** Произвольный разветвленный трубопровод, содержащий, в общем случае, тройниковые узлы, замкнутые петли, заземленные и консольные концы, рассматривается как пространственная стержневая система. Система состоит из пространственных неразветвленных суперэлементов (СЭ) – “участков”, каждый из которых набирается, в свою очередь, из прямо- и/или криволинейных стержневых элементов – “отрезков”. Суперэлементы соединяются в узлах суперэлементной модели (СЭМ); узлами СЭМ являются тройниковые узлы, консольные концы.

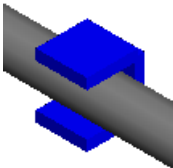

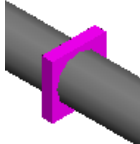

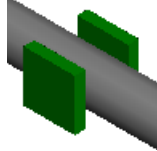



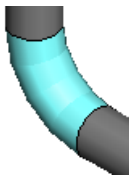

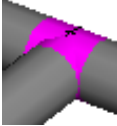
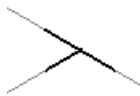
Нумерация внутренних (незаземленных) узлов СЭМ проводится произвольно, все заземленные узлы имеют номера, большие максимального номера внутреннего узла. Нумерация элементов (отрезков, сечений) проводится без “разрывов” от начального узла к конечному узлу СЭ. Суперэлемент полностью идентифицируется номерами начального и конечного узлов, а при наличии нескольких СЭ с одинаковыми номерами начального и конечного узлов – также его программно генерируемым порядковым номером. Для замкнутых суперэлементов-петель начальный и конечный узлы совпадают.

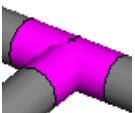
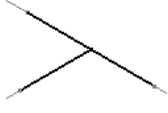
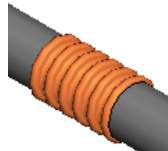
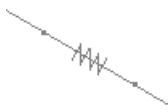
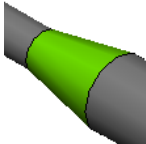

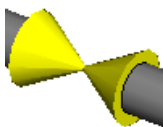

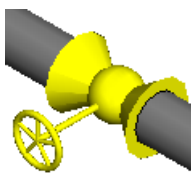

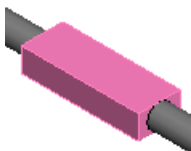

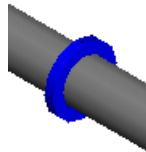

Основные элементы расчетной АСТРА-модели трубопроводной системы представлены ниже в таблице.

№	Изображение		Элемент АСТРА-модели	Описание/ примечание
	3D модель	осевая модель		
1.			Защемляющая опора (мертвая)	Ограничение всех линейных и угловых перемещений
2.			Неподвижная опора (неподвижный шарнир)	Ограничение всех линейных перемещений
3.			Опора скольжения / качения	Ограничение вертикальных перемещений



№	Изображение		Элемент АСТРА-модели	Описание/ примечание
	3D модель	осевая модель		
4.			Направляющая опора	Ограничение вертикальных и боковых перемещений
5.			Жесткая подвеска	Ограничение перемещений вертикально вниз
6.			Пружинная подвеска (ОСТ, МВН, “спецпружины” ВНИПИЭТ, LISEGA, постоянного усилия, пользователя)	Подвеска на одной тяге
				Подвеска, имеющая две или более тяг.
7.			Пружинная опора (ОСТ, пользователя)	Опора с одной тягой
				Опора с двумя и более тягами
8.			Опора общего вида	Конкретный вид опоры зависит от заданных характеристик опоры.

№	Изображение		Элемент АСТРА-модели	Описание/ примечание
	3D модель	осевая модель		
9.			Нестандартная опора	Учет односторонних связей по различным направлениям и зазоров.
10.			Амортизатор	Воспринимает <i>только динамические нагрузки</i>
11.			Демпфер	Рассеивает энергию колебаний, воспринимает <i>только динамические нагрузки</i>
12.			Прямая труба	3D-модель отражает реальный диаметр трубы
13.			Отвод (гиб, колено)	Выделяется от сечения начала вставки отвода до сечения его конца. Имеет сечение серединыгиба (вставляется программой автоматически)
14.			Тройник (сварной, с накладками, штампованный,...)	Выделяется цветом от узла до середины ближайшей детали

№	Изображение		Элемент АСТРА-модели	Описание/ примечание
	3D модель	осевая модель		
15.			Тройник как деталь (сварной, с накладками, штампованный,...)	Выделяется цветом от узла до начала примыкающих деталей детали
16.			Компенсатор (линзовый, сильфонный,...)	Количество гофров на изображении – условное
17.			Переход(ник) (концентрический, эксцентрический)	Размер (длина) изображения соответствует фактической длине перехода
18.			“Арматура” (клапан, вентиль, задвижка,...)	Размер (длина) изображения соответствует фактической длине арматуры
19.			“Арматура” с приводом (клапан, вентиль, задвижка,...)	Размеры изображения соответствуют длине арматуры и центру масс привода
20.			Элемент неколецевого (произвольного) сечения	Задается приведенными жесткостными характеристиками сечения
21.			Фланец	В любом сечении прямой трубы.

№	Изображение		Элемент АСТРА-модели	Описание/ примечание
	3D модель	осевая модель		
22.			Днище/крышка	Можно установить только в консольных узлах
23.			“Жесткий элемент” (вставка)	Обеспечивает абсолютно жесткую невесомую связь между сечениями

Некоторые из этих элементов-деталей в составе фрагмента АСТРА-модели характерной пространственной разветвленной трубопроводной системы показаны ниже на рис. 3.1.

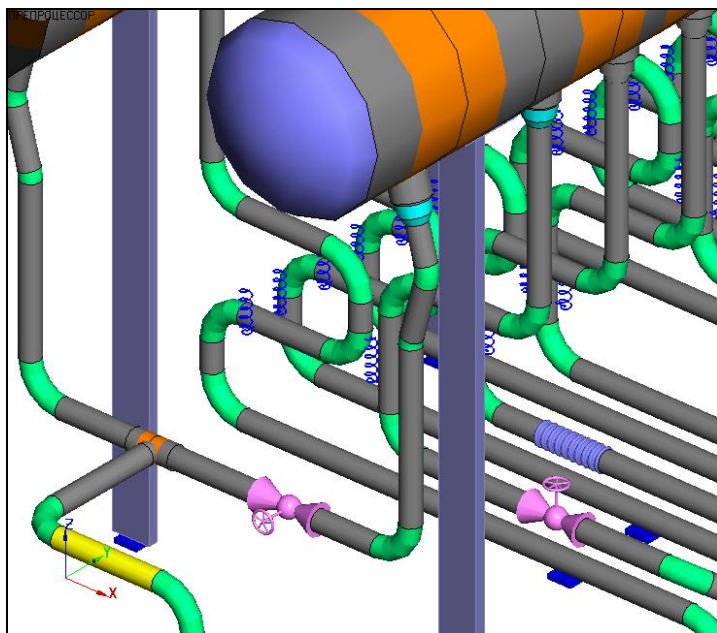


Рис. 3.1 Элементы трубопровода в составе АСТРА-модели ТС (фрагмент)

**3.2.** Пружинные подвески и растяжки, жесткие тяги, опоры скольжения, мёртвые, неподвижные, катковые и направляющие опоры, пружинные опоры, нестнадартные опоры, сейсмо- и виброамортизаторы, демпферы моделируются линейно-упругими связями, приложенными в соответствующих узлах и сечениях суперэлементов, действующих в требуемых направлениях (глобальных  $X_1, X_2, X_3$  или локальных  $x'_1, x'_2, x'_3$ ) и обладающих заданными и/или вычисленными жесткостями. Для вязкоупругих демпферов дополнительно задаются линейные и угловые коэффициенты демпфирования (вязкости) по соответствующим направлениям осей.

Рассматриваются эффекты трения в опорных конструкциях (трение скольжения и трение качения по модели Кулона) при статических и температурных перемещениях “низкотемпературного” (в настоящей версии – и “высокотемпературного”) трубопровода.

**3.3.** Линзовые, сильфонные и сальниковые компенсаторы, арматура и оборудование, а также сложные опорные конструкции, включаемые в расчетную модель трубопроводной системы, идеализируются:

1) стержневыми элементами, имеющими заданные жесткостные характеристики растяжения-сжатия, изгиба, кручения и сдвига, инерционные (массовые) характеристики и нагрузки;

В частности, алгоритм учета “штока” (привода) арматуры следует известным соотношениям теоретической механики:

*статические расчеты (АСТРА-СТАЦ)*

$$G = G^{\text{арм}} + G^{\text{шток}},$$

$$M_x = -G^{\text{шток}} \cdot y,$$

$$M_y = G^{\text{шток}} \cdot x,$$

*динамические расчеты (АСТРА-ФОРМ, АСТРА-СЕЙСМ, АСТРА-ВИБР, АСТРА-ДИН)*

$$M_{x,y,z} = M^{\text{арм}} + M^{\text{шток}},$$

$$I_x = M^{\text{шток}} (y^2 + z^2),$$

$$I_y = M^{\text{шток}} (x^2 + z^2),$$

$$I_z = M^{\text{шток}} (x^2 + y^2),$$

где:

$x, y, z$  – заданные пользователем декартовы координаты центра масс “штока”-привода относительно центрального сечения арматуры (на оси трубы),

$G^{\text{арм}}$  – заданный вес арматуры (без учета веса “штока”),

$G^{\text{шток}}$  – заданный вес “штока”-привода,

$M_x$  – приведенный изгибающий момент от “штока” относительно глобальной оси X,

$M_y$  – приведенный изгибающий момент от “штока” относительно глобальной оси Y,

$M^{\text{арм}} = G^{\text{арм}}/g$  – масса арматуры без “штока”,

$M^{\text{шток}} = G^{\text{шток}}/g$  – масса “штока”-привода,

$M_{x,y,z}$  – суммарные массы, приведенные к центральному сечению арматуры,

$I_{x,y,z}$  – массовые моменты инерции, приведенные к центральному сечению арматуры.

2) суперэлементами с матрицами жесткости, масс и нагрузок, определенными из расчетов упомянутых подсистем методом конечных элементов по пространственным оболочечным, трехмерным и комбинированным схемам.

**3.4.** Повышенная стержневая податливость *криволинейных труб* (“эффект Кармана”) программно определяется по асимптотической методике [15, 8] с учетом влияния присоединенных прямых труб, внутреннего давления и других факторов.

Коэффициенты повышенной податливости (пониженной жесткости) *тонкостенных ортогональных сварных тройников* определяется для трех угловых степеней свободы (два изгибающих и крутящий моменты) согласно методике РТМ 38.001-94 [3] и ASME [16]:

Коэффициенты линейной  $s_{x1}, s_{x2}, s_{x3}$  и угловой  $s_{\alpha}, s_{\beta}, s_{\gamma}$  жесткости *штуцерных узлов оборудования* (в частности, и для произвольных тройниковых соединений) могут задаваться пользователем:

- явно, на основе известных аналогов или предварительного трехмерного конечноэлементного анализа фрагментов “штуцер-обечайка”;

- автоматизированно, с помощью специального “калькулятора”, реализующего положения и формулы ряда нормативных документов [3, 8, 70-72] (см. также Приложение 4).

**3.5.** Погонная масса динамической суперэлементной модели (с учетом массы теплоизоляции и рабочей среды) сосредотачивается во всех узлах и в ряде сечений суперэлементов, выбираемых из условия представительной аппроксимации необходимого числа форм собственных и (или) вынужденных колебаний трубопровода. Кроме того, сосредоточенные массы располагаются в местах установки (центрах масс) массивного оборудования и арматуры, а также в местах действия динамических кинематических и силовых нагрузок, возбуждающих вибрации (средние сечения отводов, косые стыки, переходники, тройники и врезки, опоры с неплатформенным кинематическим возбуждением и др.).

**3.6.** Система действующих и учитываемых нагрузок и воздействий на *станционные, надземные и подземные в каналах (на опорах) трубопроводы* включает:

- квазистатическое равномерное внутреннее или внешнее давление  $p$ ;

- квазистатическую кусочно-постоянную погонную весовую нагрузку  $q_3$  (продукт+труба+изоляция и, возможно, снеговая и гололедная) и погонные нагрузки по двум горизонтальным осям  $q_1, q_2$  (ветер, статический эквивалент инерционной нагрузки);

- квазистатический кусочно-постоянный погонный температурный момент, действующий на горизонтальных участках труб с неравномерным нагревом по высоте сечения (например, участки со стратифицированным течением);

- квазистатические сосредоточенные в узлах и сечениях СЭ-модели силы и моменты (ими можно моделировать статическое влияние оборудования, арматуры, опор, отброшенных ветвей трубопровода и др.).
- квазистационарный перепад средней температуры стенки трубопровода при переходе из “холодного” состояния в “рабочее”;
- квазистационарный перепад температур по толщине стенки трубопровода в рабочем состоянии;
- заданные вынужденные линейные и угловые перемещения заземленных концов (узлов) и сечений (как правило, так имитируются температурные перемещения присоединенного оборудования, жестких коллекторов и других систем, не включенных в расчетную модель), а также промежуточных опор и точек подвесок пружин и жестких тяг;
- монтажная растяжка в заданных сечениях;
- сейсмические воздействия, задаваемые в виде либо трехкомпонентных спектров ускорений, либо трехкомпонентных акселерограмм для отметок крепления трубопровода (“платформенная” схема возбуждения) – *АСТРА-СЕЙСМ* (рис. 3.2 и рис.3.3);
- возбуждающие установившиеся вибрации - полигармонические силовые нагрузки, задаваемые в произвольных сечениях в виде набора амплитуд (сил или давления), частот и сдвига фаз воздействий – *АСТРА-ВИБР*;
- возбуждающие динамические нагрузки для произвольных сечений, задаваемые в виде зависимостей сосредоточенных сил (проекции или модуль) или давления от времени – *АСТРА-ДИН*.

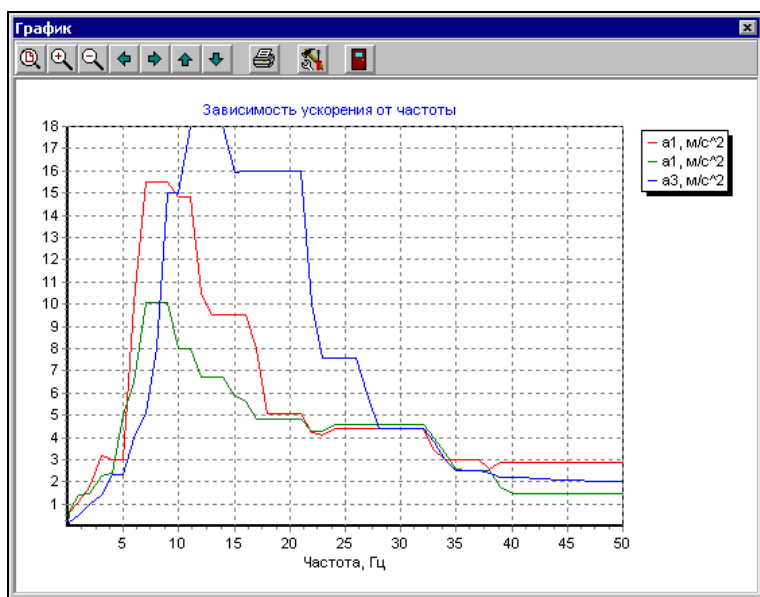


Рис. 3.2 Трехкомпонентный спектр сейсмических ускорений

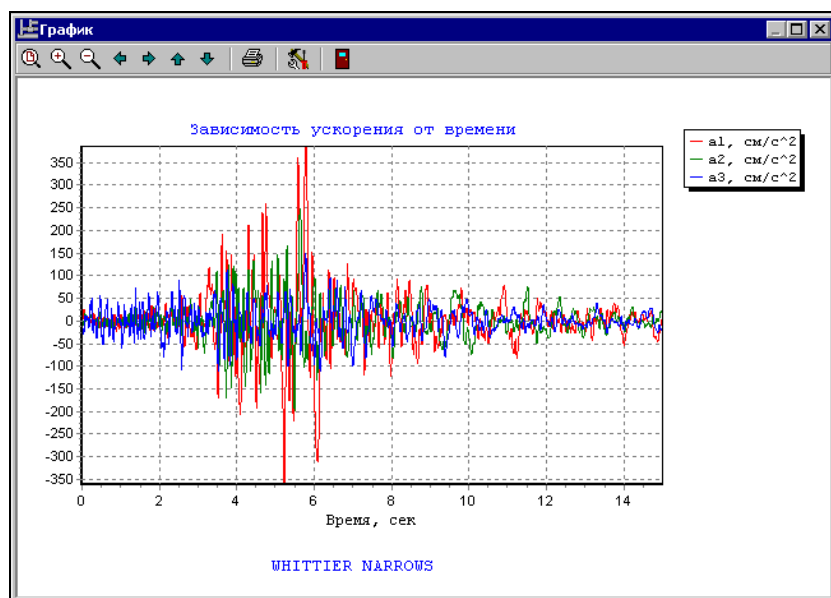


Рис. 3.3 Трехкомпонентная акселерограмма сейсмического воздействия



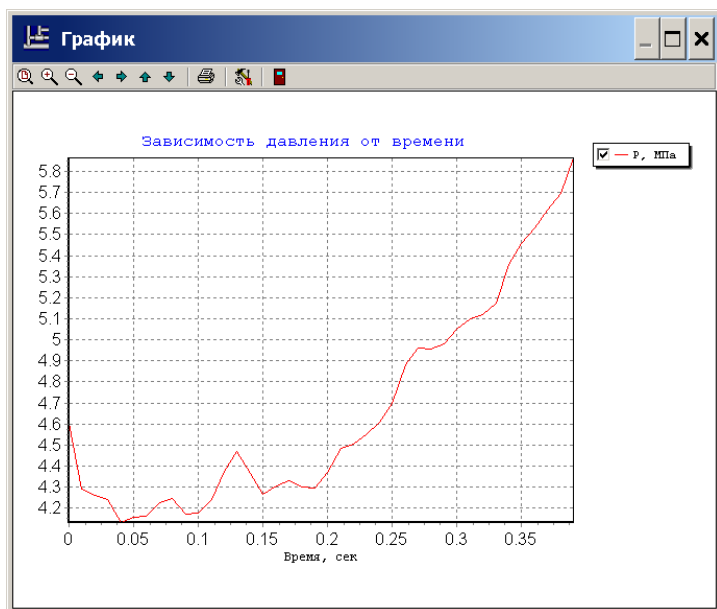


Рис. 3.4 Динамическое давление

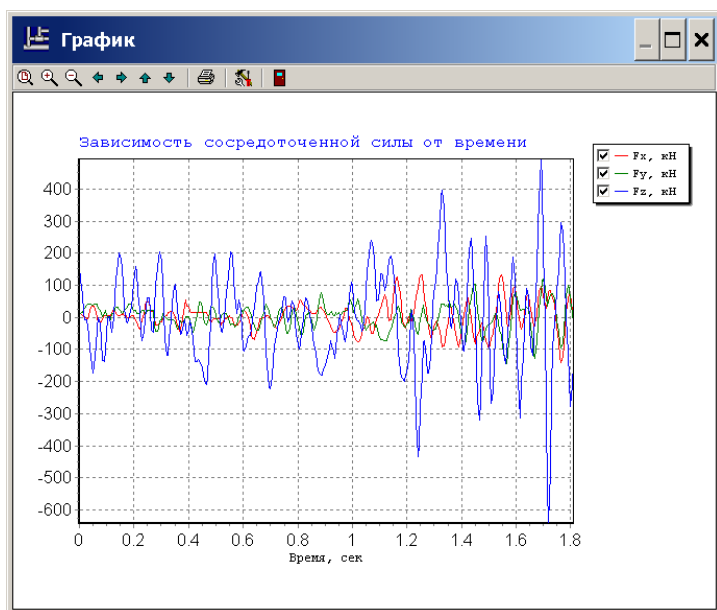


Рис. 3.5 Проекции сосредоточенной динамической силы

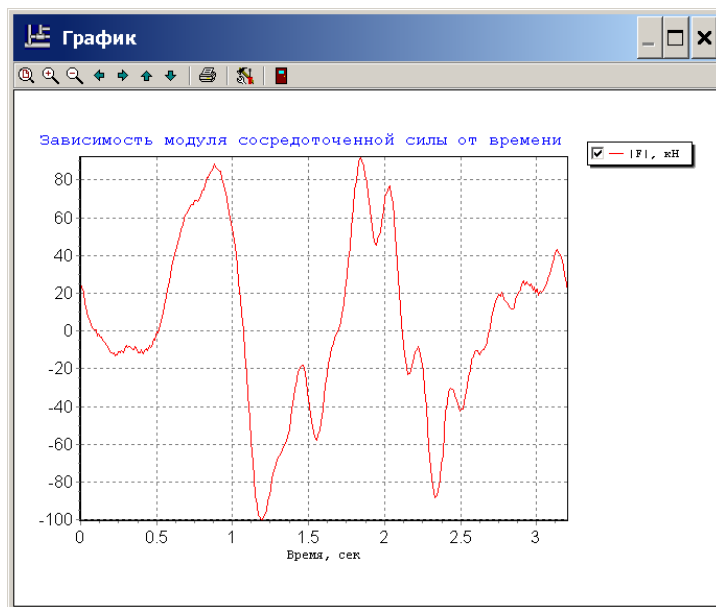


Рис. 3.6 Модуль вектора сосредоточенных сил

– давление автофретирования;

На подземные (бесканальной прокладки) и наземные (в насыпи) трубопроводы дополнительно действуют нагрузки, обусловленные взаимодействием с грунтом (вес и давление грунта, трение о грунт, транспортные – от подвижного состава).

**3.7.** Расчетная пространственная стержневая модель строится исходя из условия представительной аппроксимации реальной геометрии, нагрузок и НДС трубопроводной системы при, по возможности, минимизации числа узлов, суперэлементов, элементов и сечений приведения масс.

Расчетные сечения суперэлементов должны отслеживать его пространственную конфигурацию (начальные и конечные сечения криволинейных элементов, сечения перегибов), изменения геометрических характеристик сечения (диаметров, толщин, прибавок), физико-механических свойств (модуля упругости, коэффициента Пуассона и др.) и параметров распределенных нагрузок (погонная масса, температура, давление), быть приурочены к местам приложения связей (пружинные подвески и растяжки, опоры скольжения, направляющие и катковые опоры, сейсмо- и виброопоры, демпферы), сосредоточенных нагрузок и установки фланцев, к сечениям, для которых выполняется монтажная растяжка и/или заданы вынужденные перемещения, дополнительные напряжения, а для подземных участков трубопроводов – и к зонам изменения характеристик изоляции, компенсирующих подушек и грунта.

Кроме того, вводится такое количество расчетных сечений на “длинных” ( $L > 5 + 10D$ ) прямолинейных элементах, которое может обеспечить удовлетворительную аппроксимацию распределения и максимальных уровней стационарных и (или) динамических перемещений и напряжений. В частности, должно быть задано по крайней мере одно сечение в середине каждого “длинного” элемента.

Для подземных участков трубопроводов дополнительным (по умолчанию – программно реализуемым) является требование достаточно равномерного расположения сечений по длине, имея в виду достаточно подробное и хорошо вычислительно обусловленное моделирование взаимодействия системы “труба-изоляция-подушки” с грунтом засыпки и основания.

**3.8.** Выбор сечений приведения масс для суперэлементной модели (помимо “обязательных” – узлов модели и сечений действия динамических нагрузок) определяется из приближенного анализа “парциальных” собственных частот ветвей трубопроводной системы: количество таких сечений в  $i$ -м суперэлементе должно быть равно:

$$n_i = (L_n - 3N) \frac{\sum_{m=1}^3 \frac{1}{\omega_{im}^*}}{\sum_{k=1}^I \sum_{m=1}^3 \frac{1}{\omega_{km}^*}}$$

где:

$L_n$  – максимально допустимое число динамических степеней свободы СЭМ (в данной версии,  $L_n = 60000$ ),

$N$  – общее число узлов СЭМ,

$I$  – число суперэлементов,

$\omega_{im}^*$  – приближенная низшая собственная частота  $i$ -го суперэлемента при преимущественном перемещении по оси  $X_m$  ( $m=1,2,3$ ), которая определяется как:

$$\omega_{im}^* = \sqrt{\frac{3E^T D^3 s}{2l_{im}^3}} \sqrt{\frac{1}{ml_{im} + \sum_p M_p}}$$

Здесь:

$l_{im}$  – “приведенная” изгибная длина суперэлемента,

$m$  – погонная масса трубы,

$M_p$  – сосредоточенная масса.

Если  $n_i \ll I$ , то масса не размещается на данном суперэлементе. Если  $n_i \in (0,5; 1)$ , то вводится одно сечение с массой (за счет суперэлементов, где  $n_i \gg I$ ).

**3.9.** Для подземных трубопроводов бесканальной прокладки (теплосети), подземных и наземных (в насыпи) магистральных трубопроводов изоляция, компенсирующие подушки (при их наличии) и грунт моделируются распределенными по длине опорами, жесткость которых (коэффициенты постели) нелинейно зависит от величины и направления перемещений [35, 48, 51]. При этом сетка вынужденно сгущается до следующих характерных расстояний между сечениями (с “грунтовыми псевдоопорами”): (2–4)  $D$  – на прямолинейных участках, (0,2–1,0)  $D$  – в зонах отводов, косых стыков, тройников, опор и выходов из грунта.

**3.10.** В подсистеме уточненного расчета температурного и напряженно-деформированного состояний, оценки прочности деталей трубопроводов (АСТРА-СТАДИО) реализована автоматическая генерация оптимальных по точности пространственно-оболочечных (для тонко- и “среднестенных” элементов) и объемных (для средне- и толстостенных деталей и системы “трубопровод-изоляция-грунт”) расчетных конечноэлементных моделей.

Основные реализованные гипотезы: изотропия и линейная упругость металла (физическая линейность) и малость деформаций-перемещений (геометрическая линейность). Для грунта (подземные трубопроводы) принята физически нелинейная реологическая модель энергетического типа, зарекомендовавшая себя при численном моделировании трехмерных систем “основание-сооружение” [10].

## 4. Вычислительные алгоритмы

**4.1.** В модуле *АСТРА-ДЕТАЛЬ* реализованы нормативные [1-12] алгоритмы расчета по выбору основных размеров деталей трубопровода, в двух вариантах:

1) расчёт минимальной толщины стенки деталей по наружному диаметру  $D_n$  – расчёт минимальной толщины стенки деталей трубопровода, исходя из заданных пользователем расчётных параметров; При этом непосредственно определяются номинальные толщины стенок деталей трубопровода и площади сечения дополнительных укрепляющих элементов тройниковых соединений.

2) выбор деталей с минимальной толщиной стенки из сортамента по условному диаметру  $D_y$ . В этом случае по сортаменту выбираются детали с подходящим условным диаметром, определяется их наружный диаметр. Затем, для каждого наружного диаметра вычисляется требуемая номинальная толщина стенки и сравнивается с толщиной стенки соответствующих деталей из сортамента, после чего выбирается деталь с минимально возможной для вычисленного диаметра толщиной стенки.

**4.2.** В модулях *АСТРА-СТАЦ*, *-ФОРМ*, *-СЕЙСМ*, *-ВИБР* и *-ДИН* реализован алгоритм расчета произвольных разветвленных и протяженных трубопроводных систем (определение перемещений, нагрузок на опоры и усилий в сечениях) как линейно-упругих пространственных многократно статически неопределимых стержневых систем, изложенный в **РТМ 108.020.01-75** [15] (см. также Приложение 2) и модернизированный для:

1) повышения точности и вычислительной эффективности для сильно разветвленных, протяженных и (или) контрастных по жесткости систем;

2) учета нагрузок и опор не только в сечениях суперэлементов (участков), но и в узлах соединения суперэлементов;

3) учета повышенной оболочечной податливости тройниковых соединений и врезок трубопроводов в оборудование;

4) учета стержневых элементов произвольного (некольцевого) сечения для моделирования сложных опорных конструкций и оборудования в составе трубопроводных систем;

5) учета трения скольжения и качения в опорных конструкциях, возможного отрыва трубопроводов от них (для односторонних по вертикали опор), опор с зазорами;

6) учета совместной нелинейной работы системы “труба-изоляция-грунт” подземных трубопроводов бесканальной прокладки (теплосети), подземных и наземных (в насыпи) магистральных трубопроводов;

7) расчета собственных частот и форм колебаний;

8) расчета на сейсмические, вибрационные и динамические воздействия;

9) формирования и учета т.н. матричных суперэлементов (редуцированных матриц жесткости, масс и нагрузок – Крейга-Бемптона).

Алгоритм сочетает суперэлементный подход метода перемещений (см. п. 4.13) с методами начальных параметров и прогонки (для каждого неразветвленного суперэлемента), реализует спектральный подход (разложение по значимым

собственным формам колебаний, определяемым из решения частичной проблемы собственных значений) и прямые методы динамического анализа, использует эффективные шагово-итерационные процедуры решения нелинейных задач.

Значительная часть реализованных численных методов, схем и программ полностью или с необходимыми модификациями заимствована из “материнского” универсального конечно- и суперэлементного комплекса программ **СТАДИО** [74], с помощью которого решены разнообразные, в том числе плохо обусловленные статические и динамические задачи “сверх”большой размерности для пространственных систем, существенно более сложных (плитно-оболочечно-стержневых, трехмерных и комбинированных), чем трубопроводные (стержневые).

**4.3.** Предусмотрен режим статического расчета (**АСТРА-СТАЦ**) с автоматическим выбором характеристик пружин сортовентов ОСТ, МВН и “спецпружины” ВНИПИЭТ, проводимым итерационным путем в соответствии с рекомендациями **РТМ 24.038.12-72** [17], и пружин LISEGA [33]. Сходимость процесса (как правило, задается критерий не более чем 35%-го отличия нагрузок на пружины в “рабочем” и “холодном” состояниях) достигается в большинстве случаев за 2-4 итерации.

При определении характеристик “специальных” пружин учитываются также удлинения тяг и изменение термомеханических характеристик пружин при нагреве.

Также реализован учет т.н. “пружины постоянного усилия”, обеспечивающих заданные нагрузки на трубопровод (пружину) для всех значимых режимов-этапов эксплуатации, включая рабочее, холодное и испытаний (при незаклинённых пружинах).

Предусмотрена возможность учета наклона тяг пружинных подвесок (упругих опор) и жестких подвесок (тяг), возникающего при температурных перемещениях трубопровода; для этого должны задаваться рабочие длины тяг подвесок.

**4.4. Трение** скольжения и(или) качения в опорных конструкциях учитывается в рамках модели Кулона по двум альтернативным методикам (**АСТРА-СТАЦ**).

По методике **НПО ЦКТИ** [80] трение учитывается при переходе из рабочего состояния в холодное (этап 3). В рабочем состоянии трубопровода (этап 2) к действующим квазистационарным нагрузкам (вес, давление, температура и др.) добавляются силы трения, определенные на этапе 3.

По методике института “**Гипрокаучук**” [83] трение учитывается при действии на трубопровод всех нагружающих факторов отдельно в рабочем (этап 2) и холодном (этап 4) состояниях. Переход из рабочего состояния в холодное (размахи перемещений и напряжений, этап 3) определяется как разница между одноименными факторами этапов 2 и 4.

В обеих методиках трение моделируется эквивалентными упругими связями, жесткость которых вычисляется в итерационном процессе. Критерием сходимости принято равенство (с относительной точностью до 0.1%) произведения упомянутой жесткости на соответствующую компоненту

перемещений силе трения, т.е. произведению вычисляемой нормальной реакции на заданный коэффициент трения  $f$ .

Для ускорения сходимости предусмотрен ряд вычислительных процедур, в частности, адаптивная итерационная схема (число итераций колеблется, как правило, в интервале  $10 \div 20$  для “простых” трубопроводов с малым числом таких опор до  $50 \div 200$  для сложных систем с большим числом опор трения).

Учет трения на этапе испытаний (при заклиненных и распущенных пружинах) реализуется по методике института “Гипрокаучук” [83].

По аналогичной итерационной процедуре учитывается возможный **отрыв** трубопровода от односторонних опор (на соответствующих этапах вертикальная жесткость таких опор программно обнуляется).

Сочетание двух итерационных процессов для односторонних опор трения может существенно увеличить число итераций, а для некоторых нерациональных расстановок (с инженерной точки зрения) даже сделать невозможной сходимость с заданной точностью.

**4.5.** “Условные” жесткости пружинных подвесок (на этапе 1 расчета с выбором пружин), жесткости “абсолютно” жестких опорных конструкций, пружинных опор и жестких подвесок (тяг) вычисляются автоматически, исходя из 2-х критериев:

- 1) обеспечение исчезающе малых перемещений по направлениям установки опор;
- 2) предотвращение чрезмерных “контрастов” в жесткостях, ведущих к ухудшению вычислительной обусловленности системы.

В соответствии с этими критериями и с вычислительными экспериментами величина жесткости определяется в программах как:

$$10^4 \max \left\{ \left( \frac{D}{l} \right)^3 sE, \frac{D}{l} sE \right\}$$

где:

$E$  – модуль упругости материала трубы,

$D$  – наружный диаметр трубы,

$s$  – толщина стенки трубы,

$l = 0,5(l_{i-1} + l_i)$  – характерная длина оси,

$l_{i-1}, l_i$  – длины пролетов (расстояния до соседних опор) с одной и с другой стороны от данной опоры.

**4.6.** Решение результирующей алгебраической системы уравнений равновесия суперэлементной модели (определение вектора перемещений в узлах  $\{U\}$ ) проводится для статических задач (**АСТРА-СТАЦ**) и при определении матриц податливости (**АСТРА-ФОРМ**, см.п.4.7) по схеме квадратного корня (Холецкого) с учетом положительной определенности, симметричности, блочности и разреженности матрицы жесткости  $[K]$ :

$$\begin{aligned}[K] &= [L]^T [L], \\ [L]^T \{Z\} &= \{F\}, \\ [L]\{U\} &= \{Z\},\end{aligned}$$

где  $\{F\}$  – вектор нагрузок системы. Коэффициенты матрицы  $[K]$  и треугольной матрицы-фактора  $[L]$  вычисляются с двойной точностью. Предусмотрен режим анализа точности полученного решения и его итерационного уточнения.

**4.7.** Значимые собственные частоты  $\omega_i$  (в задаваемом диапазоне динамического воздействия  $\Omega_1 \leq \omega \leq \Omega_2$  или заданное количество **KI** низших) и соответствующие им формы  $\{\varphi\}_i$  колебаний расчетной динамической модели определяются из решения частной (частичной) линейной алгебраической задачи о собственных значениях:

$$[\Phi] = [\omega_i^2 - \theta^2] \Lambda [M] [\Phi]$$

где  $[\Phi] = [\{\varphi\}_j, \{\varphi\}_{j+1}, \{\varphi\}_{j+KI-1}]$  – матрица **KI** значимых собственных форм,  $\theta^2 = (\Omega_1^2 + \Omega_2^2)/2$  – задаваемый сдвиг спектра, – матрица податливости для динамических степеней свободы,  $[M]$  – матрица масс (динамических степеней свободы).

Решение частной проблемы собственных значений проводится в программе **АСТРА-ФОРМ** (результаты используются программами **АСТРА-СЕЙСМ**, **АСТРА-ВИБР** и **АСТРА-ДИН** при расчётах методом разложения по собственным формам) эффективным блочным методом Ланцоша [45], позволяющим определять все частоты и формы колебаний произвольных разветвленных и протяженных систем (в частности, кратные и близкие к кратным).

Матрица жесткости системы  $[K]$  может учитывать характеристики опор в 2-х вариантах:

- 1) жесткости *двусторонних опор без трения* (формально строгий подход, отвечающий ограничениям спектральной динамической методики);
- 2) жесткости *односторонних опор с трением*, определенные из статического расчета (**АСТРА-СТАЦ**) – оригинальный инженерный прием авторов ПК.

**4.8.** Расчет линейно-упругого трубопровода на сейсмические воздействия, заданные трехкомпонентными спектрами ответа (ускорений)  $\{a(\omega)\}_{1,2,3}$ , проводится по “линейно-спектральному методу” (ЛСМ) реализованному в программе **АСТРА-СЕЙСМ** в следующей последовательности.

**4.8.1.** Для каждой  $i$ -й учитываемой собственной формы колебаний  $\{\varphi_i\}$



( $i=1,2, \dots, KI$ ) определяется максимальная сейсмическая нагрузка на трубопровод

$$\{S\}_i = [M]\{\varphi\}_i \frac{\{\varphi\}_i^T [M] \{\cos(\bar{a}, \bar{x})\}}{\{\varphi\}_i^T [M] \{\varphi\}_i} a\{\omega_i\}$$

где:  $\cos(\bar{a}, \bar{x})$  – вектор направляющих косинусов сейсмического воздействия,

$a(\omega_i)$  – величина (ордината) спектра ответа для собственной частоты  $\omega_i$ .

В общем случае задания трех спектров ответа  $a_1(\omega)$ ,  $a_2(\omega)$ ,  $a_3(\omega)$  по трем взаимно перпендикулярным направлениям

$$\{S\}_i = [M]\{\varphi\}_i \frac{\{\varphi\}_i^T [M] \sum_{j=1}^3 \{\cos(\bar{a}_j, \bar{x})\} a_j(\omega_i)}{\{\varphi\}_i^T [M] \{\varphi\}_i}$$

**4.8.2.** Для каждой  $i$ -й учитываемой собственной формы определяются сейсмические перемещения  $\{U_s\}_i$  и внутренние силовые факторы  $\{N_s\}_i$  во всех расчетных сечениях, нагрузки на опоры и оборудование  $\{P_s\}_i$  от статического приложения сейсмических нагрузок  $\{S\}_i$  (п.4.8.1).

**4.8.3.** Определяются расчетные величины сейсмических перемещений  $\{\bar{U}_s\}$ , внутренних усилий  $\{\bar{N}_s\}$  и нагрузок на опоры и оборудование  $\{\bar{P}_s\}$

$$\{\bar{U}_s\} = \left( \sum_{i=1}^{KI} \{U_s\}_i^2 \right)^{1/2};$$

$$\{\bar{N}_s\} = \left( \sum_{i=1}^{KI} \{N_s\}_i^2 \right)^{1/2};$$

$$\{\bar{P}_s\} = \left( \sum_{i=1}^{KI} \{P_s\}_i^2 \right)^{1/2};$$

а через внутренние усилия  $\{\bar{N}_s\}$  – приведенные сейсмические напряжения  $\{\sigma_s\}$  во всех элементах (сечениях) трубопровода.

**4.8.4.** Сейсмические ускорения для всех сечений расположения динамических степеней свободы (в том числе, и для сечений арматуры) определяются в рамках линейно-спектрального расчета по следующей вычислительной процедуре.

а) для каждой  $i$ -й учитываемой собственной формы колебаний  $\{\varphi\}_i$  ( $i=1,2, \dots, KI$ ) определяются максимальные сейсмические ускорения в сечениях с

динамическими степенями свободы [12–20]

$$\{A\}_i = \{\varphi\}_i \frac{\{M\} \sum_{j=1}^3 \{\cos(\bar{a}_j, \bar{x})\} a_j(\omega_i)}{\{\varphi\}_i^T \{M\} \{\varphi\}_i}$$

где  $\cos(\bar{a}, \bar{x})$  – вектор направляющих косинусов сейсмического воздействия,

$a(\omega_i)$  – величина (ордината) спектра ответа для собственной частоты  $\omega_i$ .

б) определяются “итоговые” расчетные величины сейсмических ускорений  $\{A_s\}_i$

$$\{\bar{A}_s\} = \left( \sum_{i=1}^{KI} \{A_s\}_i^2 \right)^{1/2}$$

**4.8.5.** Дополнительные, регламентированные новой редакцией нормативных документов возможности сейсмического расчета – учет “потерянной” массы по высшим собственным формам, соответствующим частотам выше 33 Гц.

Алгоритм, реализованный в актуальном программном модуле АСТРА-СЕЙСМ, сводится к определению дополнительной квазистатической нагрузки  $\{S^*\}$ , учитывающей вклад всех неучтенных высших собственных форм колебаний ( $f_i > \omega^* = 33 \text{ Гц}$ ):

$$\{S^*\} = [M] \{\eta^*\} a(\omega^*),$$

где:

$$\{\eta^*\} = \{I\} - \sum_{i=1}^{KI} \{\eta\}_i, \quad \{\eta\}_i = \{\varphi\}_i \frac{\{\varphi\}_i^T [M] \{\cos(\bar{a}, \bar{x})\}}{\{\varphi\}_i^T [M] \{\varphi\}_i}$$

и вызванных ею перемещений, нагрузок на опоры, усилий и напряжений в сечениях и элементах трубопровода [23].

**4.8.6.** Три расчетные компоненты спектра ускорений  $a_i$  могут быть не только явно заданы пользователем (или выбраны им из базы сейсмоз воздействий), но и определены по заданной трехкомпонентной акселерограмме численным интегрированием по времени (с использованием безусловно устойчивой разностной схемы) уравнений колебаний линейных осцилляторов с представительным набором собственных частот  $\omega_k$  ( $k = 1, 2, \dots$ ) при уровне демпфирования  $\xi = \text{const}$  (по умолчанию, в соответствии с нормативными положениями для трубопроводов,  $\xi = 0,02$ ):

$$\ddot{u}_i(t) + 2\xi\omega_k\dot{u}_i(t) + \omega_k^2 u_i(t) = -\ddot{q}_i(t)$$

$$a_i(\omega_k) = \max_{t_k} \{\ddot{u}_i(t) + \ddot{q}_i(t)\}$$

$\ddot{q}_i(t)$  -  $i$ -я компонента акселерограммы.

**4.9.** Динамический расчет трубопроводов с линейно-упругими связями по “платформенной схеме” на сейсмические воздействия, заданные ответными акселерограммами  $\{a(t)\}_{1,2,3}$ , выполняется в модуле **АСТРА-СЕЙСМ** по двум алгоритмам: спектральным методом с разложением по собственным формам колебаний или методом прямого интегрирования уравнений движения по неявной разностной схеме Ньюмарка.

**4.9.1.** При расчёте спектральным методом с разложением по собственным формам колебаний по схемам Дюамеля или центральных разностей (по выбору пользователя) [34] интегрируется по времени **KI** уравнений движения в “нормальных координатах”  $Z_i(t)$ :

$$\{U(t)\} = \sum_{i=1}^{KI} Z_i(t) \{\varphi\}_i ;$$

$$Z_i(t) + 2\xi_i \omega_i Z_i(t) + \omega_i^2 Z_i(t) = \frac{\{\varphi\}_i^T [M] \{a(t)\}}{\{\varphi\}_i^T [M] \{\varphi\}_i} ;$$

где:  $i=1,2,..., KI$ ,

$\{a(t)\}$  – вектор заданных (в общем случае – трех) компонент акселерограмм,

$\xi_i$  – коэффициент демпфирования в долях от критического (при отсутствии экспериментальных данных принимается  $\xi_i = 0,02$  [1]). Демпферы (вязко-упругие опоры) в расчёте не учитываются.

**4.9.2.** При расчёте методом прямого интегрирования по неявной разностной схеме Ньюмарка [85] решается уравнение движения в матричной форме относительно динамических степеней свободы

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\}$$

где:

$[M]$  – матрица масс (инерции), диагональная;

$[C]$  – матрица демпфирования;

$[K]$  – матрица жёсткости;

$\{F(t)\}$  – вектор динамических нагрузок;

$\{\ddot{u}\} = \{\ddot{u}(t)\}$  – искомый вектор ускорений;

$\{\dot{u}\} = \{\dot{u}(t)\}$  – искомый вектор скоростей;

$\{u\} = \{u(t)\}$  – искомый вектор перемещений.

В случае учета акселерограммы землетрясения  $a(t)$  для платформенной схемы возбуждения вектор  $\{F(t)\}$  содержит эффективную инерционную сейсмическую нагрузку  $-[M]\{a(t)\}$ .

Матрица демпфирования системы пропорциональна массе и жёсткости системы (модель Релея):

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K]$$

где:

$\alpha$  – коэффициент пропорциональности массы,  $c^{-1}$ ;

$\beta$  – коэффициент пропорциональности жёсткости  $c$ .

В случае наличия сосредоточенных демпферов в системе, матрица демпфирования дополняется матрицей сосредоточенных демпферов

$$[C] = [C] + [C_{оп}]$$

$[C_{оп}]$  – диагональная матрица демпфирования, соответствующая сосредоточенным демпферам по динамическим степеням свободы

Уравнение движения и матрица демпфирования домножаются на матрицу податливости  $[A]$  (обратную матрице жёсткости  $[K]$ ). Тогда

$$\begin{aligned} [\tilde{M}]\{\ddot{u}\} + [\tilde{C}]\{\dot{u}\} + [\tilde{K}]\{u\} &= \{\tilde{F}(t)\} \\ [\tilde{C}] &= \alpha[\tilde{M}] + \beta[\tilde{K}] + [\tilde{C}_{оп}], \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} [\tilde{M}] &= [A][M]; [\tilde{C}] = [A][C]; [\tilde{K}] = [A][K] = [E]; [\tilde{C}_{оп}] = [A][C_{оп}]; \\ \{\tilde{F}(t)\} &= [A]\{F(t)\}, \end{aligned}$$

$[E]$  – единичная матрица.

Ниже изложен реализованный алгоритм неявной разностной схемы Ньюмарка для прямого пошагового интегрирования уравнений движения.

Начальные условия в момент времени  $t_0$

$$\{ {}^{t_0}u \}; \{ {}^{t_0}\dot{u} \}; \{ {}^{t_0}\ddot{u} \}$$

На каждом шаге  $t + \Delta t$  по времени вычисляется эффективная нагрузка

$$\begin{aligned} [{}^{t+\Delta t}\hat{F}] &= [{}^{t+\Delta t}\bar{F}] + \\ + [\tilde{M}](a_0\{ {}^tu \} + a_2\{ {}^t\ddot{u} \} + a_3\{ {}^t\ddot{\ddot{u}} \}) &+ [\tilde{C}](a_1\{ {}^tu \} + a_4\{ {}^t\dot{u} \} + a_5\{ {}^t\ddot{u} \}) \end{aligned}$$

Перемещения на шаге  $t + \Delta t$  получаются из решения системы уравнений

$$[\hat{K}]\{ {}^{t+\Delta t}u \} = [{}^{t+\Delta t}\hat{F}],$$

где «эффективная» матрица жёсткости

$$[\hat{K}] = [\tilde{K}] + a_0[\tilde{M}] + a_1[\tilde{C}]$$

Ускорение и скорость на шаге  $t + \Delta t$  вычисляются как

$$\begin{aligned}\{^{t+\Delta t}\ddot{u}\} &= a_0(\{^{t+\Delta t}u\} - \{^tu\}) - a_2\{^t\dot{u}\} - a_3\{^t\ddot{u}\} \\ \{^{t+\Delta t}\dot{u}\} &= \{^t\dot{u}\} + a_6\{^t\ddot{u}\} + a_7\{^{t+\Delta t}\ddot{u}\}\end{aligned}$$

Коэффициенты  $a_0 - a_7$  вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned}a_0 &= \frac{1}{\alpha\Delta t^2}; a_1 = \frac{\delta}{\alpha\Delta t}; a_2 = \frac{1}{\alpha\Delta t}; a_3 = \frac{1}{2\alpha} - 1; a_4 = \frac{\delta}{\alpha} - 1; a_5 = \frac{\Delta t}{2} \left( \frac{\delta}{\alpha} - 2 \right); \\ a_6 &= \Delta t(1 - \delta); a_7 = \delta\Delta t\end{aligned}$$

Параметры  $\alpha$  и  $\delta$  схемы Ньюмарка, определяющие точность и устойчивость интегрирования принимаются  $\delta \geq 0,5$ ,  $\alpha \geq 0,25(0,5 + \delta)^2$ . Значения параметров  $\alpha$  и  $\delta$  для безусловно устойчивой схемы  $\delta = 0,5$ ,  $\alpha = 0,25$  (метод постоянного среднего ускорения), при которых достигается наивысшая точность метода.  $\Delta t$  – шаг интегрирования по времени.

Скорости  $\{^{t+\Delta t}\dot{u}\}$  и ускорения  $\{^{t+\Delta t}\ddot{u}\}$  в сечениях, соответствующих динамическим степеням свободы системы и вычисленные на каждом шаге по времени, используются для получения квазистатических сосредоточенных нагрузок, равных  $\{F(t)\} - ([M]\{^{t+\Delta t}\ddot{u}\} + [C]\{^{t+\Delta t}\dot{u}\})$ .

Искомые перемещения, усилия, напряжения во всех сечениях суперэлементной модели от действия полученных квазистатических нагрузок определяются по суперэлементному алгоритму метода перемещений (см. п. 4.13) с методами начальных параметров и прогонки.

В результате расчета (интегрирования по времени) определяются сейсмические перемещения и напряжения в заданных сечениях, максимальные за все время интегрирования. Также определяются максимальные нагрузки на пружинные подвески и промежуточные опоры, оборудование и строительные конструкции. По запросу пользователя могут также выдаваться временные зависимости искомых параметров (в таблично-числовом, графических и анимационных формах).

Величина шага интегрирования  $\Delta t$  выбирается из условия:

$$\Delta t = \min\{T_{KI}/6, \Delta t_a/n\}$$

где:  $\Delta t_a$  – шаг цифровки акселерограмм,

$T_{KI} = 2\pi/\omega_{KI}$  – период  $KI$ -й собственной формы (при расчёте методом разложения по формам) или минимальный период колебаний исследуемой системы (при расчёте методом прямого интегрирования по схеме Ньюмарка), с;

$n = 1$  – при малом шаге цифровки (более 6 точек на характерный период акселерограмм),  $n = 2 \div 6$  – при “грубой” цифровке.

**4.10.** Расчет параметров установившихся вынужденных вибраций трубопроводов с линейно-упругими связями при детерминированном силовом нагружении, заданном для произвольных сечений стержневой модели (с обязательным расположением приведенной массы в этих сечениях) в полигармоническом виде:

$$\{F(t)\} = \sum_{j=1}^J \left( \{F\}_{cj} \cos \theta_j t + \{F\}_{sj} \sin \theta_j t \right)$$

проводится в модуле **АСТРА-ВИБР** по двум алгоритмам: спектральным методом с разложением по собственным формам колебаний или полным методом.

**4.10.1.** При расчёте спектральным методом с разложением по собственным формам колебаний амплитуды виброперемещений  $\{U\}_j$  для каждой возбуждающей частоты  $\theta_j$  во всех сечениях расположения масс определяются по следующим зависимостям:

$$\begin{aligned} \{U\}_j &= \left( \{U\}_{jc}^2 + \{U\}_{js}^2 \right)^{1/2} \\ \{U\}_{jc} &= \sum_{i=1}^{KI} \frac{F_{cij} (\omega_i^2 - \theta_j^2) - 2F_{sij} \xi_i \omega_i \theta_j}{(\omega_i^2 - \theta_j^2)^2 + 4\xi_i^2 \omega_i^2 \theta_j^2} \{\varphi\}_i \\ \{U\}_{js} &= \sum_{i=1}^{KI} \frac{F_{sij} (\omega_i^2 - \theta_j^2) + 2F_{cij} \xi_i \omega_i \theta_j}{(\omega_i^2 - \theta_j^2)^2 + 4\xi_i^2 \omega_i^2 \theta_j^2} \{\varphi\}_i \end{aligned}$$

где:

$$\begin{aligned} F_{cij} &= \{\varphi\}_i^T \{F\}_{jc} / M_i \\ F_{sij} &= \{\varphi\}_i^T \{F\}_{js} / M_i \\ M_i &= \{\varphi\}_i^T [M] \{\varphi\}_i \end{aligned}$$

Расчетные амплитуды виброперемещений  $\{U\}_j$  во всех или заданных сечениях суперэлементной модели определяются решением статической задачи от действия приложенных инерционных нагрузок (в местах расположения динамических степеней свободы)  $\{F\}_j = \theta_j^2 [M] \{U\}_j$  (см. п.4.6).

Далее по значениям виброперемещений  $\{U\}_j$  определяются амплитуды силовых факторов  $\{N\}_j$ , а затем – амплитуды приведенных вибронпряжений  $\{\sigma_{aF}\}_j$ . Демпферы (вязко-упругие опоры) в расчёте не учитываются.

**4.10.2.** При расчёте полным методом решается уравнение установившихся колебаний в матричной форме относительно динамических степеней свободы

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\}$$

где:

- $[M]$  – матрица масс (инерции), диагональная;
- $[C] = \alpha[M] + \beta[K] + [C_{оп}]$  – матрица демпфирования;
- $[K]$  – матрица жёсткости;
- $\{F(t)\}$  – вектор гармонических воздействий;
- $\{\ddot{u}\}$  – искомый вектор ускорений;

$\{\dot{u}\}$  – искомый вектор скоростей;

$\{u\}$  – искомый вектор перемещений;

Все точки механической системы имеют одинаковую частоту колебаний, однако, колеблются не обязательно синфазно. Демпфирование вызывает фазовые сдвиги.

Вектор нагрузок определяется в комплексной форме как:

$$\begin{aligned} \{F(t)\} &= \{F_{max} e^{i\phi}\} e^{i\theta t} \\ \{F\} &= \{F_{max} (\cos \phi + i \sin \phi)\} e^{i\theta t} \\ \{F\} &= (\{F_1\} + i\{F_2\}) e^{i\theta t} \end{aligned}$$

где:

$F_{max}$  – максимальная амплитуда нагрузки;

$\phi$  – сдвиг фаз (рад);

$\theta$  – возбуждающая круговая частота (рад/с);

$t$  – время воздействия, с;

$i$  – мнимая единица;

$\{F_1\} = \{F_{max} \cos \phi\}$  – действительная часть вектора нагрузок;

$\{F_2\} = \{F_{max} \sin \phi\}$  – мнимая часть вектора нагрузок.

Вектор перемещений  $\{u\}$  выражается аналогично вектору нагрузок  $\{F\}$  следующим образом:

$$\{u\} = \{u_{max} e^{i\phi}\} e^{i\theta t}$$

где:

$u_{max}$  – максимальная амплитуда перемещений, м;

Заметим, что  $u_{max}$  и  $\phi$  могут быть различны для каждой степени свободы.

Используя обозначения в комплексных числах, решение описывается в виде

$$\{u\} = \{u_{max} (\cos \phi + i \sin \phi)\} e^{i\theta t}$$

или

$$\{u\} = (\{u_1\} + i\{u_2\}) e^{i\theta t}$$

где

$\{u_1\} = \{u_{max} \cos \phi\}$  – действительная часть вектора перемещений

$\{u_2\} = \{u_{max} \sin \phi\}$  – мнимая часть вектора перемещений

Итоговое матричное уравнение может быть представлено в форме

$$[\tilde{K}]\{u\} = \{\tilde{F}\}$$

где

$$[\tilde{K}] = -\theta^2 [\tilde{M}] + i\theta [\tilde{C}] + [E]$$

$[E]$  – единичная матрица;

$$\{\tilde{u}\} = \{u_1\} + i\{u_2\}$$

$$\{\tilde{F}\} = \{F_1\} + i\{F_2\}$$

Полученное итоговое матричное уравнение решается относительно  $\{\tilde{u}\}$  известными методами линейной алгебры либо «в лоб», либо для расширенной действительной матрицы.

Амплитуды виброскоростей  $\{\dot{u}\}$  и виброускорений  $\{\ddot{u}\}$  в сечениях, соответствующих динамическим степеням свободы системы и вычисленные для

каждой возбуждающей частоты, используются для получения амплитуд квазистатических сосредоточенных нагрузок, равных  $\{F(t)\} - ([M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\})$ .

Искомые амплитуды виброперемещений, усилий, вибронапряжений во всех сечениях суперэлементной модели от действия полученных амплитуд квазистатических нагрузок определяются по суперэлементному алгоритму метода перемещений (см. п. 4.13) с методами начальных параметров и прогонки.

Изложенные методики расчёта позволяют учесть и кинематическое вибрационное воздействия на ряд сечений (опор, патрубков и строительных конструкций) трубопровода, заданные в виде полигармонических перемещений:

$$\{U(t)\} = \sum_{j=1}^J (\{U\}_{cj} \cos \theta_j t + \{U\}_{sj} \sin \theta_j t)$$

Для этого в указанных сечениях расчетной стержневой модели устанавливаются фиктивные связи большой жесткости  $k \rightarrow \infty$  по направлениям кинематического воздействия и задаются эквивалентные силовые воздействия с параметрами:

$$\{F\}_{cj} = k\{U\}_{cj} \text{ и } \{F\}_{sj} = k\{U\}_{sj}$$

**4.11.** Динамический расчет неустановившихся колебаний трубопроводных систем с линейно-упругими связями при произвольном динамическом нагружении  $\{F(t)\}$ , выполняется в модуле **АСТРА-ДИН** по двум алгоритмам: спектральным методом с разложением по собственным формам колебаний или методом прямого интегрирования уравнений движения по неявной разностной схеме Ньюмарка. Алгоритм следует схеме **АСТРА-СЕЙСМ** с точностью до замены сейсмической нагрузки  $[M]\{a(t)\}$  на силовую динамическую  $\{F(t)\}$ .

**4.12.** Расчет *подземных трубопроводов* сегодня – парадоксальный случай, когда действующие российские нормы либо “бегут впереди паровоза”, требуя их выполнения по не прописанной методике [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10], либо вообще никак не регламентируют подобные расчеты [1, 2, 3, 11, 12]. Реальный трехмерный нелинейный механизм взаимодействия трубопровода с грунтом столь сложен, сильно зависим, в частности, от не всегда известной истории нагружения и не полностью математически формализован (существует несколько конкурирующих моделей грунтов, оперирующих различным набором исходных параметров состояния и дающих, в ряде случаев, весьма отличные друг от друга результаты), что уложить все многообразие реальных процессов в “прокрустово ложе” упрощенной инженерной методики – задача столь же благодарная, сколь и не до конца достижимая.

В **АСТРА-НОВА** 2021 реализованы и доступны пользователям две методики *статического расчета (СТАЦ)* подземных трубопроводов бесканальной прокладки (теплосети) и подземных и наземных (в насыпи) магистральных трубопроводов:

1) упрощенная – жесткость “распределенных” опор, моделирующих взаимодействие с грунтом во всех сечениях, определяется по заданным пользователем коэффициентам постели по трем локальным осям трубы:



продольной ( $\mathbf{x}_3$ ), горизонтальной поперечной ( $\mathbf{x}_1$ ) и вертикальной ( $\mathbf{x}_2$ );

2) уточненная (*рекомендуемая*) – на каждом шаге итераций эквивалентные “распределенные” опоры, жесткость которых нелинейно зависит от коэффициентов постели изоляции, подушек и грунта, рассматриваются как упруго-подвижные с тремя линейно-упругими связями по локальным осям трубы:  $\mathbf{x}_3$ ,  $\mathbf{x}_1$  и  $\mathbf{x}_2$ . Итерационная процедура завершается при установлении слабо меняющихся перемещений по направлению связей.

Параметры эквивалентной стержневой модели на нелинейном основании и итерационного процесса строятся как на основе отечественного и зарубежного опыта анализа подобных систем, так и на инженерной интерпретации результатов трехмерного конечноэлементного моделирования НДС систем “трубопровод-изоляция-компенсирующие подушки-грунт” в линейно-упругой и нелинейной постановках по комплексу **СТАДИО** [23, 46, 47] (рис. 4.7). Подробное описание *рекомендуемой* численной методики, реализованной в комплексе **АСТРА-НОВА** для статического расчета подземных трубопроводов бесканальной прокладки, приведено в Приложении 3.

Для “блока” *динамических расчетов (ФОРМ, СЕЙСМ, ВИБР, ДИН)* в **АСТРА-НОВА’2021** реализована вновь разработанная инженерная методика учета/коррекции жесткости эквивалентных опор, моделирующих взаимодействие с грунтом и заданных/определенных в *статическом* расчете. Возможная коррекция, учитывающая существенное увеличение жесткости грунта при динамических воздействиях, выполняется умножением статических жесткостей по локальным осям на заданные пользователем масштабные коэффициенты.

Изложенные выше возможности статических и динамических расчетов доступны также и для подземных и комбинированных (надземно-подземных) трубопроводов АЭУ (*АЭС*), пара и горячей воды (*ТЭС*) и нефтехимии/нефтепереработки (**НЕФТЕХИМ**).

**4.13.** В актуальной версии **АСТРА-НОВА** *метод суперэлементов* (МСЭ), известный также как метод подконструкций, реализован также для построения редуцированных матриц влияния системы или учета этих матриц при суперэлементной сборке. Ключевой процедурой МСЭ является статическая конденсация [114] – исключение внутренних степеней свободы подконструкции  $\{u_i\}$ , – приводящая исходную блочную систему уравнений равновесия

$$\begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ib} \\ K_{bi} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_i \\ F_b \end{Bmatrix}$$

к редуцированной системе относительно компонент вектора граничных неизвестных  $\{u_b\}$ :

$$[\bar{K}]\{u_b\} = \{\bar{F}\},$$

где: 
$$[\bar{K}] = [K_{bb}] - [K_{bi}][K_{ii}]^{-1}[K_{ib}],$$

$$\{\bar{F}\} = \{F_b\} - [K_{bi}][K_{ii}]^{-1}\{F_i\}.$$

Редуцированные матрицы  $[\bar{K}]$  и  $\{\bar{F}\}$  импортируются-экспортируются через текстовые файлы, формат которых учитывает блочно-диагональную структуру  $[\bar{K}]$ , а также через бинарные файлы структуры ПК **СТАДИО** и **АСТРА-НОВА**.

**4.14.** Реализован также алгоритм метода *динамического синтеза подконструкций*. Методы динамического синтеза подконструкций можно классифицировать по способу выбора базисных векторов метода Релея-Ритца для подконструкций и по способу их стыковки. Чаще всего в качестве базиса для подконструкций используются ее собственные формы колебаний при определенных граничных условиях: [115–116] – для закрепленной границы, [117] – для свободной границы, [118] – для частично закрепленной границы подконструкции. Из трех рассмотренных вариантов метода наиболее предпочтительным, с вычислительной и реализационной точек зрения, является первый, использующий формы колебаний основной системы метода перемещений. При этом для упрощения стыковки подконструкций и для правильного учета их жестких смещений и перемещений граничных точек базис из форм колебаний целесообразно дополнить набором статических функций формы суперэлементов, каждая из которых представляет собой вектор упругих перемещений узлов подконструкции, вызванных единичным смещением по направлению соответствующей фиктивной связи для основной системы метода перемещений.

Наиболее популярен реализованный в универсальных “коммерческих” ПК (NASTRAN, ANSYS, ADAMS,...) упомянутый подход Крейга-Бемптона [115], сводящийся к построению редуцированных матриц жесткости и масс:

$$[\hat{K}] = [\hat{\Phi}]^T [K] [\hat{\Phi}] = \begin{bmatrix} \hat{K}_{CC} & 0 \\ 0 & \hat{K}_{NN} \end{bmatrix};$$

$$[\hat{M}] = [\hat{\Phi}]^T [M] [\hat{\Phi}] = \begin{bmatrix} \hat{M}_{CC} & \hat{M}_{NC} \\ \hat{M}_{CN} & \hat{M}_{NN} \end{bmatrix},$$

где:

$$[\hat{\Phi}] = \begin{bmatrix} I & 0 \\ \Phi_{IC} & \Phi_{IN} \end{bmatrix},$$

$\Phi_{IC}$  – перемещения внутренних степеней свободы СЭ для заданных единичных перемещений граничных (стыковочных) узлов,  $\Phi_{IN}$  – перемещения внутренних степеней свободы, соответствующие собственным формам колебаний при ограничении степеней свободы (заделке) граничных узлов.

Программная реализация матричных операций при формировании  $[\hat{K}]$  и  $[\hat{M}]$  (и редуцированных векторов нагрузок  $\{\hat{F}\}$ ) в основном построена на стандартных процедурах, содержащиеся в модулях ПК. Не встречается каких-либо трудностей, следуя канонической конечно(супер)элементной сборке, и учет  $[\hat{K}]$ ,  $[\hat{M}]$  и  $\{\hat{F}\}$  в общей суперэлементной модели.

Импорт-экспорт матриц организован через текстовые файлы, формат которых учитывает блочно-диагональную структуру  $[\hat{K}]$  и заполненную структуру  $[\hat{M}]$ . В частности, поддерживается формат ПК NASTRAN.

Также формируются, хранятся и доступны бинарные файлы с матрицами  $[\hat{K}]$ ,  $[\hat{M}]$  и  $\{\hat{F}\}$ , структура которых соответствует ПК **СТАДИО** и **АСТРА-НОВА**.

**4.15.** “Исследовательская” подсистема программного комплекса прочностных расчетов трубопроводных систем – **АСТРА-СТАДИО** – полностью совместимая с **АСТРА-НОВА 2021** (экспорт геометрических характеристик, физико-механических свойств и нагрузок значимых этапов статического и сейсмического расчетов, импорт уточненных напряжений и матриц жесткости/податливости, обеспечивает уточненный расчет по пространственно-оболочечным и объемным схемам метода конечных элементов (МКЭ) стационарных температурных полей, напряженно-деформированного состояния (НДС), статической, циклической и сейсмической прочности следующих тяжело нагруженных элементов трубопроводов при действии полной системы квазистатических нагрузок (внутреннее давление, вес и температурные деформации, осевая и поперечные силы, изгибающие и крутящий моменты на границах-торцах):

1) *тройников* ортогональных и неортогональных (косых) радиальных (сварных, штампованных, штампованных и кованных, с накладками и плакирующим слоем);

2) *отводов* (гибов, колен) гнутых, крутоизогнутых, штампованных и секторных с учетом эллиптичности, разностенности (переменной толщины сечения) и примыкающих прямых труб;

3) конических *переходов* концентрических и с эксцентриситетом;

4) линзовых и сильфонных *компенсаторов* осевых, угловых и сдвиговых (многоволновых с учетом примыкающих прямых труб);

5) *косых стыков*;

6) *сварных швов*;

7) *подземных трубопроводов* (труб, отводов и косых стыков с изоляцией/компенсирующими подушками в грунте).

Подсистема аккумулирует мировой и собственный многолетний опыт разработчиков [1-12] по анализу сложного пространственного распределения перемещений, деформаций и напряжений в деталях, определяющих прочность всей трубопроводной системы, в оборудовании, строительных конструкциях и

сооружениях.

Подсистема обладает диалоговым пре- и постпроцессором, может быть связана с базой данных типовых элементов, требует лишь необходимого минимума информации для автоматической генерации оптимальных по точности пространственно-оболочечных (для тонко- и “среднестенных” элементов) и объемных (для толстостенных деталей и системы “трубопровод-изоляция-грунт”) расчетных конечноэлементных моделей. Вычислительным “ядром” служит мощный верифицированный конечно/суперэлементный комплекс **СТАДИО** [74], имеющий богатый послужной список исследованных сложных объектов атомной, тепловой и гидроэнергетики, различных отраслей строительства и машиностроения.

Основные реализованные гипотезы: изотропия и линейная упругость металла (физическая линейность) и малость деформаций-перемещений (геометрическая линейность). Для грунта (подземные трубопроводы) принята физически нелинейная реологическая модель энергетического типа, зарекомендовавшая себя при численном моделировании трехмерных систем “основание-сооружение” [10].

Подробное описание алгоритма расчета и сеанса работы с **АСТРА-СТАДИО** содержится в отдельном документе [75].

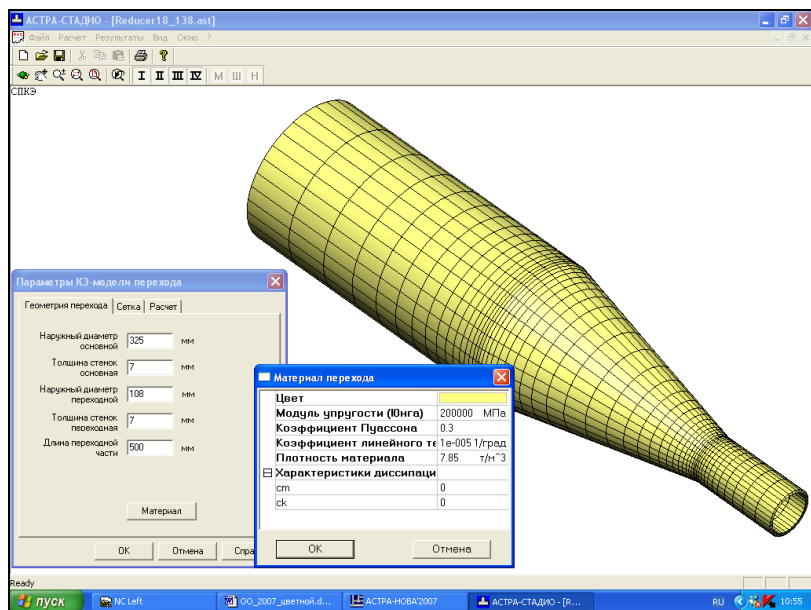
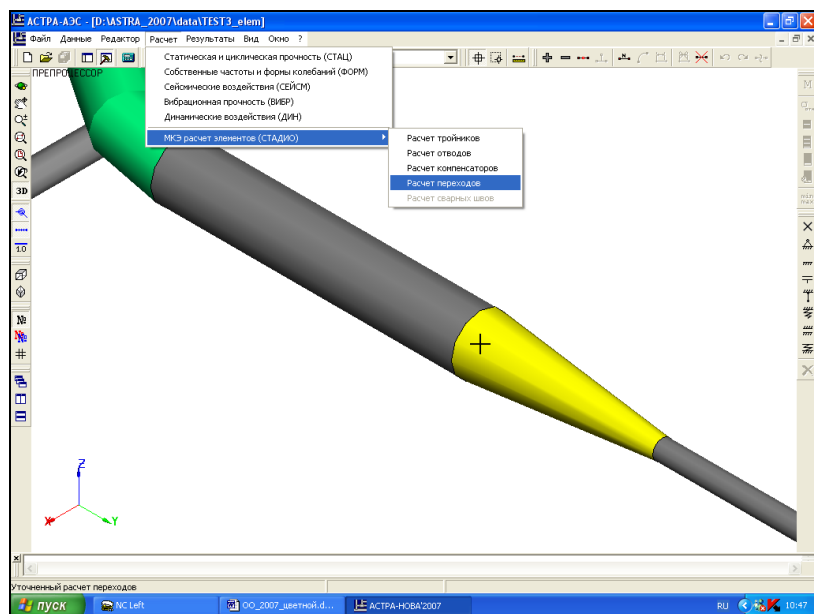


Рис. 4.1 **АСТРА-СТАДИО**. Импорт данных из **АСТРА-НОВА** и генерация конечноэлементных моделей деталей (на примере конического перехода)

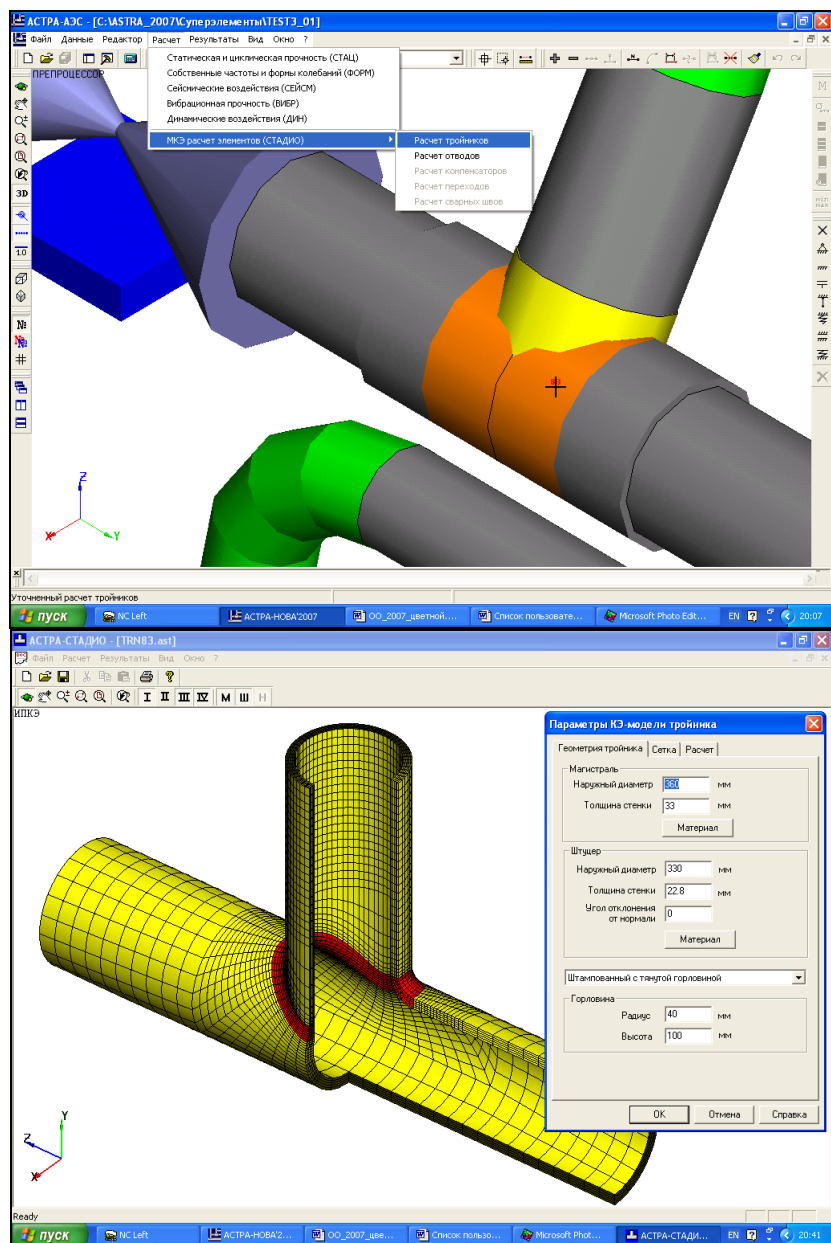


Рис. 4.2 АСТРА-СТАДИО. Импорт данных из АСТРА-НОВА и генерация конечноэлементных моделей деталей (на примере штампованного тройника)

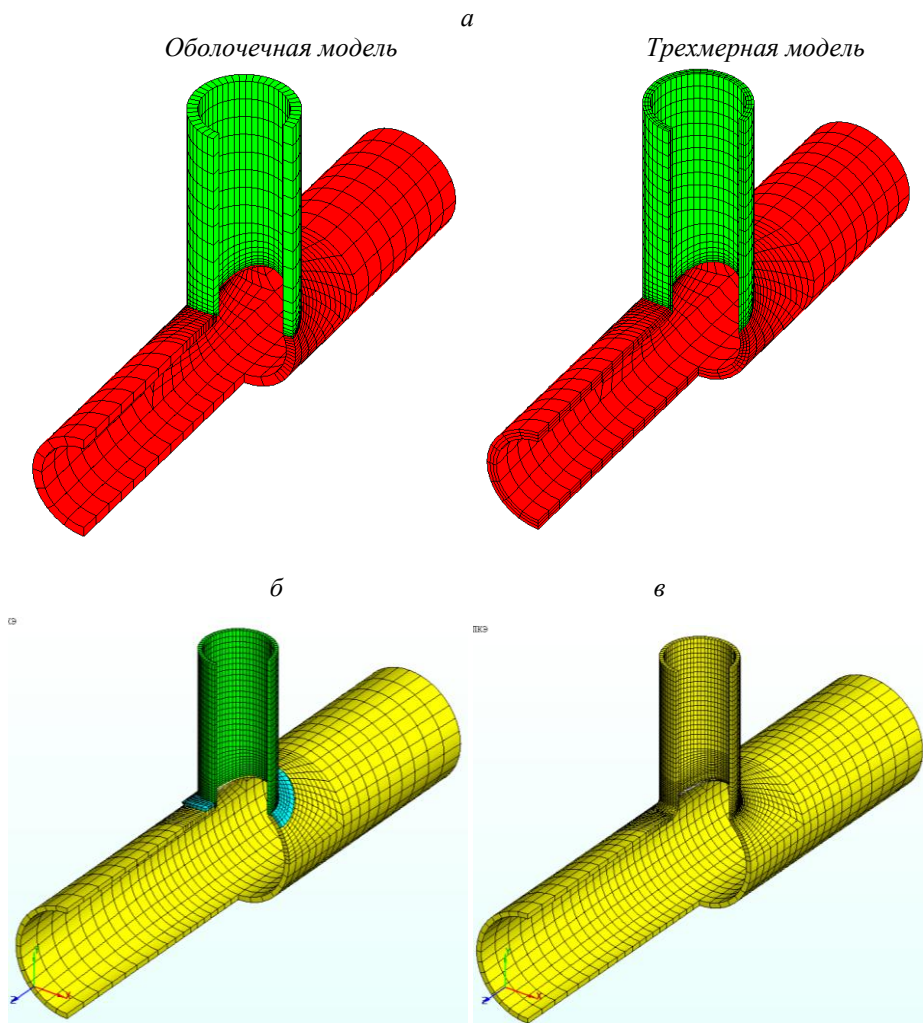


Рис. 4.3 **АСТРА-СТАДИО**. Конечноэлементные модели ортогональных радиальных тройниковых соединений.

а) сварной с зачищенным швом; б) сварной с накладкой;  
в) штампованный с тянутой горловиной.

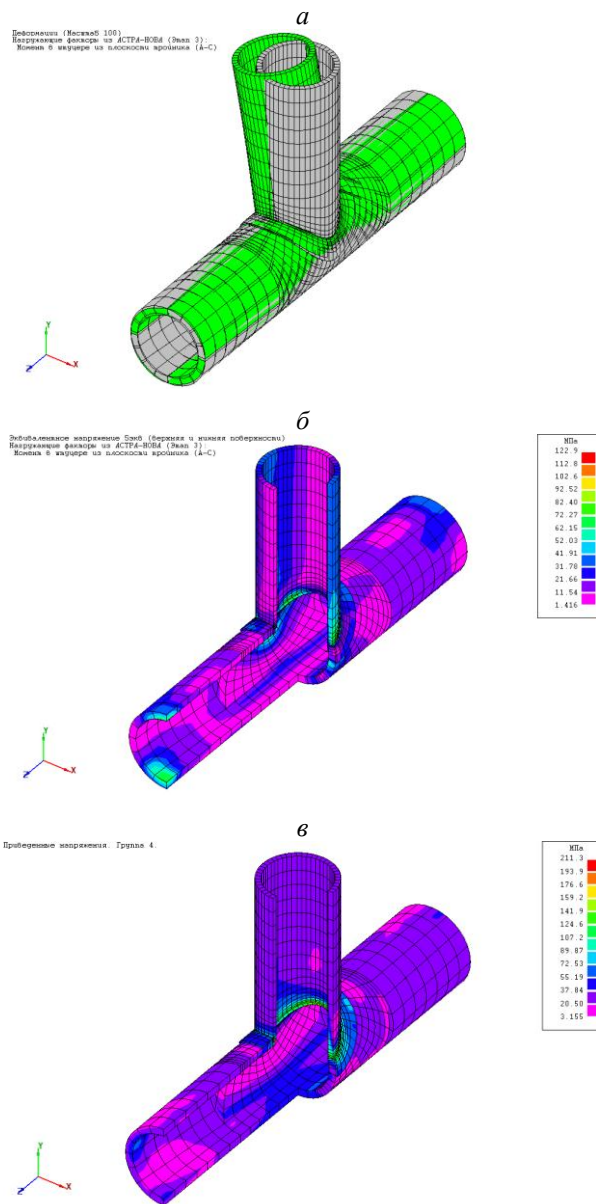
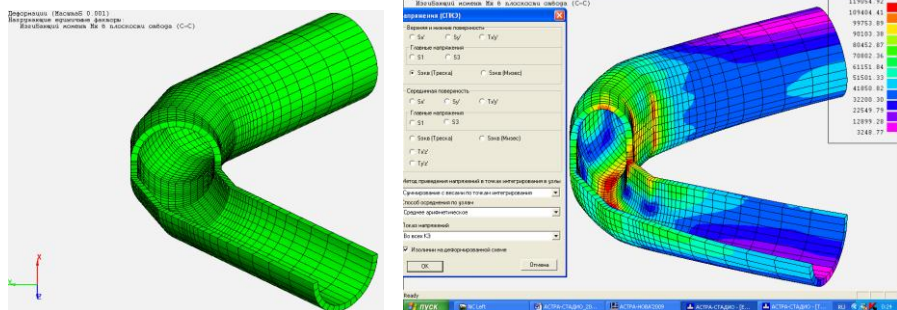


Рис. 4.4 АСТРА-СТАДИО. Деформированное (а) и напряженное (б) состояния при заданных сочетаниях нагрузок, расчетная группа напряжений (в, этап 3, группа  $(\sigma_{AF})_K$ , (амплитуды) по АСТРА-АЭС) тройникового соединения

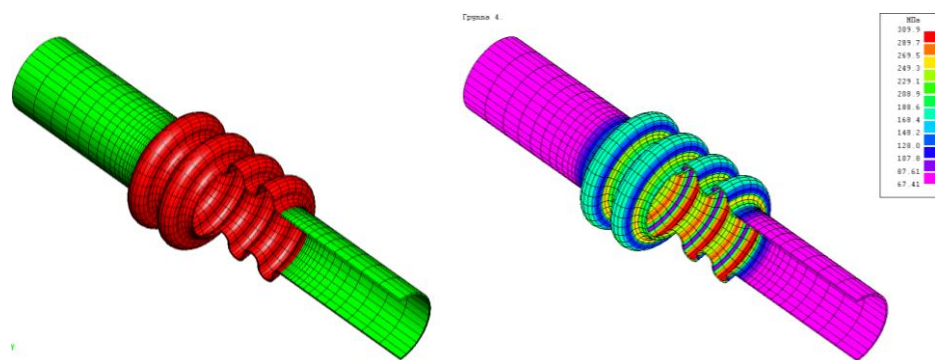


### Секторный отвод

[illegible]

87

### Линзовый и сильфонный компенсатор



### Переход конический концентрический

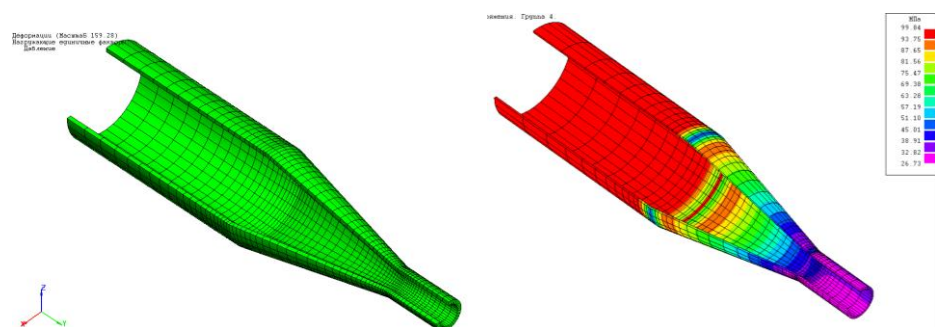


Рис. 4.5б АСТРА-СТАДИО. Конечноэлементные оболочечные модели, расчетные напряжения и оценки прочности деталей трубопроводов

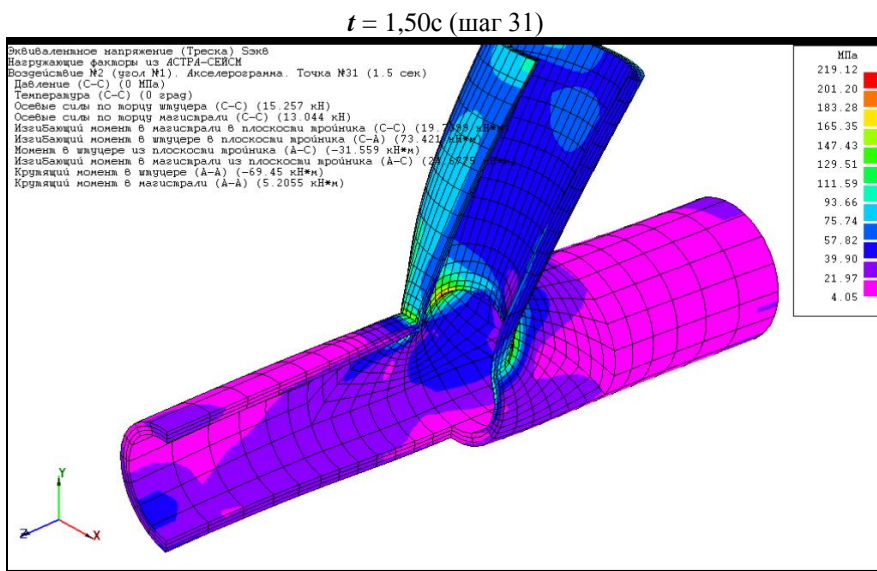
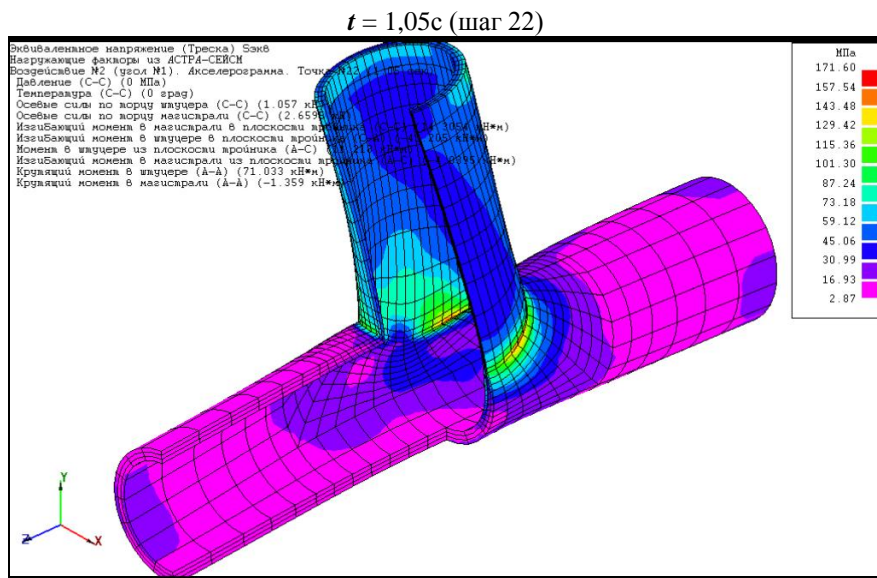
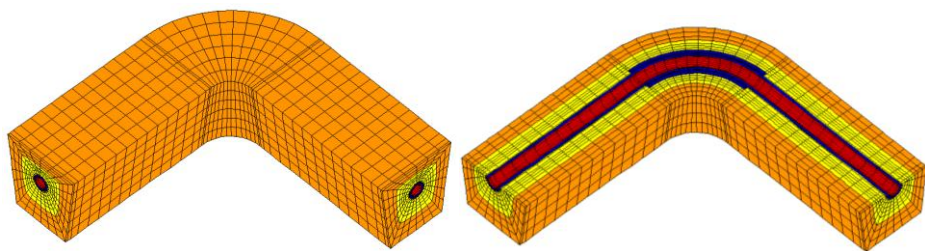
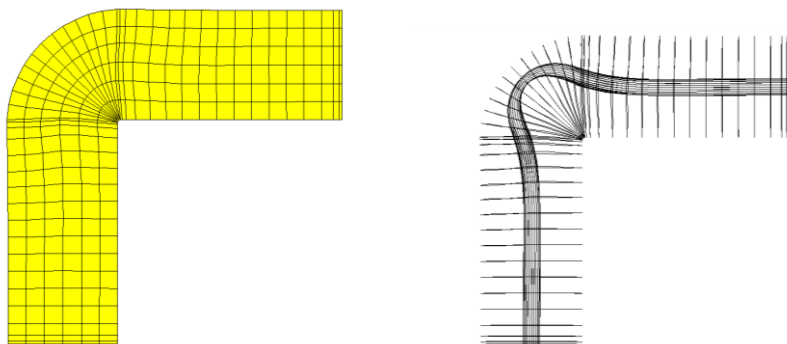


Рис. 4.6 АСТРА-СТАДИО. Кадры видеоролика динамики НДС тройника от сейсмического воздействия, заданного акселерограммой



*Расчетное деформированное состояние при температурном нагружении*



*Расчетное напряженное состояние при температурном нагружении*

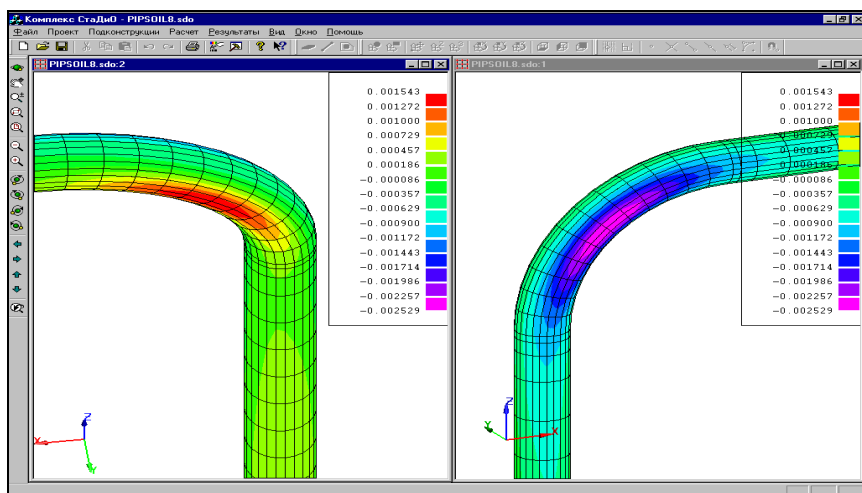


Рис. 4.7 Трехмерная конечноэлементная **СТАДИО**-модель “трубопровод-изоляция (ППУ+ПЭ)-компенсирующая подушка-грунт в траншее”

## 5. “Семейство” программных комплексов *АСТРА-НОВА*

### 5.1. Общие положения. Требования к системе и оборудованию

**5.1.1.** “Базовая” версия любой отраслевой ветви-комплекса семейства *АСТРА-НОВА* 2021 несколько десятилетий устойчиво состоит из 7 модулей: *АСТРА-СТАЦ*, *АСТРА-ФОРМ АСТРА-СЕЙСМ*, *АСТРА-ВИБР*, *АСТРА-ДИН*, *ПРЕ-АСТРА* и *ПОСТ-АСТРА*. К этой “великолепной семерке” уже 10 лет примыкает и развивается «профи-модуль» *АСТРА-СТАДИО* для уточненного расчета МКЭ температурных полей и НДС (по оболочечным и трехмерным схемам метода конечных элементов), оценки прочности деталей трубопроводов. А вот самый «простой», но давно востребованный модуль *АСТРА-ДЕТАЛЬ* и, на самом деле, сложный, долгожданный модуль *АСТРА-СВД* разработаны и вошли в число поставляемых только с настоящей версии *АСТРА-НОВА* 2021.

Программы написаны на языках Intel Visual Fortran 15 (вычислительные модули) и Visual C++ с использованием трехмерной графики OpenGL (визуализация расчетных моделей и результатов и диалоговая система подготовки расчетной модели *ПРЕ-АСТРА*, *ПОСТ-АСТРА*).

Программы комплекса совместимы по исходным данным в задании физико-механических свойств, расчетных параметров и геометрических характеристик системы трубопроводов. Сейсмические, вибрационные и динамические воздействия задаются независимо друг от друга и могут присутствовать во вводе одновременно. Это возможно благодаря тому, что каждая программа выбирает из входного потока только необходимую для своей работы информацию.

**5.1.2.** Комплекс может функционировать на IBM-совместимых ПЭВМ под управлением 64-х разрядной операционной системы Windows (Windows 7, 8, 10)

**5.1.3.** Требования к оборудованию:

- CPU 2 ГГц;
- RAM 8 Гбайт,
- HDD 1 Тбайт,
- VideoCard: не менее  $2^{16}$  цветов; видеопамять – 256 Мбайт.
- Разъемы USB для подключения ключа HASP HL.
- Протокол TCP/IP с открытым портом 1947 для работы *ПК АСТРА-НОВА* с ключом типа HASP HL.
- Файловая система – NTFS.

**5.1.4.** В разделах 5.3 – 5.11 кратко описываются назначение программ комплекса, результаты их работы, специфические ограничения, в разделе 5.12 представлены диагностические сообщения и сообщения, встречающиеся во время выполнения программ.

## 5.2. Количественные ограничения расчетной модели

Все программы семейства *АСТРА-НОВА’2021* накладывают следующие единые количественные ограничения на расчетную модель в целом и каждый суперэлемент, позволяющие свободно анализировать трубопроводные системы “предельной” сложности (в скобках приведены соответствующие данные для версии *АСТРА-НОВА’2001*):

Характеристики	Диапазон изменения
Узлов стыковки суперэлементов	<b>0 – 4 000</b> (1 – 500)
Неразветвленных суперэлементов-участков трубопровода (2 узла стыковки)	<b>1 – 4 000</b> (1 – 1 000)
Произвольных суперэлементов (трубопроводы, детали, оборудование, опоры)	<b>0 – 4 000</b> (–)
Элементов трубопровода (отрезков)	<b>1 – 1 600 000</b> (2 – 40 000)
Динамических степеней свободы	<b>1 – 60 000</b> (1 – 6 000)
Собственных частот и форм колебаний	<b>1 – 4 000</b> (1 – 400)
Шагов интегрирования по времени	<b>1 – 60 000</b> (1 – 3 000)
Элементов-отрезков участка	<b>1 – 400</b> (2 – 40)
Пружин, опор, арматуры, фланцев,...для участка	<b>0 – 400</b> (0 – 10)

## 5.3. Программный модуль *АСТРА-ДЕТАЛЬ*

Модуль *АСТРА-ДЕТАЛЬ* реализует расчет по выбору основных размеров деталей в соответствии с требованиями отраслевых российских **Норм, РТМ и РД** [1–12]. Реализован расчёт деталей трубопроводов – *прямых труб, отводов (гибов), переходов, тройников и крышек/днищ* – на действие давления.

Предусмотрено 2 вида расчета:

- выбор минимальной расчетной и номинальной (с учетом прибавок) толщины стенки деталей;
- выбор деталей, подходящих по толщине стенки, из сортментов.

Результатами расчета (в зависимости от вида) являются:

- минимальная толщина стенки каждой детали и, для тройников, площади сечения укрепляющих элементов;
- перечень выбранных деталей с указанием их сортамента и геометрических параметров.

## 5.4. Программный модуль *АСТРА-СТАЦ*

Модуль *АСТРА-СТАЦ* реализует расчет на статическую и циклическую прочность произвольных пространственных разветвленных низко- средне- и высокотемпературных трубопроводов (замкнутых или имеющих замкнутые контуры, свободные, шарнирно опертые и заземленные концы, содержащих прямые трубы, отводы, тройниковые и фланцевые соединения отраслевых сортаментов, линзовые, сильфонные и сальниковые компенсаторы, пружинные подвески и опорные конструкции различных типов, в том числе, односторонние и с учетом трения скольжения и качения) в соответствии с требованиями отраслевых российских **Норм, РТМ и РД** [1–12].

Может быть проведено 6 видов расчета (в том числе, с учетом сил трения в опорных конструкциях по двум методикам [80], [83]) на нормативно регламентируемые сочетания квазистатических и малоциклических воздействий: давления, распределенной весовой и сосредоточенных нагрузок, температурного нагрева трубопроводов, смещений его заземленных концов и промежуточных опор, монтажного растяга. Возможно задание односторонних связей (опоры без хомутов и жесткие тяги) и опорных конструкций с жесткостями в локальной системе координат. Возможен учет боковых жесткостей в пружинных и жестких подвесках, осевых сил от давления, в том числе в компенсаторах, осевых деформаций от давления, манометрического эффекта в отводах.

Сортаменты пружин определяются:

- отраслевой нормалью **МВН-049-63**,
- отраслевыми стандартами **ОСТ 108.764.01-80, ОСТ 24.125.109-01**,
- чертежами (от **ВНИПИЭТ**) для “специальных” пружин,
- каталогами для пружин “постоянного усилия” **LISEGA**,
- каталогами пружинных подвесок **LISEGA**.

Сортаменты пружинных блоков пружинных опор определяются:

- отраслевыми стандартами **ОСТ 108.275.69-80, ОСТ 24.125.166-01**.

Соответствие номеров расчетов предыдущих версий комплекса *АСТРА-НОВА* и названиями расчетов версии *АСТРА-НОВА* '2021 приведено в таблице.

<i>АСТРА-НОВА</i> '2011		<i>АСТРА-НОВА</i> '2021	
Расчёт №	Вид (наименование) расчета версии 2011	Название расчета	Учёт испытаний и дополнительных режимов
1	Полный с выбором пружинных подвесок (этапы 1-4)	Расчет с определением рабочих нагрузок и жёсткостей пружин	нет
2	Полный с заданием характеристик пружинных	Расчет с заданными жёсткостями и рабочими	нет

	подвесок (этапы 1-4)	нагрузками пружин	
8	Полный “комбинированный” (этап 1 расчета 1 + расчет 2)	Расчет с определением только рабочих нагрузок пружин	нет
10	Расчет 1 + ”дополнительные” этапы 3 + этап испытаний	Расчет с определением рабочих нагрузок и жёсткостей пружин	да
11	Расчет 2 + ”дополнительные” этапы 3 + этап испытаний	Расчет с заданными жёсткостями и рабочими нагрузками пружин	да
12	Полный “комбинированный” (этап 1 расчета 1 + расчет 2) + ”дополнительные” этапы 3 + этап испытаний	Расчет с определением только рабочих нагрузок пружин	да

Результатами расчета (в зависимости от вида) являются: нагрузки на промежуточные и концевые опоры, перемещения, внутренние силовые факторы (в общей и/или местной системах координат), расчетные группы напряжений в сечениях-элементах суперэлементов (в том числе отводах, гibaх и коленах, “ненормализованных” линзовых и сильфонных компенсаторах) и тройниках. Для крутоизогнутого гiba (при безразмерном геометрическом параметре  $\lambda \leq 1,4$ ) при превышении расчетного напряжения над допускаемым выполняется уточненный расчет напряжения (группы 3 и 4). В случае превышения допускаемых напряжений в тройниках дополнительно проводится расчет по уточненной методике (только для АСТРА-АЭС по 2, 3, 4 группам напряжений). При соответствующих режимах расчета производится также подбор оптимальных пружинных подвесок и пружинных опор с определением их характеристик (структура цепей, затяжки, осадки, видимые и полные перемещения, изменения нагрузок при переходе из холодного в рабочее состояние, высоты пружин в холодном и рабочем состояниях, затяжки в монтажном состоянии).

*Этап 1. Расчет на статическую прочность под действием несамобалансированных нагрузок (давления и веса в рабочем состоянии).* Определяются перемещения, приведенные и допускаемые напряжения (группа 1 – от действия давления и группа 2 – от всех нагрузок), рабочие нагрузки пружинных подвесок (для расчетов с подбором характеристик пружин или определением только их рабочих нагрузок), нагрузки на опорные конструкции, оборудование и узлы, условное давление во фланцевых соединениях, силовые факторы в сечениях.

*Этап 3. Расчет на циклическую прочность.* Учитывается внутреннее давление, температурное расширение, “собственные” смещения промежуточных опор и заземленных концов при переходе из рабочего состояния в холодное. Определяются перемещения, приведенные и допускаемые напряжения (группы 3 и 4 для низкотемпературных и группа 4 для высокотемпературных трубопроводов), условное давление во фланцевых соединениях, типы и



характеристики пружинных подвесок, их затяжка и осадка, силовые факторы в сечениях трубопровода.

*Этап 2б. Расчет низкотемпературных трубопроводов на действие всех нагрузок.* Учитываются внутреннее давление, весовая нагрузка, температурное расширение (самокомпенсация), “собственные” смещения промежуточных опор и заземленных концов, монтажная растяжка в рабочем состоянии. Определяются перемещения в расчетных сечениях, условное давление во фланцевых соединениях, силовые факторы в сечениях, нагрузки на опорные конструкции, оборудование и узлы в рабочем состоянии. Определяются также нагрузки на опорные конструкции и оборудование в холодном состоянии, за исключением случая учета трения по методике Гипрокаучука.

*Этап 2а. Расчет высокотемпературных трубопроводов на статическую прочность под действием несаморавновешенных и самоуравновешенных нагрузок.* Учитываются внутреннее давление, весовая нагрузка, температурное расширение (самокомпенсация), “собственные” смещения заземленных концов, монтажная растяжка в рабочем состоянии. Определяются перемещения в расчетных сечениях, приведенные и допускаемые напряжения группы 3, условное давление во фланцевых соединениях, силовые факторы в сечениях, нагрузки на опорные конструкции, оборудование и узлы в рабочем состоянии.

*Этап 4. Расчет нагрузок в нерабочем состоянии.* Учитываются те же воздействия, что и на этапе 2 для холодного (нерабочего) состояния трубопровода. Определяются перемещения в расчетных сечениях, силовые факторы в сечениях, нагрузки на опорные конструкции, оборудование и узлы.

*Режим гидро(пнеumo)испытаний.* Определяются перемещения в расчетных сечениях, силовые факторы в сечениях, приведенные и допускаемые напряжения (группы 1 и 2), нагрузки на опорные конструкции, оборудование и узлы для режимов “распущенных” и заклиненных пружин. Если пружины заклинены, то для трубопроводов с односторонними опорами (в т.ч., и с жесткими подвесками) на этапе испытаний проводятся итерации по установлению истинного статуса односторонних опор (отрыв или контакт).

*Дополнительные режимы (этапы 3).* Определяются перемещения в расчетных сечениях, силовые факторы в сечениях, приведенные и допускаемые напряжения (группы 3 и 4).

Виды (номера), этапы, нагружающие факторы и результаты расчета трубопроводных систем на статическую и циклическую прочность представлены в таблицах 5.1 – 5.5 на примере отраслевой ветви АСТРА-АЭС.

Таблица 5.1

**Низкотемпературные трубопроводы без трения и с трением по методике НПО ЦКТИ**  
**Виды (номера), этапы и результаты расчетов по программе АСТРА-СТАЦ**

Вид (номер) расчета	Наименование расчета	Этапы расчета	Значения переменных параметров										Учёт трения	Результаты этапа расчета
			$K_{PP}$	$P_{3Y}$	$T$	$u$	$\delta'$	$E$	$p$	$P_3$	$q_3$			
1	С выбором пружинных подвесок	I	$K_Y$	0	0	0	0	$E_P$	$p$	$P_3$	$q_3$	-	$P_{3Y}^P, (u)_I, (\sigma)_I \leq [\sigma]?, (\sigma)_2 \leq 1,3[\sigma]?$	
		III	$K_{PP}$	0	$t_H$	$u_H$	0	$E_X$	$p$	0	0	+	$P_{3Y}^X, K_{PP}, (u)_{III}, (\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}?, (\sigma_{aF})_K \leq [\sigma_{aF}]?$	
		ПБ	0	$P_{3Y}^P$	$t_H$	$u_H$	$\delta'$	$E_P$	$p$	$P_3$	$q_3$	+	Нагрузки на опоры и узлы в холодном и рабочем состоянии	
2	С заданными пружинными подвесками	I	0	$P_{3Y}^P$	0	0	0	$E_P$	$p$	$P_3$	$q_3$	-	$(u)_I, (\sigma)_I \leq [\sigma]?, (\sigma)_2 \leq 1,3[\sigma]?$	
		III	$K_{PP}$	0	$t_H$	$u_H$	0	$E_X$	$p$	0	0	+	$(u)_{III}, (\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}?, (\sigma_{aF})_K \leq [\sigma_{aF}]?$	
		ПБ	0	$P_{3Y}^P$	$t_H$	$u_H$	$\delta'$	$E_P$	$p$	$P_3$	$q_3$	+	Нагрузки на опоры и узлы в холодном и рабочем состоянии	
7	На действие нагрузки в холодном состоянии	IV	0	$P_{3Y}^X$	0	0	0	$E_X$	0	$P_3$	$q_3$	-	Нагрузки на опоры и узлы в холодном состоянии	

Таблица 5.2

**Низкотемпературные трубопроводы с трением по методике института “Гипрокаучук”  
Виды (номера), этапы и результаты расчетов по программе АСТРА-СТАЦ**

Вид (номер) расчета	Наименование расчета	Этапы расчета	Значения переменных параметров										Учёт трения	Результаты этапа расчета
			$K_{ПП}$	$P_{3У}$	$T$	$u$	$\delta'$	$E$	$p$	$P_3$	$q_3$			
1	С выбором пружинных подвесок	I	$K_Y$	0	0	0	0	$E_P$	$p$	$P_3$	$q_3$	-	$P_{3У}^P, (u)_I, (\sigma)_I \leq [\sigma]?, (\sigma)_2 \leq 1,3[\sigma]?$	
		ПБ	0	$P_{3У}^P$	$t_H$	$u_H$	$\delta'$	$E_P$	$p$	$P_3$	$q_3$	+	Нагрузки на опоры и узлы в рабочем состоянии, $P_{3У}^3$	
		IV	$K_{ПП}$	$P_{3У}^3$	0	0	0	$E_X$	0	$P_3$	$q_3$	+	Нагрузки на опоры и узлы в холодном состоянии	
		III=ПБ-IV											+	$P_{3У}^X, K_{ПП}, (u)_{III}, (\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}?, (\sigma_{aF})_K \leq [\sigma_{aF}]?$
2	С заданными пружинными подвесками	I	0	$P_{3У}^P$	0	0	0	$E_P$	$p$	$P_3$	$q_3$	-	$(u)_I, (\sigma)_I \leq [\sigma]?, (\sigma)_2 \leq 1,3[\sigma]?$	
		ПБ	0	$P_{3У}^P$	$t_H$	$u_H$	$\delta'$	$E_P$	$p$	$P_3$	$q_3$	+	Нагрузки на опоры и узлы в рабочем состоянии, $P_{3У}^3$	
		IV	$K_{ПП}$	$P_{3У}^3$	0	0	0	$E_X$	0	$P_3$	$q_3$	+	Нагрузки на опоры и узлы в холодном состоянии	
		III=ПБ-IV											+	$(u)_{III}, P_{3У}^X, (\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}?, (\sigma_{aF})_K \leq [\sigma_{aF}]?$
7	На действие нагрузки в холодном состоянии	IV	0	$P_{3У}^X$	0	0	0	$E_X$	0	$P_3$	$q_3$	+	Нагрузки на опоры и узлы в холодном состоянии	

Таблица 5.3

**Высокотемпературные трубопроводы без учета трения/отрыва от опор**  
**Виды (номера), этапы и результаты расчетов по программе АСТРА-СТАЦ**

Вид (номер) расчета	Наименование расчета	Этапы расчета	Значения переменных параметров										Результаты этапа расчета
			$K_{PP}$	$P_{3Y}$	$T$	$u$	$\delta'$	$E$	$p$	$P_3$	$q_3$	Учёт трения	
1	С выбором пружинных подвесок	I	$K_Y$	0	0	0	0	$E_P$	$p$	$P_3$	$q_3$	-	$P_{3Y}^P, (u)_I, (\sigma)_I \leq [\sigma]?, (\sigma)_2 \leq [\sigma]_2^* ?$
		III	$K_{PP}$	0	$t_H$	$u_H$	0	$E_X$	$p$	0	0	-	$P_{3Y}^X, K_{PP}, (u)_{III}, (\sigma_{aF})_K \leq [\sigma_{aF}]?$
		IIA	0	$P_{3Y}^P$	$\chi t_H$	$\chi u_H$	$\delta'$	$E_P$	$p$	$P_3$	$q_3$	-	Нагрузки на опоры и узлы в рабочем состоянии, $(\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}^* ?$
		IV	0	$P_{3Y}^X$	$-\delta t_H$	$-\delta u_H$	0	$E_X$	0	$P_3$	$q_3$	-	Нагрузки на опоры и узлы в холодном состоянии, $(\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}^* ?$
2	С заданными пружинными подвесками	I	0	$P_{3Y}^P$	0	0	0	$E_P$	$p$	$P_3$	$q_3$	-	$(u)_I, (\sigma)_I \leq [\sigma]?, (\sigma)_2 \leq [\sigma]_2^* ?$
		III	$K_{PP}$	0	$t_H$	$u_H$	0	$E_X$	$p$	0	0	-	$(u)_{III}, P_{3Y}^X, (\sigma_{aF})_K \leq [\sigma_{aF}]?$
		IIA	0	$P_{3Y}^P$	$\chi t_H$	$\chi u_H$	$\delta'$	$E_P$	$p$	$P_3$	$q_3$	-	Нагрузки на опоры и узлы в рабочем состоянии, $(\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}^* ?$
		IV	0	$P_{3Y}^X$	$-\delta t_H$	$-\delta u_H$	0	$E_X$	0	$P_3$	$q_3$	-	Нагрузки на опоры и узлы в холодном состоянии, $(\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}^* ?$
7	На действие нагрузки в холодном состоянии	IV	0	$P_{3Y}^X$	$-\delta t_H$	$-\delta u_H$	0	$E_X$	0	$P_3$	$q_3$	-	Нагрузки на опоры и узлы в холодном состоянии, $(\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}^* ?$

Таблица 5.4

**Высокотемпературные трубопроводы с трением по методике института “Гипрокаучук” и отрывом от опор**  
**Виды (номера), этапы и результаты расчетов по программе АСТРА-СТАЦ**

Вид (№)	Наименование расчета	Этапы расчета	Значения переменных параметров										Результаты этапа расчета
			$K_{ПП}$	$P_{3У}$	$T$	$u$	$\delta'$	$E$	$p$	$P_3$	$q_3$	Учёт трения	
1	С выбором пружинных подвесок	I	$K_U$	0	0	0	0	$E_p$	$p$	$P_3$	$q_3$	-	$P_{3У}^p, (u)_I, (\sigma)_I \leq [\sigma]?, (\sigma)_2 \leq [\sigma]_2?$
		IIА	0	$P_{3У}^p$	$\chi t_H$	$\chi u_H$	$\delta'$	$E_p$	$p$	$P_3$	$q_3$	+	Нагрузки на опоры и узлы в рабочем состоянии, $(\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}^*$ ?
		IV	0	$P_{3У}^x$	$-\delta t_H$	$-\delta u_H$	0	$E_x$	0	$P_3$	$q_3$	+	Нагрузки на опоры и узлы в холодном состоянии, $(\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}^*$ ?
		III	$K_{ПП}$	0	$t_H$	$u_H$	0	$E_x$	$p$	0	0	-	$P_{3У}^x, K_{ПП}, (u)_{III}, (\sigma_{aF})_K \leq [\sigma_{aF}]?$
2	С заданными пружинными подвесками	I	0	$P_{3У}^p$	0	0	0	$E_p$	$p$	$P_3$	$q_3$	-	$(u)_I, (\sigma)_I \leq [\sigma]?, (\sigma)_2 \leq [\sigma]_2?$
		IIА	0	$P_{3У}^p$	$\chi t_H$	$\chi u_H$	$\delta'$	$E_p$	$p$	$P_3$	$q_3$	+	Нагрузки на опоры и узлы в рабочем состоянии, $(\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}^*$ ?
		IV	0	$P_{3У}^x$	$-\delta t_H$	$-\delta u_H$	0	$E_x$	0	$P_3$	$q_3$	+	Нагрузки на опоры и узлы в холодном состоянии, $(\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}^*$ ?
		III	$K_{ПП}$	0	$t_H$	$u_H$	0	$E_x$	$p$	0	0	-	$(u)_{III}, P_{3У}^x, (\sigma_{aF})_K \leq [\sigma_{aF}]?$
7	На действие нагрузки в холодном состоянии	IV	0	$P_{3У}^x$	$-\delta t_H$	$-\delta u_H$	0	$E_x$	0	$P_3$	$q_3$	+	Нагрузки на опоры и узлы в холодном состоянии, $(\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}^*$ ?

Таблица 5.5

**Низко- и высокотемпературные трубопроводы (с учетом дополнительных режимов и испытаний)  
Виды (номера), этапы и результаты расчетов по программе АСТРА-СТАЦ**

Вид (номер) расчета	Наименование расчета	Этапы расчета		Значения переменных параметров										Результаты этапа расчета
				$K_{ПР}$	$P_{3У}$	$T$	$u$	$\delta'$	$E$	$p$	$P_3$	$q_3$	Учёт трения	
10	Полный с выбором пружинных подвесок	Этапы расчета №1												
		Дополнительные режимы ( $i \leq 3$ )		$K_{ПР}$	0	$t_i$	$u_n$	0	$E_X$	$p_i$	0	0	-	$(u)_{III}, (\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}, (\sigma_{aF})_K \leq [\sigma_{aF}]$
		Испытания	С заклиненными пружинами	$K_Y$	0	$t_{\Gamma}$	0	0	$E_{\Gamma}$	$p_{\Gamma}$	$P_3$	$q_{3\Gamma}$	-	$P_{3У}^r, (u)_I^r,$ $(\sigma)_I^{Th} \leq 1,35[\sigma]^{Th}, (\sigma)_2^{Th} \leq 1,7[\sigma]^{Th}$
			С распущенными пружинами	$K_{ПР}$	0	$t_{\Gamma}$	0	0	$E_{\Gamma}$	$p_{\Gamma}$	0	$\Delta q_{\Gamma}$	-	Подэтап 1, $P_{3У}^r$
				0	$P_{3У}^r$	$t_{\Gamma}$	0	0	$E_{\Gamma}$	$p_{\Gamma}$	$P_3$	$q_{3\Gamma}$	-	Подэтап 2, $(u)_I^r,$ $(\sigma)_I^{Th} \leq 1,35[\sigma]^{Th}, (\sigma)_2^{Th} \leq 1,7[\sigma]^{Th}$
11	Полный с заданными пружинами			Этапы расчета №2										
				Дополнительные режимы ( $i \leq 3$ )										
				Испытания (см. расчёт №10)										
3	Этап I расчета №1													
4	Этап I расчета №2													
5	Этап IIБ (IIА) расчета №2													
6	Этап III расчета №2													
8	Этап I расчета №1 + расчет №2													
12	Расчет №8 + дополнительные режимы + испытания													

Условные обозначения:  $K_{лр}$  – жёсткость пружинной цепи;  
 $P_{3у}$  – нагрузка на пружинную опору;  
 $K_y$  – условная жесткость пружинной цепи (“абсолютная” жесткость);  
 $T$  – перепад температур;  
 $u$  – перемещения заземлённых концов и опор;  
 $\delta'$  – монтажный растяг;  
 $E$  – модуль упругости;  
 $p$  – давление;

$P_3$  – сосредоточенные нагрузки (силы и моменты);

$q_3$  – распределённая нагрузка;

$\chi$  – коэффициент “усреднения” компенсационных напряжений для высокотемпературных трубопроводов; в АСТРА-ТЭС вместо  $\chi$  на этапе ПА принимается  $0,5 \cdot \chi$  (в соответствии с РД 10-249-98);

$\delta$  – коэффициент “релаксации” компенсационных напряжений;

“Учет трения” – итерационный учет трения об опоры, отрыва от опор и жестких подвесок;

$$q_{3Г} = q_3 + \Delta q_G;$$

$$\Delta q_G = \pi \cdot (D/2 - S)^2 \cdot \gamma_{гидр};$$

$\gamma_{гидр}$  – разность между удельными весами сред, заполняющими трубопровод, при испытаниях и в рабочем состоянии.

“н” – номинальный, “р” – рабочий, “х” – холодный, “г” – испытания, i –

дополнительные режимы;

$u_i$  – расчётные перемещения  $i$ -го этапа;

$P_{3у}^3$  – сила затяга пружиной опоры вне трубопровода;

$$[\sigma] = \min \{ R_{p0,2}^T / 1,5; R_m^T / 2,6; R_{mt}^T / 1,5 \} - \text{допускаемое напряжение};$$

$$[\sigma]_{RK} = \min \left\{ (2,5 - R_{p0,2}^T / R_m^T) R_{p0,2}^T; 2R_{p0,2}^T \right\};$$

$[\sigma]_{aF}$  – допускаемая амплитуда напряжений;

$$[\sigma]_2^* = \min \{ 1,3[\sigma], K_t R_{mt}^T / 1,5 \}; K_t = 1,25 - 0,375(\sigma)_1 / R_{mt}^T;$$

$$[\sigma]_{RK}^* = \min \{ [\sigma]_{RK}, K_t' R_{mt}^T / 1,5 \}; K_t' = 1,75 - 0,375(\sigma)_1 / R_{mt}^T;$$

$[\sigma]^{Th}$  – допускаемое напряжение при температуре испытаний;

$$P_{3Y}^p = -u_I^3 \cdot K_y - \text{для расчетов 1, 10; заданная рабочая нагрузка – для расчетов 2, 11, 12;}$$

$$P_{3Y}^x = P_{3Y}^p + (u_{III} - u_{II}) \cdot K_{PP} \cdot N;$$

$u_{III}$  – вертикальное температурное перемещение сечения подвески;

$u_{II}$  – собственное вертикальное перемещение точки подвеса пружинной опоры;

$N$  – число цепей (тяг) пружинной опоры;

$$P_{3Y}^s = P_{3Y}^p + (u_{II}^3 - u_{II}) \cdot K_{PP} \cdot N;$$

$u_{II}^3$  – вертикальное перемещение на этапе 2;

$P_{3Y}^r$  – нагрузка на пружинную опору при испытаниях;

Пружины при испытаниях **заклинены**:

$$P_{3Y}^r = -u_{II}^3 \cdot K_y;$$

$u_{II}^3$  – малое расчетное вертикальное перемещение в точке подвески на этапе испытаний (идеальное значение равно нулю).

Пружины при испытаниях **распущены**:

$$P_{3Y}^r = P_3^r - u_{II}^3 \cdot K_{PP} \cdot N; \quad P_3^r = P_{3Y}^p + (u_{III} - u_{II}) \cdot K_{PP} \cdot K_t \cdot N;$$

$u_{II}^3$  – вертикальные перемещения на первом подэтапе при испытаниях;

$K_t$  – коэффициент, учитывающий влияние температуры при испытаниях;

$$K_t = (t_{РАБ} - t_{ХОЛ} - t_{II}) / (t_{РАБ} - t_{ХОЛ}); \quad t_{II} = (t_{ГДР} - t_{ХОЛ}).$$



## 5.5. Программный модуль *АСТРА-ФОРМ*

Модуль *АСТРА-ФОРМ* позволяет определить требуемое число (или в требуемом частотном диапазоне) низших собственных частот и форм колебаний трубопроводной системы. Массы трубопроводов и технологического оборудования представляются в виде сосредоточенных масс, приведенных в заданные точки (сечения) расчетной модели и(или) в сечения, генерируемые средствами препроцессора *ПРЕ-АСТРА*. Массы имеют до шести (три линейных, три угловых) степеней свободы.

Трение в опорных конструкциях может быть учтено (по желанию) по оригинальной «инженерной» методике: жесткости «трения» при этом импортируются из модулей статического расчета и могут быть, по желанию пользователя, масштабированы. Возможен учет боковых жесткостей в пружинных и жестких подвесках.

Максимальное число динамических степеней свободы модели – **60 000**. Количество вычисляемых и учитываемых в расчете собственных частот и форм колебаний – до **4 000**.

На каждом участке-суперэлементе может быть дополнительно (к “статическим” опорам) задано до **100** амортизаторов – опор, обладающих заданными динамическими жесткостями, но не препятствующих статическим и температурным перемещениям трубопровода.

Вычисленные собственные частоты и формы колебаний могут либо непосредственно использоваться при оценке вибропрочности (отстройка от резонанса, см. [1, 2, 3, 4]), либо применяться программами *АСТРА-СЕЙСМ* (см. п. 5.6), *АСТРА-ВИБР* (см. п. 5.7) и *АСТРА-ДИН* (см. п. 5.8) при расчетном анализе сейсмической, вибрационной и динамической реакции трубопроводов методом разложения по собственным формам.

## 5.6. Программный модуль *АСТРА-СЕЙСМ*

Модуль *АСТРА-СЕЙСМ* выполняет расчет трубопроводных систем на сейсмостойкость как от действия только сейсмических нагрузок, так и от совместного действия давления, собственного веса системы и сейсмического воздействия. В качестве сейсмического воздействия можно задавать спектры ответов и/или ответные акселерограммы землетрясения на отметке крепления трубопровода в одно- или трехкомпонентном виде. Трение в опорных конструкциях может быть учтено (по желанию) по “инженерной” методике п. 5.5. Возможен учет боковых жесткостей в пружинных и жестких подвесках.

Применение программы для оценки сейсмостойкости корректно для трубопроводных систем, полностью удовлетворяющих условиям статической прочности (*АСТРА-СТАЦ*).

Результатами работы программы *АСТРА-СЕЙСМ* являются: сейсмические перемещения, ускорения, приведенные напряжения группы ( $\sigma_s$ )<sub>2</sub> (*АСТРА-АЭС*) или расчетные напряжения  $\sigma_{mms}$  и  $\sigma_{mms} + \sigma_{bs}$  (*АСТРА-ТЭС*) в сечениях суперэлементов (“участков”) и тройниковых соединениях,

сейсмические нагрузки на пружинные и жесткие подвески, амортизаторы, опорные конструкции и оборудование, силовые факторы в местной и общей системах координат. При одновременном задании нескольких вариантов сейсмических воздействий возможен выбор максимальных перемещений, напряжений и нагрузок по всем введенным воздействиям.

Сейсмическое воздействие характеризуется следующими ограничениями: число точек (частота-ускорение) при задании спектра ответов – от **2** до **10000**, количество задаваемых точек (время-ускорение) ответной акселерограммы землетрясения (моментов времени) – от **1** до **60 000**, количество точек (шагов), используемое в расчете – от **1** до **60 000**.

### **5.7. Программный модуль АСТРА-ВИБР**

Модуль **АСТРА-ВИБР** производит расчет на вибропрочность трубопроводных систем, реализуя требования Норм [1, 2, 3, 4, 7–10] и положения соответствующих монографий, рекомендаций и руководств [28, 82, 92] с использованием анализа параметров вынужденных установившихся детерминированных колебаний. Возможен учет боковых жесткостей в пружинных и жестких подвесках. Силовое нагружение задается для произвольных сечений схемы в полигармоническом виде.

Выполняются два вида расчета:

- определение допускаемых амплитуд виброперемещений (усилий, нагрузок на опоры и оборудование) при колебаниях трубопровода по каждой учитываемой собственной форме из условия достижения допускаемого значения максимальными напряжениями;

- расчет параметров вынужденных установившихся колебаний (амплитуд перемещений, нагрузок и напряжений) при заданных вибронагрузках.

Выполненный расчет позволяет дать оценки по следующим нормативным критериям:

- 1) отстройка низших собственных частот колебаний трубопровода от детерминированных частот возбуждающих нагрузок;

- 2) отсутствие виброударных режимов работы системы трубопроводов;

- 3) циклическая прочность элементов трубопровода с учетом вибронапряжений.

Результатами расчета являются амплитуды перемещений и напряжений во всех расчетных сечениях (в том числе, в тройниках), допускаемые напряжения для различных коэффициентов асимметрии циклов, силовые факторы в местной системе координат для каждой собственной или вынуждающей частоты.

Количество сечений на участке (суперэлементе), в которых может действовать полигармоническая сила – **300**. Число гармоник в задаваемой силе – **50**.

## 5.8. Программный модуль *АСТРА-ДИН*

Модуль *АСТРА-ДИН* осуществляет расчет трубопроводных систем на неустановившиеся динамические процессы, в соответствии с требованиями Норм [1–4, 7–10] в части оценки прочности при нестационарных (переходных) режимах и анализа аварийных ситуаций, связанных, в частности, с разрывами трубопроводов. Возможен учет боковых жесткостей в пружинных и жестких подвесках.

Силовые воздействия задаются в произвольных точках системы трубопровода в виде временных зависимостей давления и/или сосредоточенных сил, оцифрованных с равным или переменным шагом по времени.

Результатами расчета являются максимальные (за время воздействия) перемещения, усилия нагрузки на опоры и узлы, амплитуды приведенных напряжений (группа 4).

Длина реализации (число точек по времени задания нагрузок и шагов интегрирования) не должно превышать **60 000**. Количество проекций динамических сил (векторов), действующих на расчетную схему – до **2 000**.

## 5.9. Программный модуль *ПРЕ-АСТРА*

Модуль *ПРЕ-АСТРА* обеспечивает следующие режимы подготовки рациональной расчетной модели для семейства *АСТРА-НОВА* '2021:

- диалоговое задание расчетной модели с использованием прототипов, баз данных (по материалам, типам грунтов, сортаментам труб, отводов, тройников, переходов, арматур, фланцев и линзовых/сильфонных компенсаторов, пружинных и жестких подвесок, опор скольжения/качения, сейсмо-, вибро и динамических воздействий), визуализацией геометрии участков, проверкой вводимых данных и другими возможностями;

- автоматизированная расстановка масс (для динамических расчетов);

- визуализация расчетной модели (по большому и постоянно пополняемому набору параметров);

- определение и визуализация коллизий – недопустимо малых зазоров, касаний и пересечений труб.

Расчетные компоненты спектра ускорений  $a_i$  могут быть не только явно заданы пользователем (или выбраны им из базы сейсмоз воздействий), но и определены по заданной трехкомпонентной акселерограмме численным интегрированием по времени уравнений колебаний линейных осцилляторов с представительным набором задаваемых собственных частот и уровне демпфирования.

Масштабирование (зуммирование), сдвиги и повороты изображения всей модели и ее фрагментов, выбор цветовой палитры, видов и других параметров при визуализации расчетной модели осуществляется пользователем с помощью удобного современного Windows-интерфейса (манипулированием “мышью” и работой с развитой системой меню).

Изображение расчетной модели трубопровода может быть выведено одинарной линией, показывающей осевую линию трубопровода, или быть объемным благодаря использованию трехмерной графики (подробности – п.6 настоящего документа и в *Сеансе работы с комплексом* [76]).

### 5.10. Программный модуль *ПОСТ-АСТРА*

Модуль *ПОСТ-АСТРА* является “постпроцессором” комплекса *АСТРА-НОВА’2021* и обеспечивает следующие режимы работы с результатами расчетов:

- диагностика превышений расчетными параметрами критериальных значений (напряжения, нагрузки на опоры, перемещения-коллизии...);
- визуализация расчетной модели;
- визуализация перемещений для всех значимых этапов расчета, включая определение коллизий – недопустимо малых зазоров, касаний и пересечений труб в деформированных состояниях;
- визуализация внутренних усилий;
- визуализация напряжений с оценкой прочности по нормативным критериям;
- визуализация нагрузок на опоры, оборудование и строительные конструкции;
- анимация собственных форм колебаний и динамических реакций (перемещений, усилий и напряжений);
- графики зависимости динамических решений – перемещений, усилий, напряжений – от собственных частот (*-СЕЙСМ*, спектры) и времени (*-СЕЙСМ*, акселерограммы, *-ДИН*);
- выборочные (сводные) таблицы максимальных напряжений, перемещений, усилий и нагрузок;
- полные таблицы результатов расчета;
- формирование отчета;
- сохранение, переименование и удаление файлов результатов.

Подробное описание перечисленных режимов работы постпроцессора приведена в п.6.4 настоящего документа и в *Сеансе работы с комплексом* [76].

### 5.11. Программный модуль *АСТРА-СТАДИО*

Подсистема *АСТРА-СТАДИО* обеспечивает уточненный МКЭ-расчет температурных полей и напряженно-деформированного состояния, статической, циклической и сейсмической прочности следующих деталей трубопроводов при полной системе значимых нагрузок (внутреннее давление, вес и температурные деформации, осевая и поперечные силы, изгибающие и крутящий моменты на границах-торцах):

- 1) тройников ортогональных и неортогональных (косых) радиальных (сварных, штампосварных, штампованных и кованых, со сварными швами, накладками и плакирующим слоем);

2) отводов (гибов, колен) гнутых, крутоизогнутых, штампованных и секторных с учетом эллиптичности, разностенности (переменной толщины сечения) и примыкающих прямых труб;

3) косых стыков;

4) конических переходов;

5) линзовых и сильфонных компенсаторов осевых, угловых и сдвиговых (многоволновых, с учетом примыкающих прямых труб);

Подсистема обладает диалоговым таблично-графическим пре- и постпроцессором, может быть связана с базой данных типовых элементов, требует лишь необходимого минимума информации для автоматической генерации оптимальных по точности пространственно-оболочечных (для тонко- и “среднестенных” элементов) и объемных (для толстостенных деталей и системы “трубопровод-изоляция-грунт”) расчетных конечноэлементных моделей. Вычислительным “ядром” служит мощный верифицированный конечно/суперэлементный комплекс **СТАДИО** [9], имеющий богатый послужной список исследованных сложных объектов атомной, тепловой и гидроэнергетики, различных отраслей строительства и машиностроения.

Основные реализованные гипотезы: изотропия и линейная упругость металла (физическая линейность) и малость деформаций-перемещений (геометрическая линейность). Для грунта (подземные трубопроводы) принята физически нелинейная реологическая модель энергетического типа, зарекомендовавшая себя при численном моделировании трехмерных систем “основание-сооружение” [10].

Результаты расчета при заданных сочетаниях нагрузок:

– температуры (для стационарной задачи теплопроводности);

– перемещения (вариант – при единичных нагрузках – матрица податливости);

– значимые компоненты полных нормальных и касательных напряжений, главных напряжений и приведенных (эквивалентных по Треска и Мизесу) напряжений на внутренней, срединной и наружной поверхностях;

– оценка статической, циклической и сейсмической прочности по критериям, принятым в соответствующих отраслях [1–12].

Характерное время счета на Pentium 1,7GHz для линейных пространственных и трехмерных задач (тройники, отводы,...) – 60-200сек, для нелинейных трехмерных задач анализа подземных трубопроводов – до 30мин.

До 2003-2005 гг. **АСТРА-СТАДИО** использовалась преимущественно самими разработчиками при выполнении заказных научно-исследовательских работ (как правило, для уточненного расчета деталей, не удовлетворивших критериям прочности при расчете по **АСТРА-НОВА** или другим программам расчета трубопроводов).

Такая возможность существует и приветствуется НИИЦ СтаДиО и сейчас. Более того, неизменным остается принципиальный, ранее провозглашенный подход: *программные системы такого класса должны использоваться только расчетчиками-профессионалами.*

## 5.12. Диагностические и информационные сообщения

### 5.12.1. Общие положения


Диагностические и информационные сообщения выводятся *Препроцессором*, расчетными модулями и *Постпроцессором*

Все диагностические и информационные сообщения, полученные при проверке заданного проекта с помощью пункта *Проверка данных* меню *Данные* или в процессе расчета, доступны для просмотра в окне *Сообщения*. Дополнительно, диагностические и информационные сообщения выводятся в *Файлы исходных данных*, файлы *Превышения критериев*, *Протокол сходимости*, *Протокол расчета* и *Сводные таблицы* меню *Результаты*, а также при визуализации результатов расчёта (см. *Сеанс работы* с комплексом *АСТРА-НОВА*’2021).

При проверке задаваемых и/или введенных в расчет исходных данных модели выводятся предупреждающие сообщения или сообщения, диагностирующие ошибки. При выдаче предупреждающих сообщений ввод данных или процесс расчета продолжается, при выдаче диагностических сообщений об ошибке ввод данных (до момента исправления) или расчет прекращаются).

Дополнительно, каждая расчетная программа комплекса проводит проверки вводимых ею воздействий и собственных параметров расчета. Перечень соответствующих диагностических сообщений приводится в *Сеансе работы* (см. *Меню Расчет*).

Диагностические и информационные сообщения выводятся.

- *Препроцессором* в процессе задания расчетной модели пользователем. В случае ввода недопустимого (недоверного) значения какого-либо параметра или пропуска необходимого данного появляется всплывающее сообщение в системной области уведомлений (значок АСТРА-НОВА  на панели инструментов “systray”) программы, что позволяет корректно сформировать расчетную модель.
- *Препроцессором* при обращении пользователя к пункту *Проверка данных* (меню *Данные*). При этом, в дополнение к информации, описанной в следующем подпункте, в окне *Сообщения* доступна также информация, выдаваемая расчетным модулем при проверке исходной модели без проведения самого расчета.
- *Препроцессором* – при выборе одного из пунктов меню *Расчет* и нажатии кнопки *ОК* – перед проведением расчета, при этом анализируются заданные параметры и характеристики на не противоречивость, полноту и достаточность. В случае обнаружения несоответствий введенных значений или других ошибок, информация выводится в окне *Сообщения*.

- *Расчетным модулем (СТАЦ, ФОРМ)* после ввода исходных данных модели и/или динамического воздействия (*СЕЙСМ, ВИБР, ДИН*) и в процессе расчета.
- *Постпроцессором* после окончания расчета в *Файлы результатов, Файлы исходных данных, Протокол сходимости, Сводные таблицы и Сводные таблицы пользователя* (меню *Результаты*) и в окне *Сообщения*.

#### 5.12.2. Сообщения об ошибках при проверке исходных данных

Сообщения об ошибках имеют формат: “*Ошибка:*”, далее текст сообщения.

Диагностируются следующие ошибки в задании исходных данных (расчетных параметрах, характеристиках материала, сортаментов труб, элементов трубопровода, опорных конструкций, и т.д.):

- модули упругости, допускаемые напряжения, диаметры, толщины, не положительны на детали, утонения или жесткости опор отрицательны;
- при задании тройников и врезок проверяется соосность магистрали;
- проводится полная диагностика задания геометрии (осевой линии) участка, в частности, на возможность “вписывания” отводов;

Кроме того, дополнительно **расчетный модуль** может диагностировать следующие ошибки:

- диагностируются ошибки, сводящиеся, по сути, к выходу значения введенного параметра за допустимый диапазон значений:
- число участков, узлов меньше или больше допустимых значений;
- номер начального узла участка больше номера конечного узла;
- номер начального узла участка меньше 1 или больше номера последнего внутреннего узла;
- не соблюдены ограничения на общее число сечений, опор скольжения (качения, направляющих), упругих опор-пружин, линзовых и сильфонных компенсаторов, арматуры, сосредоточенных сил и компенсаторов и т.д. на участке;
- модули упругости, пределы прочности, диаметры, толщины не положительны на участке, утонения или жесткости опор отрицательны;
- тройник задан менее чем на трех участках, примыкающих к тройниковому узлу;
- в одном сечении задано более одной опоры;
- не выполнены условия: номинальная толщина стенки меньше половины наружного диаметра; утонение меньше номинальной толщины стенки; радиусгиба больше половины наружного диаметра; длина детали неположительная.
- на участке при сварном тройнике длина первой (последней) детали меньше половины диаметра магистрали. Увеличьте расстояние. Это сообщение может появляться при учете податливости тройников для штуцерных концов.
- значение других параметров больше или меньше допустимого значения;

### 5.12.3. Предупреждающие и информационные сообщения при проверке исходных данных

Предупреждающие сообщения имеют формат: “Предупреждение:”, далее текст сообщения.

Выдаются, в частности, следующие предупреждения:

Расчетными модулями **СТАЦ, ФОРМ**

1) “На участке есть длинные пролеты без промежуточных сечений” – если длина перегона превышает 10 наружных диаметров трубы.

2) “На участке опоры в отводе. Точных зависимостей податливости и напряжений в отводе с опорой не существует”.

Расчетным модулем **СТАЦ**:

– “В связи с отсутствием пружин (пружинных опор) на участках схемы, расчет с подбором пружин заменен на расчет с заданными характеристиками пружин.”.

– “В связи с отсутствием коэффициентов трения в опорах на участках схемы расчет с трением заменен на расчет без учета трения в опорах”.

Выводятся также следующие **информационные сообщения**, касающиеся проводимого расчета и наличия некоторых элементов в расчетной модели:

Расчетными модулями **СТАЦ, ФОРМ**

– “Данные для формирования матричного суперэлемента не заданы”.

– “Матричных суперэлементов не задано”.

Кроме того, присутствует следующая информация: общее количество элементов в расчетной модели, число внутренних узлов, общее число узлов, число тройниковых соединений (в том числе сварных), заделки в порядке возрастания номеров узлов, опорных элементов в сечениях и узлах, отводов, переходов, компенсаторов, жестких элементов, арматур, колец сечений, стык, фланцев.

Расчетным модулем **СТАЦ**:

“Трение – методика института Гипрокаучук”.

“Трение – методика НПО ЦКТИ”.

“В расчете пружины при испытании заклинены/распущены”.

### 5.12.4. Сообщения программ во время проведения расчета

Во время счета любая программа комплекса АСТРА-НОВА’2021 может выдать диагностические сообщения (см. диагностику соответствующей программы в документе *Сеанс работы с комплексом* [76]), говорящие о том, что переданные программе параметры или введенные из файлов данные имеют недопустимые значения, Или, например, во время работы программ **СТАЦ, ФОРМ** может появиться сообщение: “Матрица жесткости системы не положительно определена”.

Сообщение свидетельствует о плохой обусловленности матрицы разрешающей системы уравнений. Одна из возможных причин такого сообщения – отсутствие в расчетной схеме трубопровода необходимого числа связей, препятствующих его смещениям как жесткого целого. Другая вероятная причина для сложных систем – чрезмерная жесткостная “контрастность” (или)



гибкость участков-суперэлементов. Чрезмерную контрастность и (или) гибкость можно уменьшить путем введения в расчетную схему дополнительных узлов на гибких участках.

Во всех случаях обнаружения ошибок выдаются соответствующие сообщения (в том числе, в *Протокол расчета*), и счет прекращается. Цифровая нумерация сообщений не ведется. Если при повторном пропуске задачи сообщение повторяется, следует обратиться к разработчикам программы, прислав по электронной почте описание проблемы, последовательности действий, Screenshot и файл-проект (файл с расширением *apr*), а в случае необходимости и архивированные файлы из рабочей директории.

#### **5.12.5. Сообщения Постпроцессора**

После проведения расчета для анализа результатов можно использовать выводимые *Постпроцессором*: диагностики в окне *Сообщения*, файлы и сводные таблицы, в которые поступают диагностические сообщения, перечисленные для каждого вида расчета в разделе *Меню Расчет* (см. *Сеанс работы с комплексом* [76]). При визуализации перемещений в окне *Сообщения* выводятся также сообщения о возможных коллизиях деформированной схемы для заказанного этапа расчета.

## 6. Сеанс работы с комплексом (краткое описание)



Подробное описание приводится в отдельном приложении к данному документу – в том *Сеанс работы с комплексом* [76].

При создании расчетной модели трубопровода *АСТРА-НОВА’2021* позволяет воспользоваться следующими возможностями:

- использование современного визуально-графического препроцессора;
- импорт данных из альтернативных программ расчета (*СТАРТ*, *CAESAR II*) и САПР (*AutoCAD*, *CADWorx*).

Сеанс работы с комплексом состоит, в общем случае, из:

1) построения, корректировки и визуализации рациональной расчетной модели с возможностью использования файлов, созданных для предыдущих версий комплекса (препроцессор *ПРЕ-АСТРА*);

2) выполнения требуемого типа и вида расчета:

- расчёта по выбору основных размеров (*АСТРА-ДЕТАЛЬ*),
- расчета на статическую и циклическую прочность (*АСТРА-СТАЦ*),
- вычисления значимых собственных частот и форм колебаний (*АСТРА-ФОРМ*),
- расчета на сейсмические воздействия (*АСТРА-СЕЙСМ*),
- расчета на вибропрочность (*АСТРА-ВИБР*),
- расчета на неустановившиеся динамические процессы (*АСТРА-ДИН*);
- уточненного расчета (по пространственно-оболочечным и объемным схемам МКЭ) температурного поля, НДС, статической, циклической и сейсмической прочности и предельной нагрузки для наиболее нагруженных деталей трубопроводов (в том числе автофретированных) (*АСТРА-СТАДИО*).

3) обработки и представления результатов расчета, включая выдачу сводных и/или выборочных таблиц, визуализацию перемещений, нагрузок, усилий, напряжений, графики динамических результатов, анимацию

собственных форм и вынужденных колебаний трубопроводной системы (постпроцессор **ПОСТ-АСТРА**).

Появившаяся ранее и развитая в версии **АСТРА-НОВА'2021** возможность редактирования баз данных позволяет не только использовать в проекте, но и сохранять для последующих моделей трубопроводов детали, материалы, грунты и сейсмоздействия, характеристики которых занесены пользователем в базу данных.

Во время сеанса работы поддерживаются соглашения, принятые в среде Windows: открытие и закрытие файлов (проектов), работа с графическими окнами, падающими, всплывающими и контекстными меню, буфером обмена, поиск, выделение и копирование информации и т.д. Буфер обмена можно использовать, например, при формировании текстовых и графических материалов для отчетных документов.

Время от времени рекомендуется сохранять свой проект. Выход из сеанса работы традиционен для Windows.

Во время сеанса работы можно получить всю справочную информацию, используя контекстно-зависимую справку.

Расчетная модель трубопровода строится пользователем в соответствии с положениями, изложенными в настоящем документе и в документе *Сеанс работы с комплексом* [76].

## 6.1. Использование визуального интерактивного препроцессора

Комплекс **АСТРА-НОВА’2021** обладает собственным мощным многовариантным препроцессором, который позволяет задавать и диагностировать расчетную модель трубопровода в визуальном интерактивном режиме.

Ниже кратко описана процедура построения расчетной модели.

1. Для создания новой расчетной модели нажмите клавишу *Новый* в меню *Файл* или соответствующую кнопку на панели инструментов *Стандартная*.
2. Задайте *Общие данные* расчетной модели.
3. В меню *Редактор* или на одноимённой панели инструментов выберите. *Добавить участок*.
4. Задайте данные первой детали участка, её физико-механические свойства и геометрию, воспользовавшись соответствующими диалоговыми окнами и (или) *Панелью ввода*. Если заданные в диалоговых окнах по умолчанию параметры Вас не устраивают, измените их на нужные. При помощи закладки *Детали* на *Панели ввода* Вы можете полностью задать все характеристики детали. Диалоги, ориентированные на *Базы данных* по трубам и характеристикам материалов, можно пропустить, воспользовавшись кнопкой *Отмена*, либо выбрать оттуда подходящие материал и трубу. Также, имеется возможность перед заданием расчётной модели самостоятельно сформировать пользовательские Базы данных (см. *Редактирование БД*).
5. Первоначально созданный участок состоит из одной детали, для добавления следующей детали используйте команды *Вставить деталь* или *Добавить дополнительные смещения* в меню *Редактор* или на одноимённой панели инструментов. Деталь или смещение будут добавлены к тому сечению, которое помечено указателем сечения (крестиком) в графическом окне с изображением схемы. Геометрию осевой линии трубопровода меняйте с помощью закладки *Геометрия* на *Панели ввода*. По умолчанию добавляемая деталь наследует характеристики предыдущей заданной Вами. При необходимости внесите изменения с помощью закладок *Панели ввода*.
6. Рекомендуемой последовательностью задания геометрии трубопровода является следующая:
  - 6.1. С помощью добавления деталей задается геометрия осевой линии с точками ее излома. Геометрия осевой линии может быть импортирована, см. *Импорт*.
  - 6.2. В точках излома, там, где это требуется по проекту, вставляются отводы (гибы, колена, секторные) с указанием радиуса изгиба. Для этого служит команда *Вставить отвод* в меню *Редактор* или на одноимённой панели инструментов.

- 6.3. Указываются дополнительные сечения (точки расстановки опор, пружин и т.п.) при помощи смещений и/или добавления деталей (см. соответствующие команды п.5). Задаются опорные конструкции, фланцы, сосредоточенные силы и т.д. (закладка *Сечения* на *Панели ввода*). Пункты 6.3 и 6.4 можно поменять местами в зависимости от Ваших личных предпочтений при задании геометрии. Могут потребоваться дополнительные данные из пункта 9 (см. далее).
- 6.4. Задаются арматура, компенсаторы, переходы, элементы неколецевого сечения (закладка *Детали* на *Панели ввода*).
7. Задайте остальные участки расчетной модели.
8. Введите характеристики тройников (панель *Редактор*, кнопка *Тройник* или *Панель ввода* закладка *Узел*).
9. С помощью меню *Данные* откорректируйте параметры схемы и задайте, если это необходимо, данные для моделирования трубопроводов бесканальной прокладки, температурные истории, дополнительные сечения для задания динамических (вибрационных) воздействий, матричные суперэлементы для моделирования присоединенного к схеме оборудования или других трубопроводных систем. При выполнении этого пункта, возможно придется опять обратиться к пункту 6 указанного сценария. Проверьте условия закрепления схемы: с помощью ПК **АСТРА-НОВА** можно выполнить расчет только *кинематически неизменяемых систем*.
10. В работе с вводом исходных данных Вам помогут обширные возможности визуализации по выбранным Вами параметрам, включая поиск коллизий (меню *Данные* пункт *Визуализация исходных данных*), разнообразные способы редактирования (меню *Редактор*), включая возможность откатов, Ваш здравый смысл и ангельское терпение. Не забывайте сохранять проект, чтобы не потерять результаты Вашего кропотливого труда.
11. Если Вы исполнили п.п. 1–10, то переходите к выполнению расчетов (меню *Расчет*). Рекомендуется ***начинать с расчета по выбору основных размеров (ДЕТАЛЬ) или на статическую и циклическую прочность (СТАЦ)*** либо, для дополнительной интегральной оценки адекватности расчетной модели – ***с расчета собственных частот и форм колебаний (ФОРМ)***.
12. Пользуясь меню *Результаты* оцените результаты расчета. Если коллизий (недопустимых перемещений, свидетельствующих о соприкосновении труб при деформировании ТС) и превышения критериев прочности нет, можно приступать к следующему шагу.
13. К данным участков добавьте информацию, необходимую для расчета собственных частот и форм колебаний (амортизаторы, демпферы, сосредоточенные массы, массовые моменты инерции и динамические степени свободы). Задание амортизаторов и демпферов осуществляется в закладке *Сечения* на *Панели ввода*. Задание сосредоточенных масс, массовых моментов инерции и динамических степеней свободы может

- осуществляться автоматически, с использованием меню *Данные пункт Автоматическая расстановка масс* и, при необходимости, “вручную” с помощью пунктов *Динамические степени свободы* и *Сосредоточенная масса* – при наличии сосредоточенных масс и массовых моментов (*Панель ввода, закладка Сечение*).
14. Оцените правильность расстановки динамических степеней свободы с помощью просмотра расстановки масс (меню *Данные пункт Визуализация исходных данных*).
  15. Проведите расчет собственных частот и форм колебаний (см. *Расчет собственных частот и формы колебаний*).
  16. Введите информацию для нужного динамического расчета (меню *Данные пункты Сейсмические воздействия, Вибрационные воздействия, Динамические воздействия*).
  17. Проведите нужный динамический расчет (см. также *Расчет на сейсмические воздействия, Расчет на вибрационные воздействия, Расчет на динамические воздействия*).
  18. После успешного проведения любого из расчетов доступны все результаты по нему: визуализация и анимация, файлы текстового формата и вывод результатов в табличном виде (меню *Результаты*).
  19. Температурное поле, статическое и сейсмическое напряженно-деформированное состояние, статическую, циклическую, сейсмическую прочность и предельную нагрузку для наиболее нагруженных деталей (в том числе автофретированных) можно уточнить с помощью расчета методом конечных элементов (МКЭ) в пространственно-оболочечной и/или трехмерной постановках в среде **АСТРА-СТАДИО** (см. также *МКЭ расчёт элементов АСТРА-СТАДИО*).
  20. Если при задании исходных данных были допущены неточности и/или ошибки, при запуске расчёта или при активации пункта *Проверка данных* меню *Данные* выдаются диагностические сообщения об этом. На предупреждения надо обратить внимание, а ошибки необходимо исправить, после чего повторить запуск расчета.

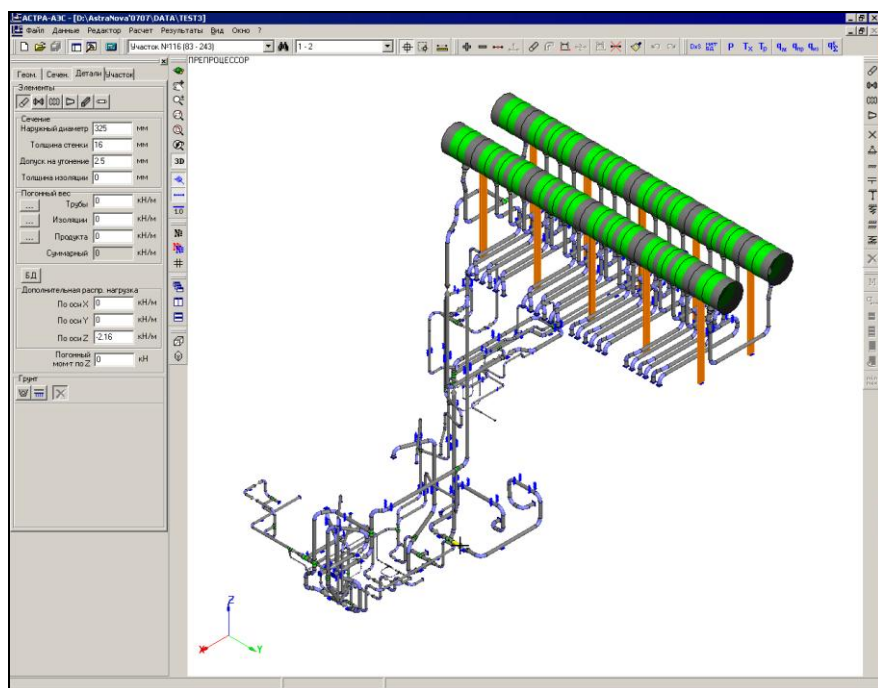


Рис. 6.1 Визуально-графический препроцессор

Во время сеанса работы проводится проверка информации на допустимость вводимых значений, как во время непосредственного ввода данных, так и после формирования всей расчетной схемы с помощью пункта *Проверка данных* меню *Данные*. Результаты такой проверки исходных данных выводятся в окне *Сообщения*, причем, при двойном нажатии левой клавишей мыши на диагностическое сообщение можно сразу изменить значение параметра, оказавшись в поле его ввода. Визуализация геометрии участка, всей модели или ее фрагментов (осевой линией или как твердотельной) совместно с опорами, пружинами, фланцами, арматурой и другими деталями позволяет проверить правильность задания расчетной модели (рис. 6.1). Возможна визуализация множества параметров расчетной модели трубопровода, например, давление (рис. 6.2), температура, распределенная нагрузка по осям координат, расстановка масс (рис. 6.3).

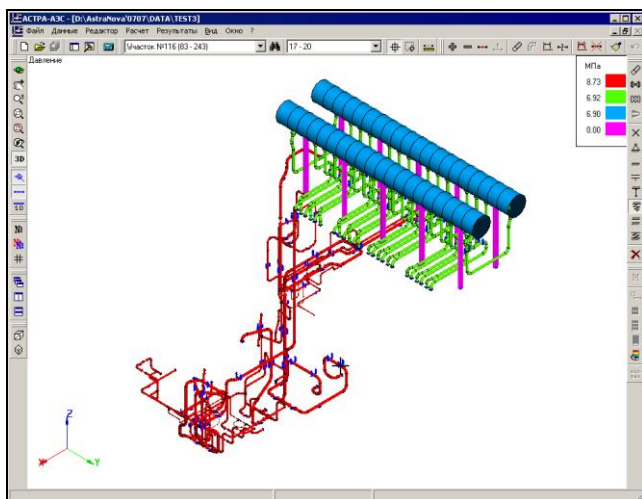


Рис. 6.2 Визуализация давления

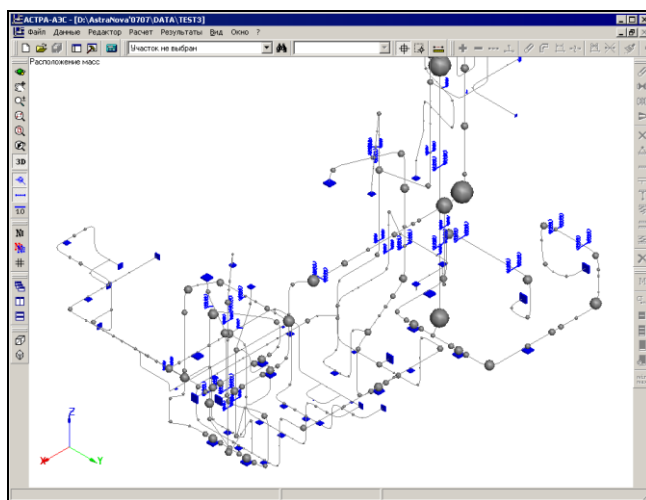


Рис. 6.3 Визуализация расстановки масс



## 6.2. Импорт данных из альтернативных программ расчета и САПР

6.2.1. ПК **АСТРА-НОВА'2021** позволяет импортировать данные из различных “популярных” САПР, а затем на основе САПР-модели производить автоматическую генерацию расчетной суперэлементной модели трубопроводной системы (**anp**-файл). Разумеется, для создания “полноценной” расчетной модели ТС необходимо средствами препроцессора **АСТРА-НОВА** дополнительно задать необходимые параметры, не содержащиеся, как правило, в САПР-моделях (физико-механические характеристики материалов, типы опор и пружин, режимы нагружения, величины нагрузок и воздействий и др.).

В настоящее время поддерживается импорт данных из файлов следующих типов:

- файлы обмена чертежами **AutoCAD** (**dxf**-файлы);
- внешние файлы САПР **CADWorx/PIPE** (**pmf**-файлы) (рис. 6.4);
- **pcf**-файлы фирмы INTERGRAF (**SmartPLANT**, **PLANT 3D**);

6.2.2. Также возможен импорт моделей трубопроводных систем из других широко эксплуатируемых программных комплексов прочностного расчета трубопроводов и оборудования:

- **ini**-файлы **СТАРТа** (отечественный ПК прочностного расчета “несложных” неатомных трубопроводов);
- **cii**-файлы **CAESAR II** (ПК – международный “стандарт” прочностного расчета неатомных ТС);
- **pvp**-файлы **PVP Design** (отечественный ПК прочностного расчета сосудов и аппаратов нефтехимии);

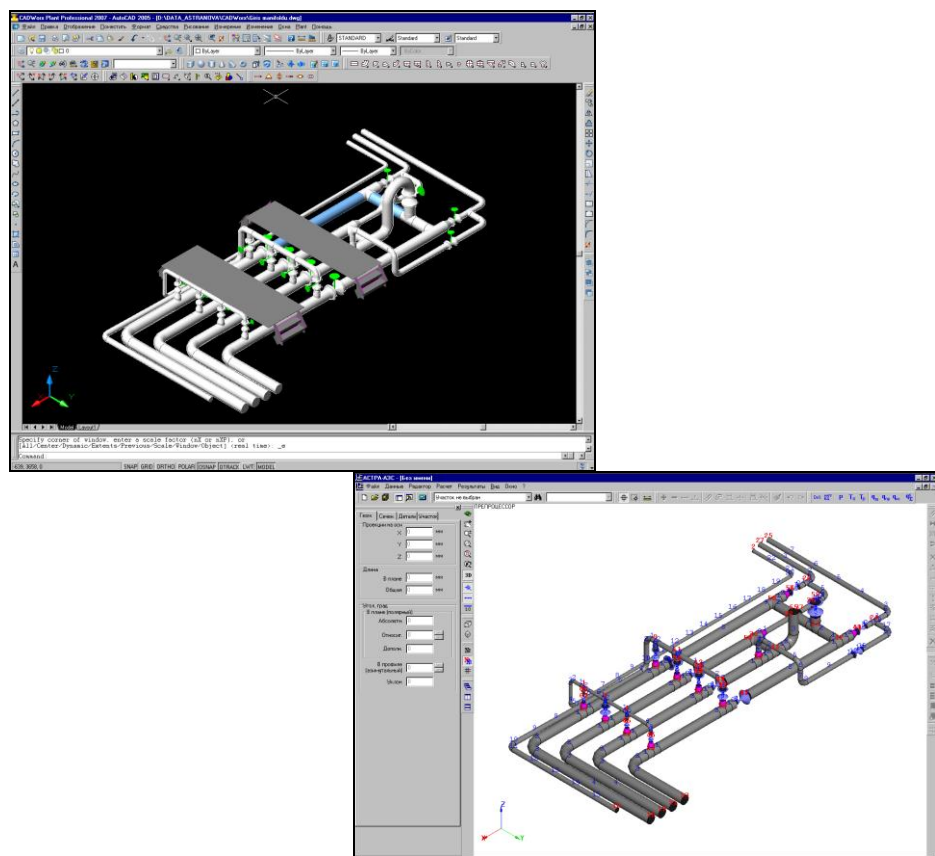


Рис. 6.4 Импорт в *АСТРА-НОВА* модели, созданной в *CADWorx/PIPE*

### 6.3. Проведение расчетов

Для проведения расчетов следует в меню *Расчет* выбрать тип расчета (рис. 6.5, СТАЦ, ФОРМ,...), задать вид и параметры расчета (рис. 6.6), используя соответствующие окна задания, и выполнить расчет, нажав кнопку *Расчет*. В любой момент проведения счета его можно прекратить. В процессе выполнения расчета в окнах просмотра (рис. 6.7) выдается диагностика ошибок на этапе ввода и проверки исходных данных и диагностика превышений критериев прочности на всех содержательных этапах расчета. Также “бегущей строкой” обозначается ход расчета (этапы, итерации, сходимости и т.п.).

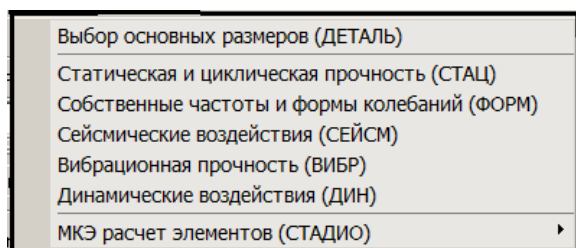


Рис. 6.5 Типы расчетов по *АСТРА-НОВА*

Из-за ошибок в данных или невозможности выполнения последующих этапов расчета при превышениях некоторых критериев прочности счет прекращается, при этом для просмотра и анализа причины останова на экране появляются окна с файлами исходных данных и результатов, а в окне диагностики - соответствующие сообщения. Кроме того, также можно использовать протоколы расчета (пункт *Протоколы* меню *Результаты*) и визуализацию доступных результатов.

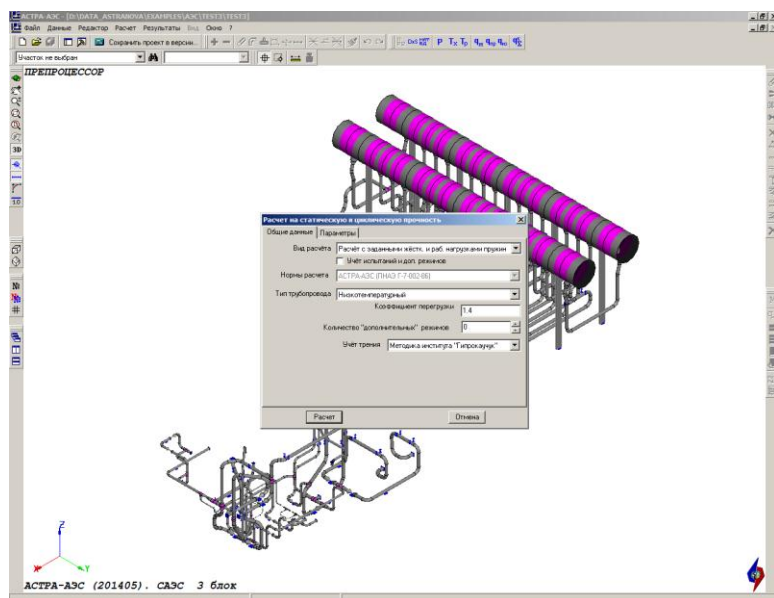


Рис. 6.6 Задание вида и параметров расчета (на примере АСТРА-СТАЦ)

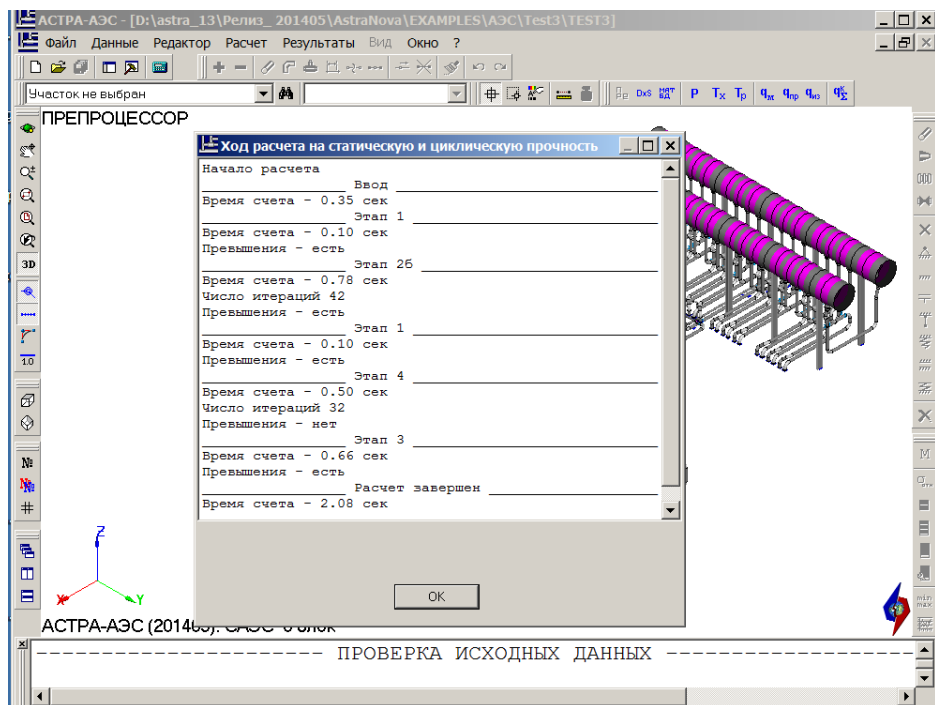


Рис. 6.7 Диагностика в процессе расчета

## 6.4. Постпроцессор

После проведения расчёта в случае превышения критериев прочности соответствующая информация доступна для экспресс-анализа в окне *Сообщения*. Для дальнейшего просмотра, оформления и визуализации результатов выполненных расчетов предназначены меню *Результаты* и *Вид*.

В случае превышения критериев прочности для экспресс-анализа “болезненных” результатов можно просмотреть справочные файлы. *Сводные и/или выборочные таблицы* и *Сводные таблицы пользователя* (в формате HTML, MS Office и Open Office) помогут быстро и интегрально проанализировать и документировать результаты расчетов, а развернутые таблицы исходных данных и результатов – провести углубленный анализ.

В постпроцессоре реализованы разнообразные режимы визуализации расчетных перемещений (деформированные состояния по этапам расчета, см. рис. 6.8), усилий и приведенных и относительных напряжений (всех расчетных групп – цветовые картины, см. рис. 6.9), визуализация и анимация форм собственных колебаний для выбранных пользователем из всех вычисленных частот (рис. 6.10). Визуализация результатов существенно облегчает анализ результатов расчета. При визуализации результатов расчета можно видеть полученные числовые значения перемещений, напряжений, усилий и нагрузок в указанных с помощью “мыши” точках расчетной модели.

При визуализации допускается изменять градацию цветов и использовать подсветку. Манипулируя “мышью” и (или) комбинируя клавиши *CTRL* и *SHIFT*, можно легко осуществить вращение, перемещение и зуммирование изображения. Используя буфер обмена Windows, можно выделять нужные фрагменты изображения (или полную модель) для последующего использования при документировании результатов расчета.

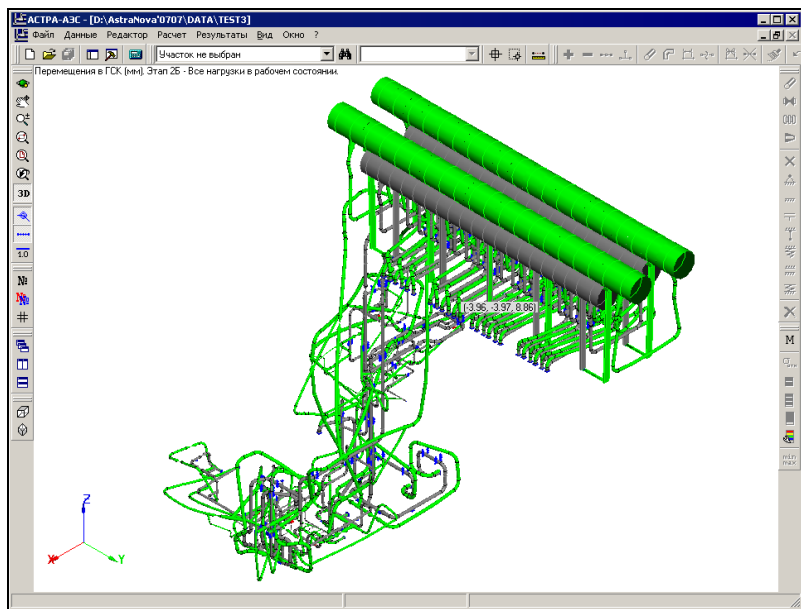


Рис. 6.8 Визуализация перемещений

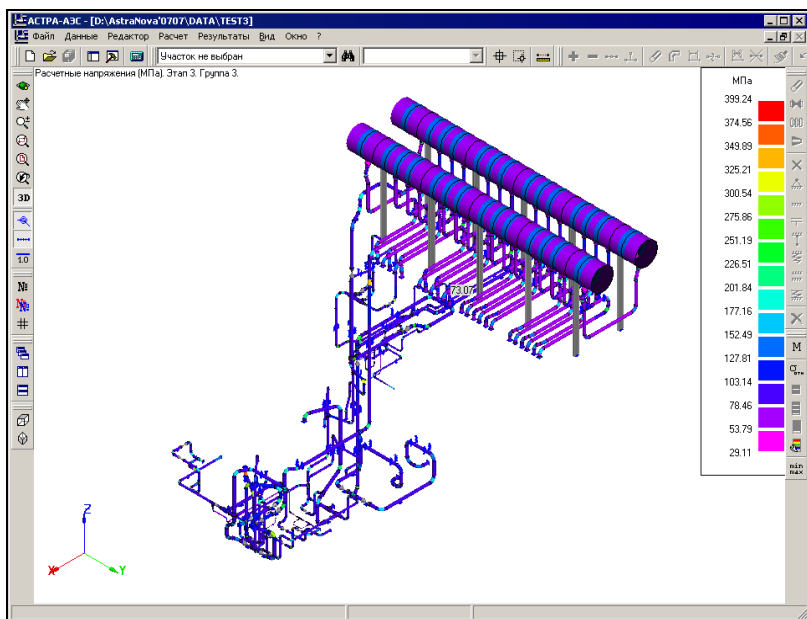


Рис. 6.9 Визуализация напряжений

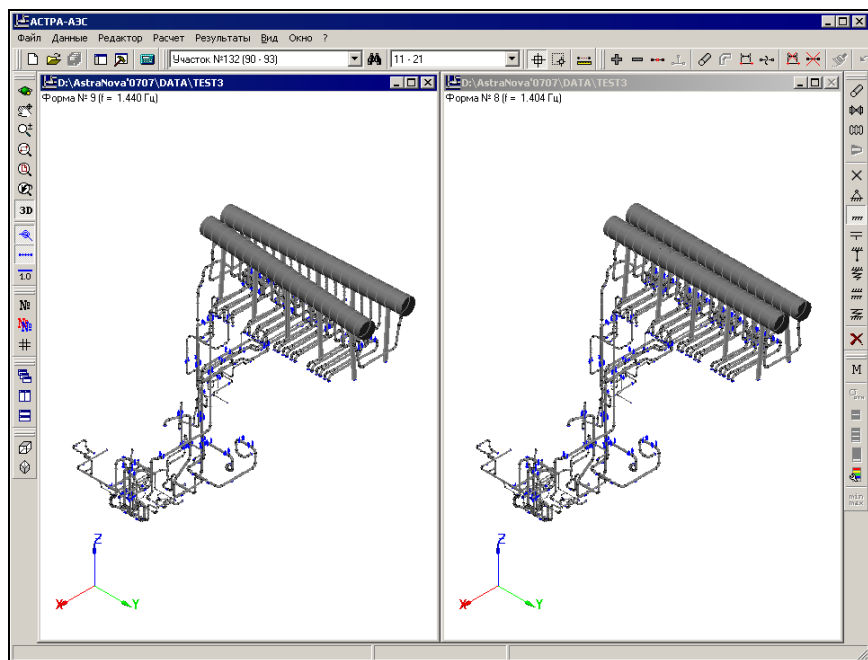


Рис. 6.10 Анимация собственных форм колебаний



## 7. Инсталляция комплекса программ семейства *АСТРА-НОВА*

### 7.1. Соглашение по директориям

Для работы комплекса *АСТРА-НОВА* в создаваемой при инсталляции директории-папке **AstraNova** (пользователь может дать директории другое имя) размещаются следующие три директории:

- директория **BIN**, содержащая фиксированный набор программных модулей комплекса;
- директория **DATABASES**, содержащая пополняемые базы данных по сталям, грунтам и фланцам;
- директория пользователя (по умолчанию – **DATA**), в которой будет проводиться сеанс работы, и где размещаются исходные данные и результаты расчета; может быть размещена на любом доступном пользователю диске, независимо от расположения остальных директорий.

### 7.2. Соглашение по файлам

Исходные данные расчетной модели трубопроводной системы хранятся в файлах с расширениями:

- **.anp** (геометрические, физико-механические, нагрузочные и др. свойства модели, сейсмоздействия – спектры ответа и/или акселерограммы – вибрационные и динамические воздействия),
- рабочие файлы программы создаются в той же директории, где находятся исходные данные расчета и имеют расширение **.\_xx**, где **xx** – номер файла; после окончания расчета эти файлы удаляются.
- результаты расчетов записываются в ту же директорию в файлы одноименные файлу с исходными данными.
- результатам работы программ комплекса соответствуют файлы со следующими расширениями:

<b>АСТРА-СТАЦ</b>	<b>.apu, .ite, .rsta, .lsta, .prtc</b>
<b>АСТРА-ФОРМ</b>	<b>.hfr, .frm, .flx, .flr, .prtf</b>
<b>АСТРА-СЕЙСМ</b>	<b>.acs, .rsei, .lsei, .prts, .smlf</b>
<b>АСТРА-ВИБР</b>	<b>.rvib, .prtv</b>
<b>АСТРА-ДИН</b>	<b>.rdyn, .prtd, .ldyn</b>

### 7.3. Поддержка проектов предыдущих версий *АСТРА-НОВА*

Комплекс программ *АСТРА-НОВА* позволяет открывать файлы с исходными данными схемы, созданные предыдущими версиями комплекса *АСТРА-НОВА*.

Комплекс	Расширение файла
<i>АСТРА-НОВА 6.1, 6.2</i>	<b>dat</b>
<i>АСТРА-АЭС-99,-2001*</i>	<b>apr</b>
<i>АСТРА-НЕФТЕХИМ-99,-2001*</i>	<b>npr</b>
<i>АСТРА-ТЭС-2001*</i>	<b>tptr</b>
<i>АСТРА-НОВА’2003*, ’2005, ’2007, ’2009, ’2011, ’2013, ’2015, ’2017</i>	<b>anp</b>

\*Примечание: в указанных версиях воздействия хранятся в отдельных файлах (.ssm – сейсмическое, .vbr – вибрационное, .dyn – динамическое).

### 7.4. Комплект поставки

В *полный комплект* поставки входят модули препроцессора *ПРЕ-АСТРА*, все расчетные модули (*АСТРА-СТАЦ*, *АСТРА-ФОРМ*, *АСТРА-СЕЙСМ*, *АСТРА-ВИБР*, *АСТРА-ДИН*, *АСТРА-ДЕТАЛЬ*, *АСТРА-СТАДИО*), модули постпроцессора *ПОСТ-АСТРА*, служебные программы комплекса, исходные данные и результаты примеров расчета.

*Минимальный комплект* включает модули *ПРЕ-АСТРА*, *АСТРА-СТАЦ*, *ПОСТ-АСТРА*, служебные программы комплекса, исходные данные и результаты примеров расчета.

*Университетская (образовательная)* версия отличается от “коммерческой” не набором функций и качественных возможностей, а лишь более строгими ограничениями на размерность моделей (снижено допускаемое число узлов, суперэлементов, собственных частот и форм колебаний).

Пользователю поставляется:

- Программные модули в архивированном виде (.exe и .dll);
- файлы примеров-проектов расчета – с расширениями **.anp** (*АСТРА-НОВА*);

Комплексы программ семейства **АСТРА-НОВА** поставляются в виде CD-диска и электронного ключа защиты (HASP или USB, локального или сетевого). Поставка с локальным ключом предназначена для функционирования на одной IBM-совместимой ПЭВМ (операционная система Windows 98, ME, NT, 2000, XP, Vista, 7, 8, 10) без ограничения по времени. Информация на дистрибутивном CD-диске сохраняется и может использоваться для неоднократной инсталляции (в том числе, на разных машинах). Число ПЭВМ, на которых одновременно и независимо может эксплуатироваться комплекс, определяется количеством электронных ключей защиты (для локальных ключей) или числом рабочих мест, прописанных в сетевом ключе.

При отсутствии лицензионного ключа поставленный (или скачанный по Интернету) комплекс работает в *демо-режиме*.

## 7.5. Инсталляция

**ВАЖНО:** Запуск программы инсталляции должен осуществляться от имени Администратора. Если у Вас нет таких прав, обратитесь к системному администратору.

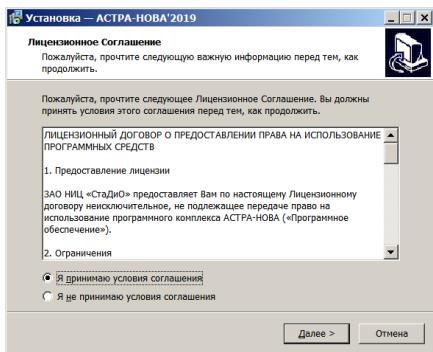
Порядок установки программы **АСТРА-НОВА** на компьютер следующий:

- Вставьте инсталляционный диск **АСТРА-НОВА** в CD-ROM.
- Запустите программу **Setup.exe**, расположенную в директории **Install** на **CD**, и следуйте инструкциям мастера установки.

### Шаг 1



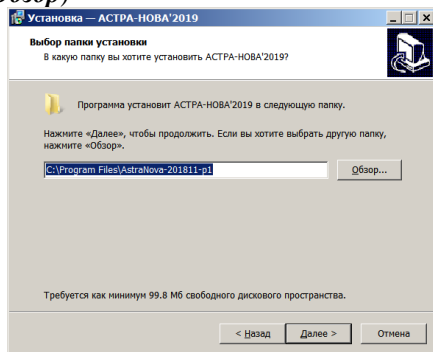
(Лицензионное соглашение) Для продолжения установки следует принять условия Лицензионного договора



### Шаг 2



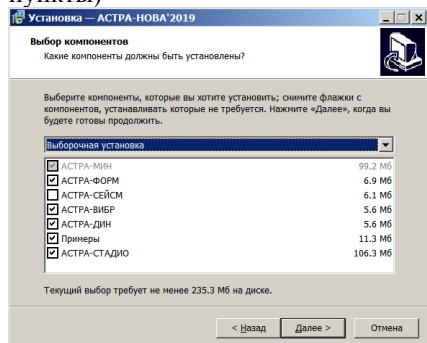
(выбор папки, в которой будет находится файл программы - AstraNova.exe, если необходимо измените выбранную по умолчанию папку, воспользовавшись кнопкой **Обзор**)



### Шаг 3



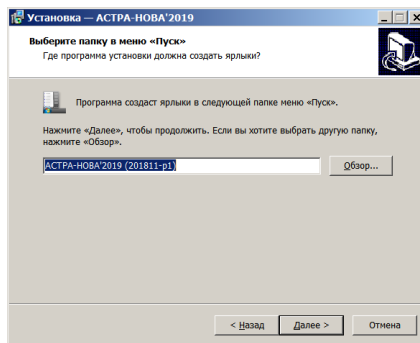
(выбор необходимых модулей программы. Чтобы можно было просматривать в демо режиме все компоненты комплекса, выберите все пункты)



### Шаг 4



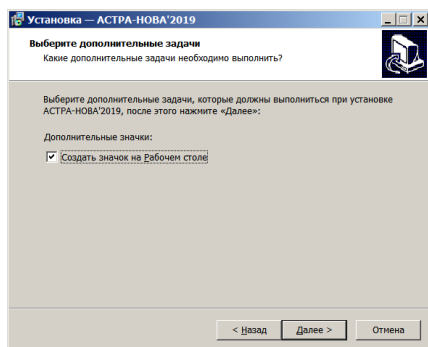
(указание названия группы в группе Программы в меню Пуск рабочего стола Windows)



### Шаг 5



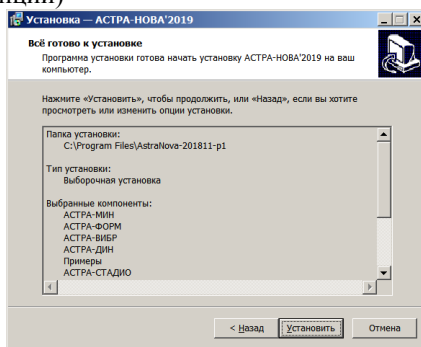
(создание ярлыка на рабочем столе)



### Шаг 6



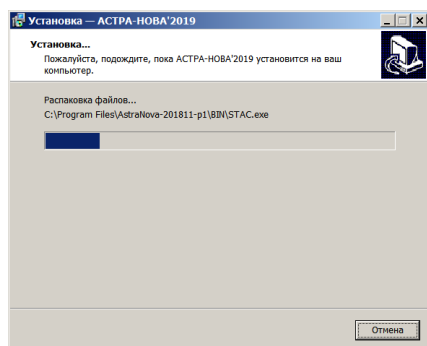
(проверка выбранных компонент и опций)



## Шаг 7



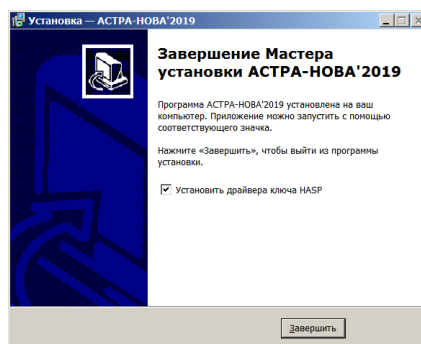
(процесс инсталляции)



## Шаг 8



(завершение установки программы *АСТРА-НОВА* и инсталляция драйверов ключа)



## Шаг 9

(установка ключа HASP HL)

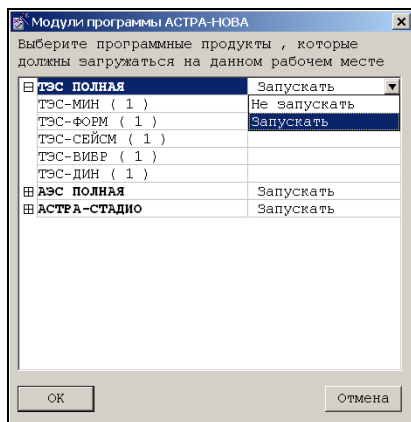
Порядок установки электронного ключа для программы *АСТРА-НОВА*:

- Установите электронный ключ защиты HASP HL в USB-порт компьютера. Сетевой ключ может быть установлен, как на сервере, так и на любом компьютере сети.
- Установите драйвера устройства HASP, если это необходимо (например, если не выполнялся Шаг 8 или сетевой ключ устанавливается на сервере). Для этого следует воспользоваться программой *HASPUserSetup.exe*, которая расположена на диске *АСТРА-НОВА* в директории *HASP\Runtime Environment\Setup*.
- **Обратите внимание**, если выбраны нормы, лицензия на расчет по которым отсутствует в электронном ключе, программа будет работать в **Демо-режиме**. Для выбора необходимых норм воспользуйтесь пунктом *Общие данные* в меню *Данные*.
- В случае возникновения проблем с ключами HASP HL проконсультируйтесь с Вашим системным администратором. Для диагностирования и настройки работы ПК *АСТРА-НОВА*: с электронными ключами запустите HASP License Manager Admin Control Center (Центр управления и администрирования менеджера лицензий HASP) при помощи web-интерфейса <http://localhost:1947>.

## Шаг 10

(выбор загружаемых модулей для программы с сетевым ключом)

Программный комплекс **АСТРА-НОВА** с сетевым ключом может запускаться с различным набором модулей в зависимости от комплекта поставки программы. Для настройки конкретного рабочего места используется утилита **Config.exe**, которая расположена в директории **BIN** программы и, если это необходимо, запускается при первом запуске комплекса **АСТРА-НОВА**.



## Шаг 11

(проверка работоспособности программы)

- Войдите в сеанс работы с комплексом, дважды “кликнув” по иконке **АСТРА-НОВА’2021**.
- Для проверки работоспособности программы можно воспользоваться тестовым примером **Demo.apr**, который расположен в папке **...\DATA\DEMO**. Этот пример входит в обязательный комплект поставки и может быть просчитан без электронного ключа защиты.
- Примеры расчетов реальных трубопроводных систем с возможными элементами и характерными приемами моделирования в случае их установки при инсталляции (шаг 3) находятся в директории **...\DATA\EXAMPLES** (варьируются в зависимости от инсталлированной отраслевой ветви).
- Детальное описание исходных данных и результатов расчетов тестовых примеров содержится в отдельном документе “**АСТРА-НОВА**. Тестовые примеры”, который может быть предоставлен пользователям по специальному соглашению.

**Внимание!!!** По желанию пользователя число поставляемых «тестовых» примеров может быть существенно увеличено (в том числе, тестами на подземные трубопроводы, матричные суперэлементы и уточненный МКЭ-анализ деталей ТС).

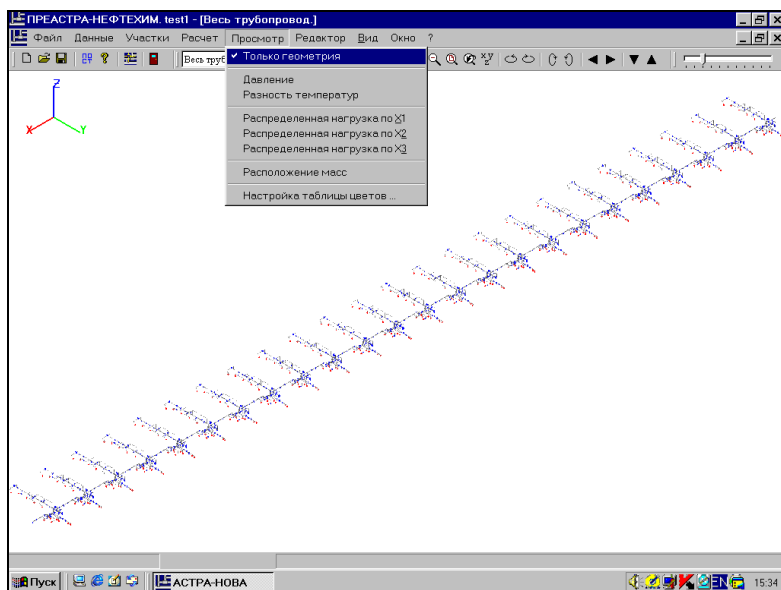


Рис. 7.1.1 Пример TEST1 (*АСТРА-НЕФТЕХИМ*) – полная модель, состоящая из 24 одинаковых ветвей (768 суперэлементов, 433 узла, 7128 элементов)

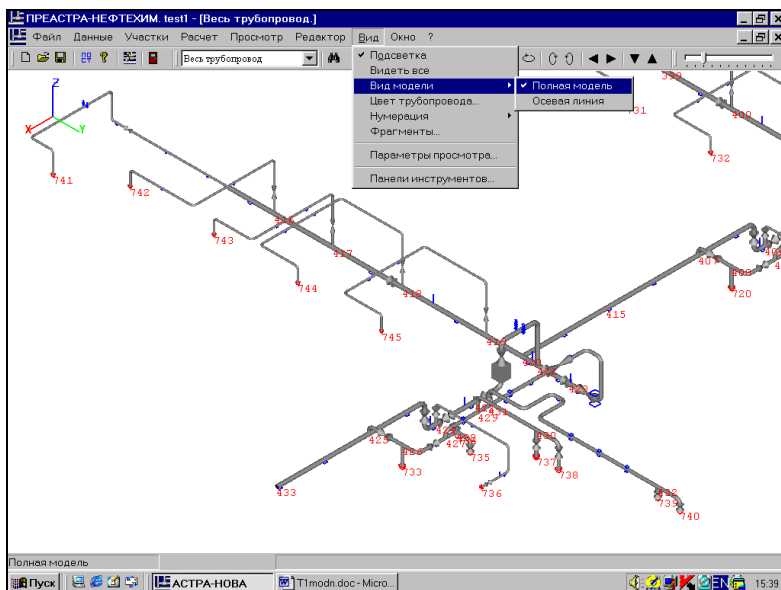


Рис. 7.1.2 Пример TEST1. Фрагмент завершающей части модели

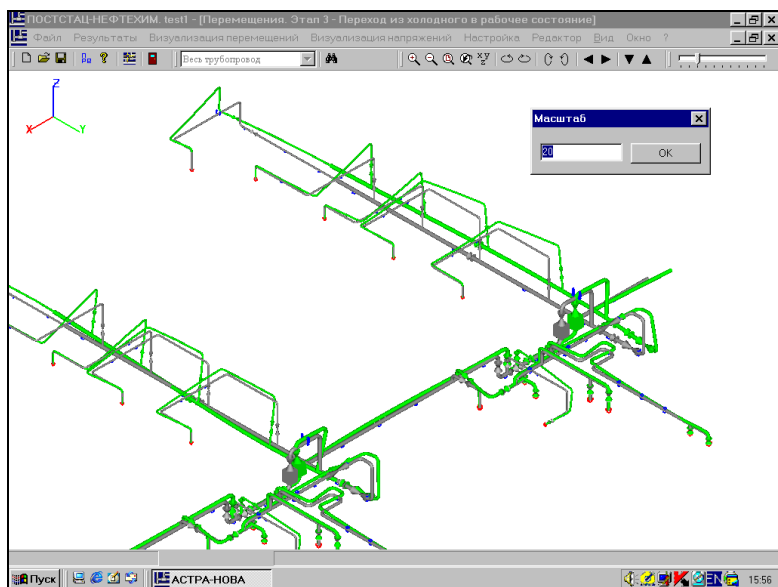


Рис. 7.1.3 Пример TEST1. Расчет на статическую и циклическую прочность – визуализация перемещений этапа 3 (переход из холодного в рабочее состояние)

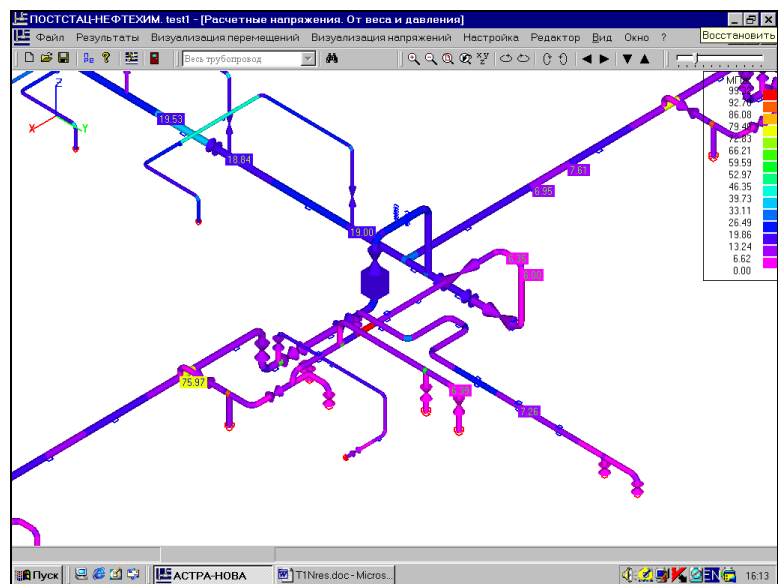


Рис. 7.1.4 Пример TEST1. Расчетные напряжения от веса и давления



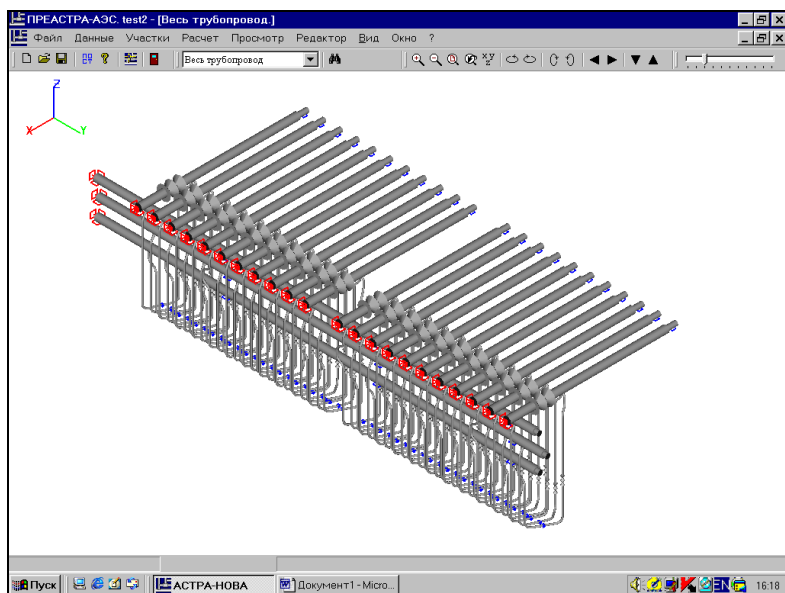


Рис. 7.2.1 Пример TEST2. Общий вид модели – 289 суперэлементов, 223 узла, 2182 элемента

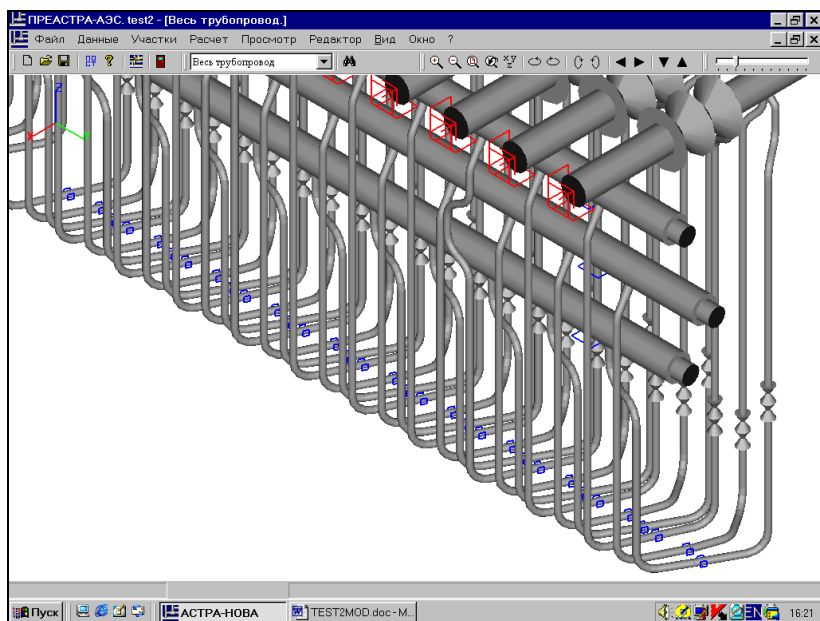


Рис. 7.2.2 Пример TEST2. Фрагмент модели

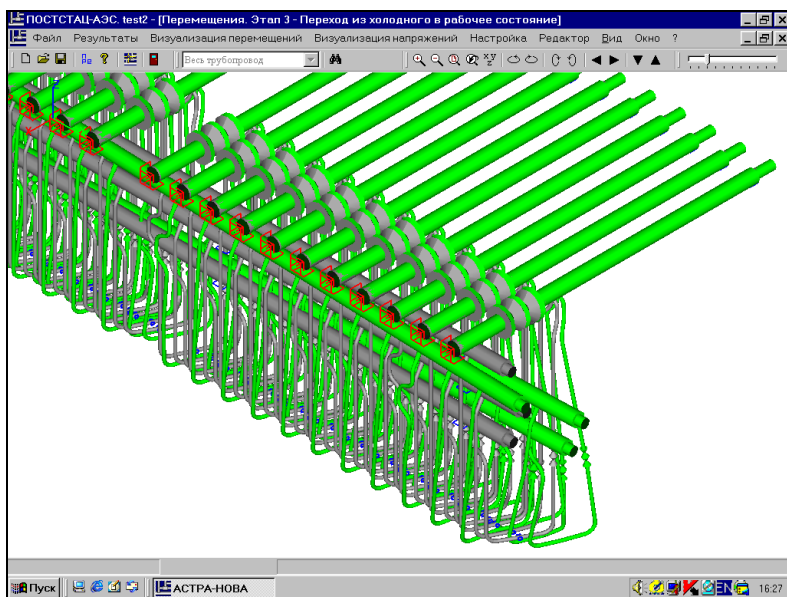


Рис. 7.2.3 Пример TEST2. Перемещения при переходе из холодного в рабочее состояние

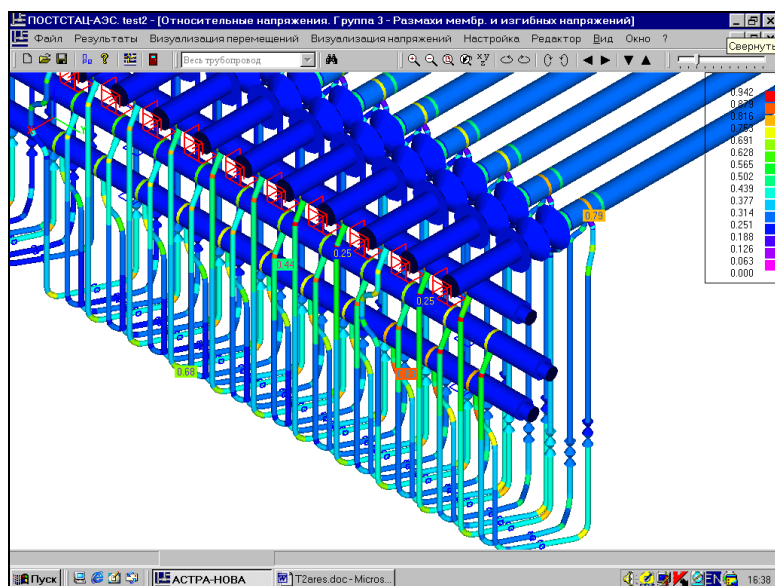


Рис. 7.2.4 Пример TEST2. Относительные напряжения по группе 3 (размахи напряжений)

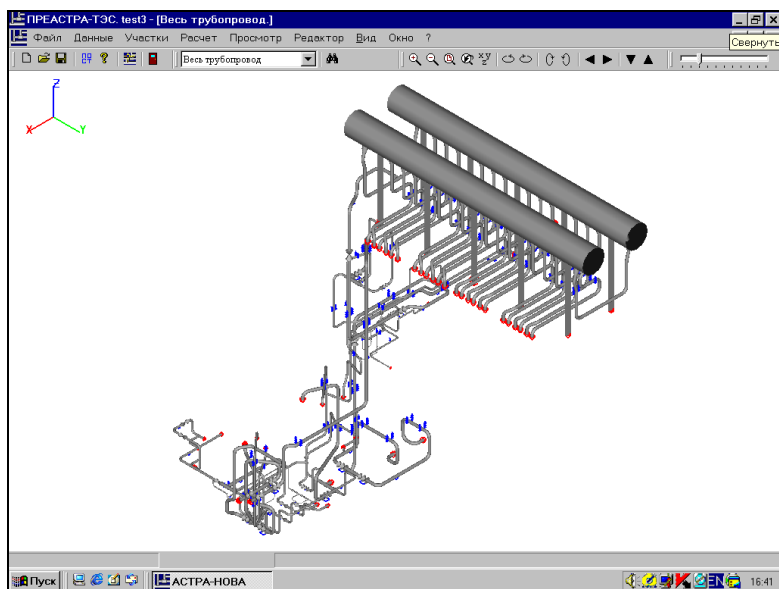


Рис. 7.3.1 Пример TEST3. Полная расчетная модель – 179 суперэлементов, 116 узлов, 1831 элемент

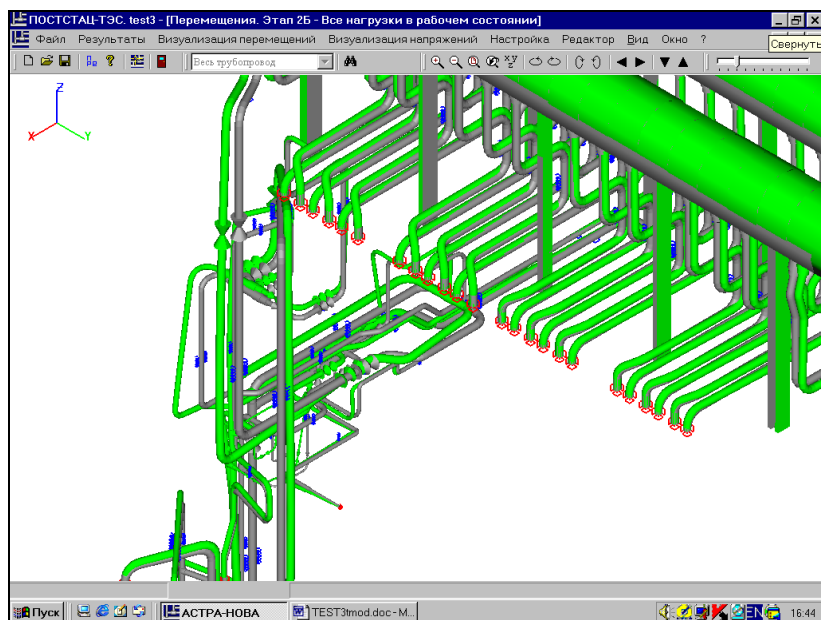


Рис. 7.3.2 Перемещения на этапе 2Б (фрагмент модели)

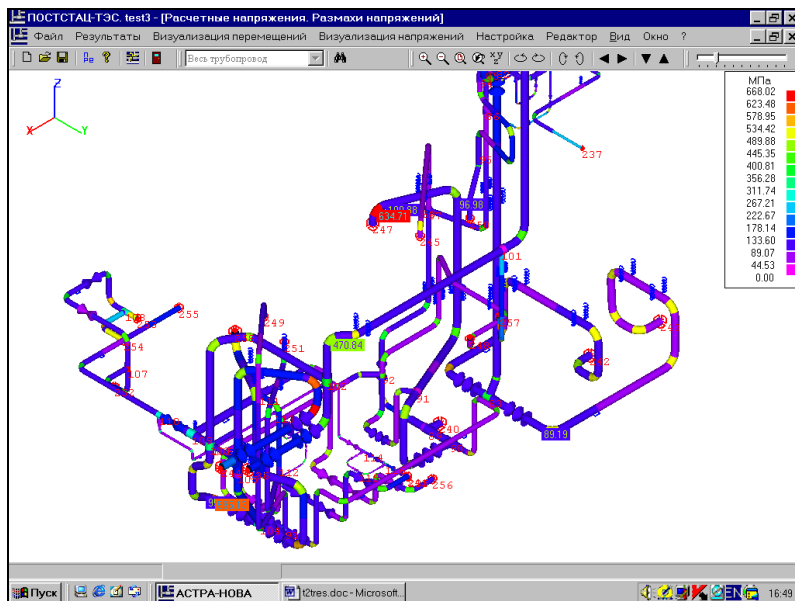


Рис. 7.3.3 Размахи напряжений (фрагмент модели)

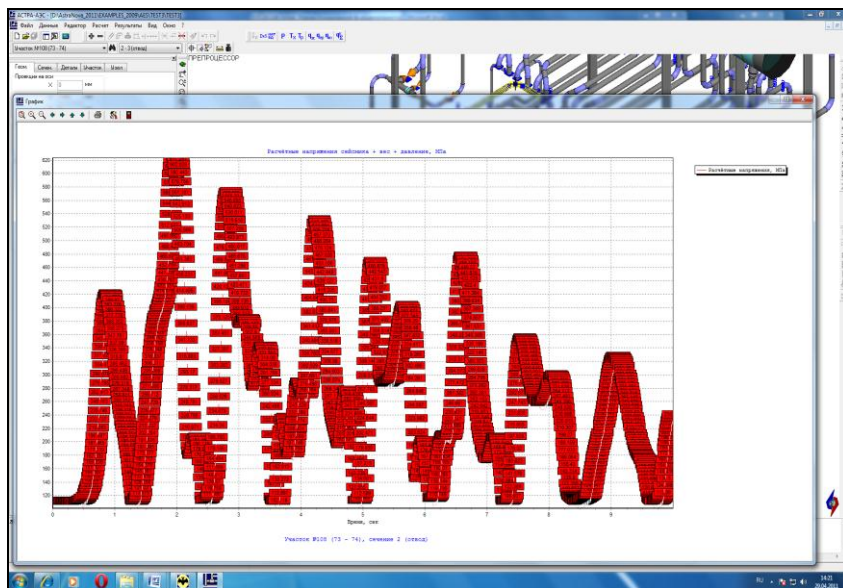


Рис. 7.3.4 Оцифрованные графики напряжений в сечении от сейсмоздействия, заданного акселерограммой

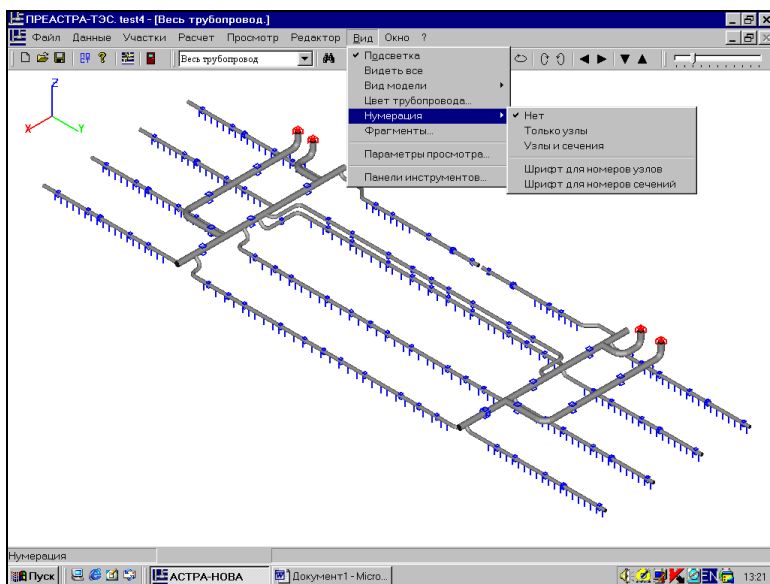


Рис. 7.4.1 Пример TEST4. Расчетная модель – 56 суперэлементов, 50 узлов, 620 элементов

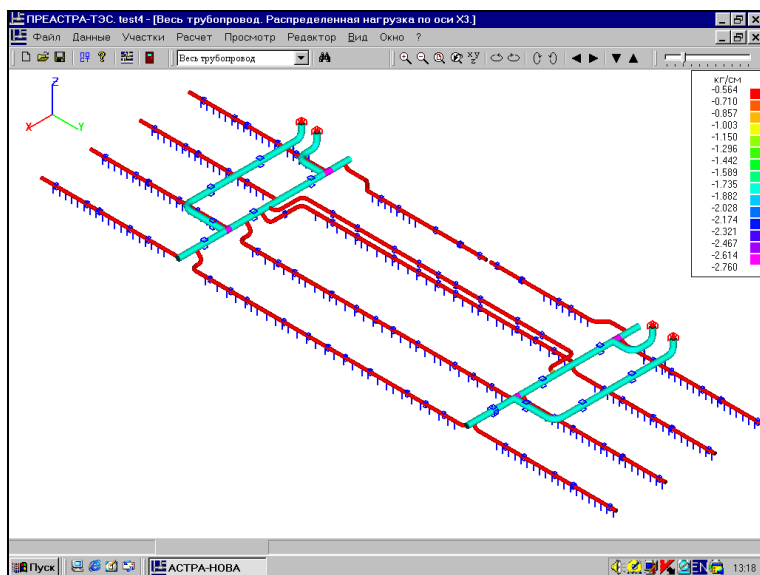


Рис. 7.4.2 Пример TEST4. Распределенная нагрузка расчетной модели по вертикальной оси

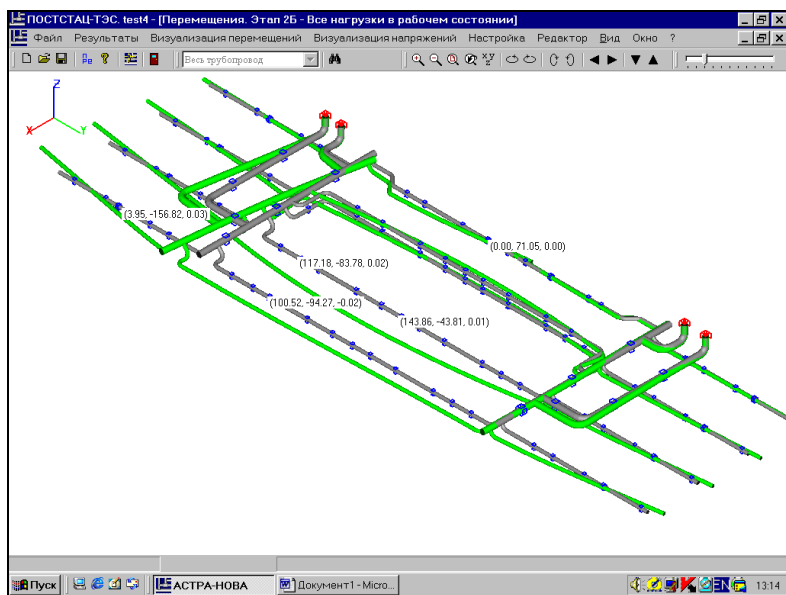


Рис. 7.4.3 Перемещения “Все нагрузки в рабочем состоянии ” (масштаб 20)

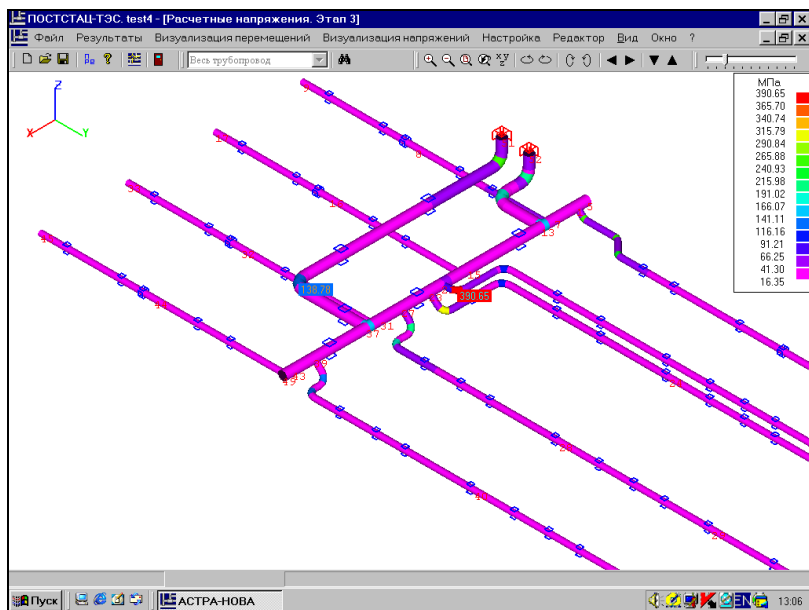


Рис. 7.4.4 Пример TEST4. Расчет по АСТРА-ТЭС, напряжения на 3 этапе

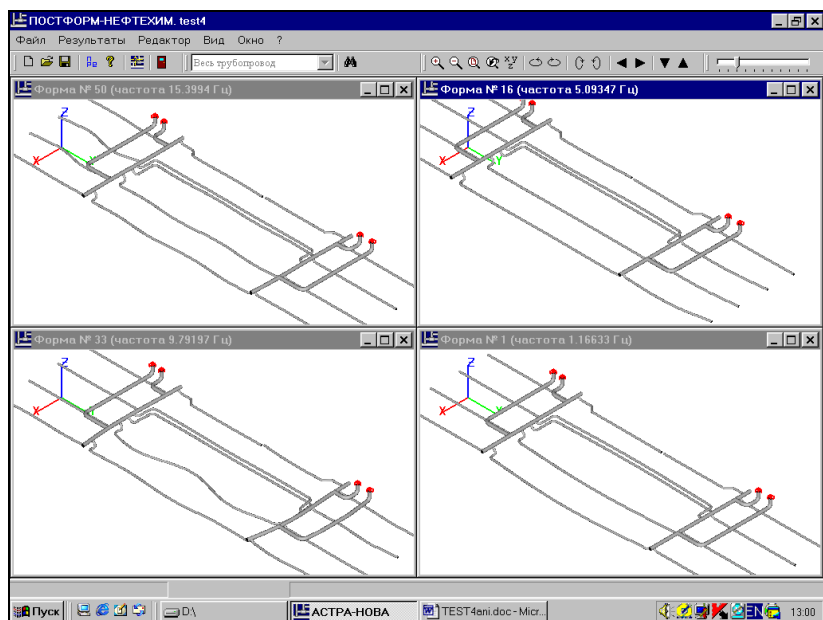


Рис. 7.4.5 Пример TEST4. Анимация форм собственных колебаний для четырех частот. Общее число степеней свободы расчетной модели 635, число определяемых частот – 50, число итераций – 82

## 8. Сопровождение и обновление семейства АСТРА-НОВА

**8.1.** Сопровождение и обновление легально приобретенной версии комплекса (или нескольких комплексов семейства) осуществляется поставщиком – разработчиком или дистрибьютором – в течение 12 месяцев после зафиксированной даты поставки.

*Сопровождение* включает:

- экспресс-обучение пользователей по взаимосогласованной программе;
- “горячую” телефонную линию в рабочие часы и ответы на вопросы пользователей по e-mail,
- выезд специалиста на место в случае невозможности решить вопрос по телефону или по e-mail,
- анализ “нестандартных” ситуаций и консультативную помощь при расчетах сложных систем;
- размещение и постоянное обновление полезной информации на сайте разработчика/поставщика [www.stadyo.ru](http://www.stadyo.ru);
- замена электронного ключа в случае его неумышленного повреждения.

Обновление версии (при выходе нового релиза – не реже одного раза в 5 – 6 месяцев) может выполняться либо представителями поставщика по запросу пользователя, либо самими пользователями – скачкой новой версии с сайта разработчика НИЦ СтаДиО ([www.stadyo.ru](http://www.stadyo.ru)) или дистрибьютора.

**8.2.** Полноценное сопровождение и обновление (п. 8.1) легально приобретенной версии комплекса за “пределами” первых 12-и месяцев выполняется при условии заключения соответствующего договора на научно-методическое сопровождение. При отсутствии такого договора пользователь неограниченно долго может эксплуатировать свою необновляемую версию, а из услуг поставщика доступны информация на сайте, замена электронного ключа (при его неумышленном повреждении) и, при обнаружении пользователем ранее невыявленных неточностей (некорректных режимов) программ, замена соответствующих модулей на исправленные.

**8.3.** Специализированные “полноценные” курсы обучения, включающие не только изучение возможностей ПК АСТРА-НОВА, но и (что, как показывает практика, более важно и дается большими усилиями) общие вопросы построения расчетных моделей, нормативно-методическую базу выполнения прочностных расчетов и ряд других, проводятся разработчиком в рамках отдельного договора по программе, опубликованной на сайте [www.stadyo.ru](http://www.stadyo.ru).



## Литература

1. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002–86. М., Энергоатомиздат, 1989 г.
2. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды. РД 10-249–98 (с Изменениями № 1 РДИ 10-413(249)–01 от 13.07.2001 г.). М., 2001 г.
3. Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических стальных трубопроводов. РТМ 38.001–94. М., 1995 г.
4. Трубопроводы технологические. Нормы и методы расчета на прочность, вибрацию и сейсмические воздействия. ГОСТ 32388-2013. М., 2014 г.
5. Нормы расчета на прочность трубопроводов тепловых сетей. РД 10-400–01. М., 2001 г.
6. Сети тепловые. Нормы и методы расчета на прочность и сейсмические воздействия. ГОСТ Р 55596-2013. М., 2014
7. Магистральные трубопроводы. СНиП 2.05.06–85. М., 1985 г.
8. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85\*. СП 36.13330.2012. М., 2013 г.
9. Магистральные газопроводы. Нормы проектирования на давление свыше 10 МПа. Основные требования. ГОСТ Р 55989-2014. М., 2015 г.
10. Месторождения нефтяные и газонефтяные. Промысловые трубопроводы. Нормы проектирования. ГОСТ Р 55990-2014. М., 2015 г.
11. Детали трубопроводов на давление свыше 10 до 100 МПа. Нормы и методы расчета на прочность. РД РТМ 26-01-44-78. М., 1978 г.
12. Трубы и детали трубопроводов на давление свыше 100 до 320 МПа. Нормы и методы расчета на прочность. ГОСТ Р 55600-2013. М., 2015 г.
13. Трубопроводы судовые. Методика расчетов на статическую и малоцикловую прочность. РД5Р.4322-86, М., 1986 г.
14. Фланцевые соединения судовых трубопроводов и систем. Методика и нормы расчета на прочность и плотность. РД5Р.5137-73, М., 1973 г.
15. Расчет трубопроводных систем атомных электростанций на прочность. РТМ 108.020.01–75. М., 1975 г.
16. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III “Rules for Construction of Nuclear Facility Components”, Division 1 – Subsection NB, Class 1 – Components, NY 2010
17. Выбор упругих опор для трубопроводов тепловых и атомных электростанций. РТМ 24.038.12–72. М., 1972 г.
18. Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках. ГОСТ 25859-83 (СТ СЭВ 3648-82). М., 1983 г.
19. Техника криогенная и криогенно-вакуумная. Сосуды и камеры. Нормы и методы расчета на прочность, устойчивость и долговечность сварных конструкций. ОСТ 26-04-2585-86. М., 1986 г.
20. Сосуды и аппараты высокого давления. Нормы и методы расчета на прочность. ОСТ 26-1046-87. М., 1987 г.
21. Строительство в сейсмических районах. СНиП II-7-81\*. М., 2007 г.
22. Строительство в сейсмических районах. СП 14.13330.2011. М., 2011 г.

23. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций НП-031-01. М., 2001 г.
24. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*. СП 20.13330.2016. М., 2017 г.
25. Строительство в сейсмических районах Украины. ДБН В .1.1-12:2006. Киев, 2006 г.
26. Методика расчётного анализа сейсмостойкости элементов действующих АЭС в рамках метода граничной сейсмостойкости. МТ-Т.0.03.326-13. ГП «НАЭК «ЭНЕРГОАТОМ», 2013 г.
27. Руководство по расчёту и конструированию тройников технологических трубопроводов. М., Гидропроект, 1984 г.
28. Руководство по обоснованию прочности трубопроводов АЭС (3 редакция). М., АЭП, НИЦ СтаДиО, 1991 г.
29. Пружины винтовые цилиндрические для подвесок трубопроводов ТЭС и АЭС. Конструкция, размеры и технические требования. ОСТ 108.764.01–80, НПО ЦКТИ, 1981 г.
30. Подвески трубопроводов ТЭС и АЭС. Пружины винтовые цилиндрические. Конструкция и размеры. ОСТ 24.125.109–01, НПО ЦКТИ, 2001 г.
31. Отраслевая нормаль. Опоры и подвески станционных трубопроводов. Пружины цилиндрические винтовые. Сортамент и технические требования. МВН 049-63. М., 1963 г.
32. Чертежи 01-26-02, 01-21-03, 082-00-00, 67-00-00-А. Предприятие п/я А-7631, 1976 г.
33. LISEGA Standard Supports. LISEGA GmbH., 2010 г.
34. Детали и сборочные единицы из сталей аустенитного класса для трубопроводов АЭС DN=14-325мм. Типы, конструкция и размеры. ОСТ 24.125.01–89 – ОСТ 24.125.26–89. М., 1991 г.
35. Детали и сборочные единицы из сталей перлитного класса для трубопроводов АЭС DN=16-720мм. Типы, конструкция и размеры. ОСТ 24.125.30–89 – ОСТ 24.125.57–89. М., 1991 г.
36. Стальные трубопроводы с заводской теплогидроизоляцией. М., НПО “Стройполимер”, 2002 г.
37. Детали и сборочные единицы трубопроводов АС  $P_{\text{раб}} < 2,2$  МПа (22 кгс/кв. см),  $t \leq 300$  °С. Трубы крутоизогнутые. Конструкция и размеры. ОСТ 34-10-421-90 (с Изменениями N 1, 2). М., 1990 г.
38. Детали и сборочные единицы трубопроводов АС  $P_{\text{раб}} < 2,2$  МПа (22 кгс/кв.см),  $t \leq 350$  °С. Трубы крутоизогнутые. ОСТ 34-42-662-84 (с Изменениями N 1, 2, 3, 4, 5).
39. Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент. ГОСТ 10704-91 (с Изменениями N 1, 2). М., 1990 г.
40. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. ТУ 14-3Р-55-2001. М., 2001 г.
41. Компенсатор осевой однолинзовый на  $P_y \leq 1,6$  МПа (16 кгс/кв.см). Конструкция и размеры. ОСТ 34-10-569-93. М., 1993 г.
42. Компенсатор осевой двухлинзовый на  $P_y \leq 1,6$  МПа (16 кгс/кв.см). Конструкция и размеры. ОСТ 34-10-570-93. М., 1993 г.
43. Компенсатор осевой трехлинзовый на  $P_y \leq 1,6$  МПа (16 кгс/кв.см). Конструкция и размеры. ОСТ 34-10-571-93. М., 1993 г.

44. Компенсатор осевой четырехлинзовый на  $P_y \leq 1,6$  МПа (16 кгс/кв.см). Конструкция и размеры. ОСТ 34-10-572-93. М., 1993 г.
45. Детали и сборочные единицы трубопроводов АС  $P_{\text{раб}} < 2,2$  МПа (22 кгс/кв.см),  $t \leq 350$  °С. Переходы точеные. ОСТ 34-42-664-84 (с Изменениями N 1, 2, 3, 4). М., 1984 г.
46. Детали и сборочные единицы трубопроводов АЭС  $P_{\text{раб}} < 2,2$  МПа (22 кгс/см<sup>2</sup>),  $T \leq 350$  °С. Переходы сварные листовые. Конструкция и размеры. ОСТ 34-42-665-84 (с Изменениями N 1, 2, 3, 4). М., 1984 г.
47. Детали и сборочные единицы трубопроводов АС  $P_{\text{раб}} < 2,2$  МПа (22 кгс/кв. см),  $t \leq 300$  °С. Переходы бесшовные. Конструкция и размеры. ОСТ 34-10-422-90 (с Изменениями N 1, 2). М., 1990 г.
48. Детали и сборочные единицы трубопроводов АС  $P_{\text{раб}} < 2,2$  МПа (22 кгс/кв. см),  $t \leq 300$  °С. Переходы точеные. Конструкция и размеры. ОСТ 34-10-423-90 (с Изменениями N 1, 2). М., 1990 г.
49. Детали и сборочные единицы трубопроводов АС  $P_{\text{раб}} < 2,2$  МПа (22 кгс/кв. см),  $t \leq 300$  °С. Переходы сварные листовые. Конструкция и размеры. ОСТ 34-10-424-90 (с Изменениями N 1, 2). М., 1990 г.
50. Детали и сборочные единицы трубопроводов АС  $P_{\text{раб}} < 2,2$  МПа (22 кгс/кв. см),  $t \leq 300$  °С. Отводы крутоизогнутые. Конструкция и размеры. ОСТ 34-10-418-90 (с Изменениями N 1, 2). М., 1990 г.
51. Детали трубопроводов стальные бесшовные приварные на  $P_{\text{раб}} < 2,2$  МПа (22 кгс/кв. см) для атомных и тепловых электростанций. Отводы крутоизогнутые. Конструкция и размеры. ОСТ 34 10.699-97 (с Изменением N 1). М., 1997 г.
52. Детали и сборочные единицы трубопроводов АС  $P_{\text{раб}} < 2,2$  МПа (22 кгс/кв. см),  $t \leq 300$  °С. Отводы гнутые. Конструкция и размеры. ОСТ 34-10-420-90 (с Изменениями N 1, 2). М., 1990 г.
53. Отводы гнутые для паропроводов ТЭС. Конструкция и размеры ОСТ 108.321.18-82 – ОСТ 108.321.21-82 (с Изменениями N 1, 2, 3, 4, 5). М., 1982 г. М., 1982 г.
54. Детали и сборочные единицы трубопроводов АС  $P_{\text{раб}} < 2,2$  МПа (22 кгс/кв.см),  $t \leq 350$  °С. Тройники сварные равнопроходные. ОСТ 34-42-675-84 (с Изменениями N 1, 2, 3, 4). М., 1984 г.
55. Детали и сборочные единицы трубопроводов АС  $P_{\text{раб}} < 2,2$  МПа (22 кгс/кв.см),  $t \leq 350$  °С. Тройники сварные переходные. ОСТ 34-42-676-84 (с Изменениями N 1, 2, 3, 4, 5). М., 1984 г.
56. Детали и сборочные единицы трубопроводов АС  $P_{\text{раб}} < 2,2$  МПа (22 кгс/кв.см),  $t \leq 350$  °С. Тройники сварные равнопроходные с накладкой. ОСТ 34-42-677-84 (с Изменениями N 1, 2, 3, 4, 5). М., 1984 г.
57. Детали и сборочные единицы трубопроводов АС  $P_{\text{раб}} < 2,2$  МПа (22 кгс/кв.см),  $t \leq 350$  °С. Тройники сварные переходные с накладкой. ОСТ 34-42-678-84 (с Изменениями N 1, 2, 3, 4, 5). М., 1984 г.
58. Детали и сборочные единицы трубопроводов АС  $P_{(\text{раб})} < 2,2$  МПа (22кгс/кв. см),  $t \leq 300$  °С. Тройники сварные равнопроходные. ОСТ 34-10-510-90 (с Изменениями N 1, 2). М., 1990 г.
59. Детали и сборочные единицы трубопроводов АС  $P_{(\text{раб})} < 2,2$  МПа (22 кгс/кв. см),  $t \leq 300$  °С. Тройники сварные переходные. ОСТ 34-10-511-90 (с Изменениями N 1, 2). М., 1990 г.

60. Детали и сборочные единицы трубопроводов АС  $P_{(раб)} < 2,2$  МПа (22 кгс/кв. см),  $t \leq 300$  °С. Тройники сварные равнопроходные с накладкой. ОСТ 34-10-512-90 (с Изменениями N 1, 2). М., 1990 г.

61. Детали и сборочные единицы трубопроводов АС  $P_{(раб)} < 2,2$  МПа (22 кгс/кв. см),  $t \leq 300$  °С. Тройники сварные переходные с накладкой. ОСТ 34-10-513-90 (с Изменениями N 1, 2). М., 1990 г.

62. Блок подвески хомутовый для горизонтальных трубопроводов. Конструкция и размеры. ОСТ 34-10-725-93. М., 1993 г.

63. Опора хомутная скользящая. Типы и основные размеры. ОСТ 34-10-617-93. М., 1993 г.

64. Прокладки плоские эластичные. Основные параметры и размеры. ГОСТ 15180-86. М., 1986 г.

65. ГОСТ 24705-2004 (ИСО 724:1993) Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Основные размеры, М., 2005 г.

66. Комплекс программ АСТРА-АЭС (DOS-версия 6.1). Автоматизированный расчет трубопроводных систем АЭС на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия, на вибропрочность и неустановившиеся динамические процессы в соответствии с требованиями Норм ПНАЭ Г-7-002–86. Общее описание комплекса. М., НИЦ СтаДиО, 1991 г.

67. Комплекс программ АСТРА-АЭС (DOS-версия 6.2). Автоматизированный расчет трубопроводных систем АЭС на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия, на вибропрочность и неустановившиеся динамические процессы в соответствии с требованиями Норм ПНАЭ Г-7-002–86. Общее описание комплекса. М., НИЦ СтаДиО, 1996 г.

68. Комплекс программ АСТРА-НЕФТЕХИМ (DOS-версия 6.2). Автоматизированный расчет трубопроводных систем нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств на статическую и циклическую прочность и на вибропрочность с требованиями РТМ 38.001–94. Общее описание комплекса. М., НИЦ СтаДиО, 1996 г.

69. Комплекс программ АСТРА-АЭС-99 (Windows-версия). Автоматизированный расчет трубопроводных систем АЭС на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия, на вибропрочность и неустановившиеся динамические процессы в соответствии с требованиями Норм ПНАЭ Г-7-002–86. Общее описание комплекса. М., НИЦ СтаДиО, 1999 г.

70. Комплекс программ АСТРА-НЕФТЕХИМ-99 (Windows-версия). Автоматизированный расчет трубопроводных систем нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств на статическую и циклическую прочность и на вибропрочность с требованиями РТМ 38.001–94. Общее описание комплекса. М., НИЦ СтаДиО, 1999 г.

71. Комплекс программ АСТРА-АЭС-2001 (Windows-версия). Автоматизированный расчет трубопроводных систем АЭС на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия, на вибропрочность и неустановившиеся динамические процессы в соответствии с требованиями Норм ПНАЭ Г-7-002–86. Общее описание комплекса. М., НИЦ СтаДиО, 2001 г.

72. Комплекс программ АСТРА-НЕФТЕХИМ-2001 (Windows-версия). Автоматизированный расчет трубопроводных систем нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств на статическую и циклическую прочность и

на вибропрочность с требованиями РТМ 38.001–94. Общее описание комплекса. М., НИЦ СтаДиО, 2001 г.

73. Комплекс программ АСТРА-ТЭС-2001 (Windows-версия). Автоматизированный расчет трубопроводов пара и горячей воды на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия и на вибропрочность в соответствии с требованиями Норм РД 10-249–98. Общее описание комплекса, М., НИЦ СтаДиО, 2001 г.

74. Комплекс программ СТАДИО (версии 6.10/99/2001/2003/2005/2007/2009/2011/2013). Решение методами конечных элементов и суперэлементов линейных и нелинейных задач теории поля, статике, устойчивости, динамики, механики разрушения и оптимизации пространственных комбинированных систем. Общее описание, верификационный отчет, инструкции пользователя. М., НИЦ СтаДиО. 1993 – 2015 гг.

75. “Семейство” программных комплексов АСТРА-НОВА’2017. АСТРА-СТАДИО’2015. Уточненный расчет температурного и напряженно-деформированного состояния (по пространственно-оболочечным и объемным схемам МКЭ), статической, циклической и сейсмической прочности деталей трубопроводов. Общее описание. Сеанс работы. М., НИЦ СтаДиО, 2003 – 2017 гг.

76. “Семейство” программных комплексов АСТРА-НОВА’2017. Автоматизированное проектирование и расчеты трубопроводных систем на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия, вибропрочность и неустановившиеся динамические процессы в соответствии с российскими нормативными требованиями. Общее описание. М., ЗАО НИЦ СтаДиО, 2003 – 2017 гг.

77. “Семейство” программных комплексов АСТРА-НОВА’2017. Автоматизированное проектирование и расчеты трубопроводных систем на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия, вибропрочность и неустановившиеся динамические процессы в соответствии с российскими нормативными требованиями. Сеанс работы с комплексом. М., ЗАО НИЦ СтаДиО, 2003 – 2017 гг.

78. Комплекс программ АСТРА-АЭС.

– Версия АСТРА-АЭС 6.1. Верификационный отчет. М., НИЦ СтаДиО, 1992 – 1995 гг.

– Версия АСТРА-АЭС’2009. Верификационный отчет (4 тома). М., НИЦ СтаДиО, 2009 – 2011 гг.

79. Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей. Под ред. А.А.Николаева. М., 1965 г.

80. Зверьков Б.В., Костовецкий Д.Л. и др. Расчет и конструирование трубопроводов. Справочное пособие. Ленинград. Машиностроение. 1979 г.

81. Айнбиндер А.Б., Камерштейн А.Г. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость. М., Недра, 1982 г.

82. Самарин А.А. Вибрации трубопроводов энергетических трубопроводов и методы их устранения. М., Энергия, 1979 г.

83. Магалиф В.Я., Шапиро Е.Е. Программа расчета прочности и жесткости трубопроводов (СТАРТ). Межотраслевой фонд алгоритмов и программ автоматизированных систем в строительстве. М., ЦНИИПРОЕКТ, 1986 г., вып. 1-225-1.

84. DIGITAL Visual Fortran Version 6.0 Copyright ©1997 – 1998, DIGITAL Equipment Corporation. Intel Visual Fortran Version 11.1 Copyright © 2006 – 2009.

85. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. М., Стройиздат, 1982 г.

86. Парлетт Б. Симметричная проблема собственных значений. Численные методы. М., Мир, 1983 г.

87. Белостоцкий А.М. Модификация и применение численных методов к расчетам плитно-оболочечных систем на сейсмические воздействия. В кн. “Динамические характеристики и колебания элементов энергетического оборудования”. М., Наука, 1980 г., с. 41-58.

88. Белостоцкий А.М. Упругий расчет сварных и штампованных тройников на произвольные статические нагрузки. – Сб. научных трудов ВНИПИнефть: “Автоматизированное проектирование трубопроводных систем нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств”, ЦНИИТЭнефтехим, М, 1982 г., с. 121-131.

89. Белостоцкий А.М., Малявин В.П., Дикарев А.И. и др. Экспериментальные и численные исследования напряженного состояния тройниковых соединений при действии моментных нагрузок. – Сб.трудов МИСИ им.В.В.Куйбышева, 1982 г., № 188, с. 35-49.

90. Белостоцкий А.М., Головин В.В., Фрадкин Б.В. Исследование напряженного состояния и разработка инженерной методики расчета на прочность тройниковых соединений при действии полной системы квазистатических нагрузок. – “Вопросы атомной науки и техники”. Серия: Физика и техника ядерных реакторов, 1985 г., вып. 6, с. 76-83.

91. Белостоцкий А.М., Вашуров Е.А., Воронова Г.А., Якубович Н.И. Автоматизированный расчет на прочность трубопроводных систем с учетом динамических воздействий. – “Вопросы атомной науки и техники”. Серия: Физика и техника ядерных реакторов, 1985 г., вып. 6, с. 33-38.

92. Белостоцкий А.М., Кириллов А.П., Прудовский А.М. и др. Изучение вибрации трубопроводов сброса пара на АЭС и оценки их долговечности. Тяжелое машиностроение, М., 1990 г., № 10, с. 28-31.

93. Белостоцкий А.М. Пространственное напряженное состояние ортогональных тройниковых соединений различных типов при комплексном нагружении. Материалы семинара кафедры сопротивления материалов Российского университета дружбы народов. Исследование пространственных систем. М., 1996 г., с. 55-60.

94. Белостоцкий А.М. Численное моделирование комплексного напряженно-деформированного состояния конструкций и сооружений энергетических объектов. “Гидротехническое строительство”, 1999 г., № 8, с. 45-54.

95. Белостоцкий А.М., Белый М.В., Пичугин Д.В. Численное исследование алгоритма расчета упругих систем при учете контактного трения. – Вопросы прикладной математики и вычислительной механики. Сб. научных трудов МГСУ, М, 1999 г., с. 68-78.

96. Белостоцкий А.М., Воронова Г.А., Потапенко А.Л. “Семейство” программ АСТРА-НОВА для автоматизированных нормативно регламентированных расчетов на прочность трубопроводных систем атомных и тепловых установок и нефтехимических производств. Труды XVIII

Международной конференции “Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов”. VEM&FEM-2000, С-Петербург, 2000 г., с. 72-76.

97. Белостоцкий А.М., Белый М.В. Суперэлементные алгоритмы решения пространственных нелинейных статических и динамических задач большой размерности. Реализация в программном комплексе СТАДИО и опыт расчетных исследований. Труды XVIII Международной конференции “Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов”. VEM&FEM-2000, С-Петербург, 2000 г., с. 65-69.

98. Белостоцкий А.М., Белый М.В., Рассказов Л.Н., Желанкин В.Г. Численное моделирование пространственного напряженно-деформированного состояния систем “сооружение-основание” с учетом нелинейных реологических свойств грунтов. – Вопросы прикладной математики и вычислительной механики. Сб. научных трудов МГСУ, М, 2001 г., с. 22-29.

99. Белостоцкий А.М., Воронова Г.А., Потапенко А.Л. “Семейство” программ АСТРА-НОВА для автоматизированных нормативных расчетов на прочность трубопроводных систем различного назначения. САПР и Графика, 2002 г., № 8, с. 12-16.

100. Белостоцкий А.М., Воронова Г.А., Потапенко А.Л. АСТРА-НОВА'2003: Автоматизированные расчеты на прочность трубопроводных систем различного назначения. САПР и Графика, 2003 г., № 4, с. 8-12.

101. Белостоцкий А.М., Пеньковой С.Б. Конечноэлементное моделирование НДС ёмкостного оборудования АЭС. Сб. научных трудов МГСУ “Вопросы прикладной математики и вычислительной механики”, М., 2005 г., с. 71-83.

102. Потапенко А.Л. Визуализация расчетных моделей и результатов расчетов в пре- и постпроцессорных модулях программных комплексов. Сб. научных трудов МГСУ “Вопросы прикладной математики и вычислительной механики”, М., 2005 г., с. 397-408.

103. Потапенко А.Л. Интеграция расчетных комплексов с САПР и другими программными комплексами. Сб. научных трудов МГСУ “Вопросы прикладной математики и вычислительной механики”, М., 2005 г., с. 408-420.

104. Белостоцкий А.М., Воронова Г.А., Потапенко А.Л., Клепец О.Ю. Современные численные методы и САПР-технологии в прочностных расчётах трубопроводных систем. Программный комплекс АСТРА-НОВА'2005. Труды XXI Международной конференции “Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов”. VEM&FEM-2005 г., С-Петербург, 2006 г., с. 65-69.

105. Белостоцкий А.М., Пеньковой С.Б. Численное моделирование напряженного состояния и оценка прочности тройниковых соединений трубопроводов АЭУ. Сб. научн. трудов МГСУ “Вопросы прикладной математики и вычислительной механики”, М., 2006 г., с. 285-292.

106. Белостоцкий А.М. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и нормативная оценка прочности трубопроводных систем: достижения, проблемы и перспективы. “Машиностроение и инженерное образование”, 2006 г., № 9, с. 111-119.

107. Белостоцкий А.М., Дубинский С.И., Потапенко А.Л. Методы динамического синтеза подконструкций в задачах моделирования сложных

инженерных систем. “Строительная механика и расчет сооружений”, 2006 г., № 6, с. 45-51.

108. Белостоцкий А.М., Потапенко А.Л., Клепец О.Ю. Реализация и верификация алгоритма Крейга-Бемптона в программных комплексах СТАДИО и АСТРА-НОВА. Труды XXII Международной конференции “Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов”. ВЕМ&FEM-2007 г., С-Петербург, 2007 г., с. 65-69.

109. Белостоцкий А.М., Потапенко А.Л. Программно-алгоритмическая разработка и верификация подсистемы уточненного конечноэлементного моделирования деталей трубопроводов (АСТРА-СТАДИО). Сб. научных трудов МГСУ “Вопросы прикладной математики и вычислительной механики”, М., 2008 г., № 11, с. 185-192

110. CEN TC 107 (Draft Standart 12/96): Design, Calculation & Installation for Pre-insulated Bonded Pipes for District Heating.

111. Стальные трубопроводы с заводской теплоизоляции. Руководство НПО “Стройполимер” по проектированию и монтажу. М., 2002 г.

112. Бородавкин П.П., Подземные магистральные трубопроводы (проектирование и строительство), М., Недра, 1982 г.

113. “Семейство” программных комплексов *АСТРА-НОВА’2017* (Windows-версия). Автоматизированное проектирование и расчеты трубопроводных систем на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия, вибропрочность и неустановившиеся динамические процессы в соответствии с российскими нормативными требованиями. Общее описание.(приложения) М., НИЦ СтаДиО, 2017 г.

114. Гайан Р. Приведение матриц жесткости и массы. – Ракетная техника и космонавтика, 1965 г., т.3, № 2, с. 277-278.

115. Craig R.R., Jr., Bampton M.C.C. Coupling of substructures for dynamic analysis – AIAA Journal, 1968, vol. 6, No. 7, p. 1313-1319.

116. Benfield W.A., Hruda R.F. Vibration analysis of structures by component mode substitution. – AIAA Journal J., 1976, vol. 9, p. 1255-1261.

117. MacNeal R.H. A hybrid method of component mode synthesis. - Computers and structures, 1971, vol. 4, p. 591-601.

118. Hurty W.C. Dynamic analysis of structural systems using component modes. – AIAA Journal., 1984, vol. 4, p. 733-738.

119. PD 5500:2009 “Specification for unfired fusion welded pressure vessels”.

120. Bijlaard P.P. “Stresses From Radial Loads in Cylindrical Pressure Vessels”, The Welding Journal, 33, 1954

121. L.C. Peng and Alvin Peng “Pipe Stress Engineering”, ASME-Press 2009.

122. ГОСТ Р 52857.2-2007 “Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек”.

123. ГОСТ Р 52857.3-2007 “Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер”.

124. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных и промышленных трубопроводов на прочность и устойчивость. М., Недра, 1991 г.



125. Рудомино Б.В., Ремжин Ю.Н. Проектирование трубопроводов тепловых электростанций. Л., Энергия, 1970 г.
126. Костовецкий Д.Л. Об изгибе кривой тонкостенной трубы, сечение которой имеет форму, близкую к круговой, при наличии внутреннего или наружного давления. Изв. АН СССР. Механика и машиностроение ОТН 1959, № 6.
127. Костовецкий Д.Л. Расчёт трубопроводов на компенсацию температурных расширений с учётом эллиптичности сечений криволинейных участков. «Электрические станции», 1963, № 3.
128. Pipe Stress Engineering by Liang-Chuan (L.C.) Peng and Tsen-Loong (Alvin) Peng PE, ASME Press, 2009, ISBN: 079180285X 9780791802854
129. Бирбраер А.Н. Расчёт конструкций на сейсмостойкость. СПб, Наука, 1998 г.
130. Сосуды и трубопроводы высокого давления: Справочник / Е.Р. Хисматулин, Е.М. Королев, В.И. Лившиц и др. М.: Машиностроение, 1990. 384 с: ил.
131. Documentation for ANSYS, Release 11.0 (2007).

## Приложение 1. Основные условные обозначения и сокращения

<b>АЭС</b>	– атомная электростанция
<b>АЭУ</b>	– атомные энергетические установки
<b>ГИ</b>	– гидро(пнеumo) испытания
<b>Г</b>	– гигабайт
<b>К</b>	– килобайт
<b>ЛСМ</b>	– линейно-спектральный метод
<b>М</b>	– мегабайт
<b>МКЭ</b>	– метод конечных элементов
<b>МПА</b>	– максимальная проектная авария
<b>МРЗ</b>	– максимальное расчетное землетрясение (1 раз в 10000 лет)
<b>ПЭВМ</b>	– персональные IBM-совместимые ЭВМ
<b>Windows 98, ME, NT, 2000, XP, Vista, 7</b>	– операционные системы для ПЭВМ
<b>НДС</b>	– напряженно-деформированное состояние
<b>Нормы ПНАЭ Г-7-002-86</b>	– Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов АЭУ. ПНАЭ Г-7-002–86.
<b>ННЭ</b>	– нарушение нормальных условий эксплуатации (для трубопроводов АЭУ)
<b>НЭ</b>	– нормальные условия эксплуатации (для трубопроводов АЭУ, пара и горячей воды)
<b>ПГС</b>	– промышленное и гражданское строительство
<b>ПДН</b>	– постоянные и длительные нагрузки (нефтехимия, теплосети и магистральные трубопроводы)
<b>ПДК(ОН)</b>	– постоянные, длительные, кратковременные и особые нагрузки (нефтехимия, теплосети и магистральные трубопроводы)
<b>ПЗ</b>	– проектное землетрясение (повторяемость 1 раз в 100 лет)
<b>ПК</b>	– программный комплекс
<b>ГОСТ</b>	– межгосударственный стандарт
<b>РТМ</b>	– руководящие технические материалы
<b>РД</b>	– руководящий документ
<b>САПР</b>	– система автоматизированного проектирования
<b>СНиП</b>	– строительные нормы и правила
<b>СП</b>	– свод правил
<b>СЭ</b>	– суперэлемент
<b>СЭМ</b>	– суперэлементная модель
<b>ТЭС</b>	– тепловая электростанция
<b>ТС</b>	– трубопроводная система
<b>ЭВМ</b>	– электронная вычислительная машина

### Единицы измерения (исходные данные и результаты)

<b>СИ</b>	– мм, рад, с, МПа, кН/м, кН, кН·см, <i>m</i> , Гц, рад/с
<b>СГС</b>	– см, рад, с, кг/см <sup>2</sup> , кг/см, кг, кг·см, Гц, рад/с

## Отраслевые комплексы семейства *АСТРА-НОВА'2017*

**АСТРА-АЭС** – ПНАЭ Г-7-002–86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (в дополнение – оценка герметичности фланцевых соединений, расчет напряжений и прочности “ненормализованных” линзовых и сильфонных компенсаторов).

**АСТРА-ТЭС** – РД 10-249–98. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды (п. 5.2, п. 10, п. 11).

**АСТРА-НЕФТЕХИМ** – РТМ 38.001–94. Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических стальных трубопроводов, ГОСТ 32388-2013. Трубопроводы технологические. Нормы и методы расчета на прочность, вибрацию и сейсмические воздействия.

**АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ** – РД 10-400–01. Нормы расчета на прочность трубопроводов тепловых сетей (с корректировкой ряда нестрогих формул, введением расчета напряжений в косых стыках и переходах, а для подземных трубопроводов бесканальной прокладки – и по учету компенсирующих подушек), ГОСТ Р 55596-2013. Сети тепловые. Нормы и методы расчета на прочность и сейсмические воздействия.

**АСТРА-МАГИСТР** – СНИП 2.05.06–85. Магистральные трубопроводы, СП 36.13330.2012 Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНИП 2.05.06–85\*. (с необходимой авторской доработкой в части расчетной оценки прочности отводов, стыков и тройников, сейсмических и динамических расчетов). ГОСТ Р 55989-2014. Магистральные газопроводы. Нормы проектирования на давление свыше 10 МПа. Основные требования. ГОСТ Р 55990-2014. Месторождения нефтяные и газонефтяные. Промысловые трубопроводы. Нормы проектирования.

**АСТРА-СВД** – ГОСТ Р 55600-2013. Трубы и детали трубопроводов на давление свыше 100 до 320 МПа. Нормы и методы расчёта на прочность. РД РТМ 26-01-44-78. Детали трубопроводов на давление свыше 10 до 100 МПа. Нормы и методы расчёта на прочность.

**АСТРА-СУДПРОМ** – РД5Р.4322-86. Трубопроводы судовые. Методика расчетов на статическую и малоцикловую прочность. РД5Р.5137-73. Фланцевые соединения судовых трубопроводов и систем. Методика и нормы расчёта на прочность и плотность.

## Программы “семейства” комплексов *АСТРА-НОВА'2021*

**АСТРА-ДЕТАЛЬ** – программа расчета по выбору основных размеров деталей.

**ПРЕ-АСТРА** – диалоговый Windows-препроцессор для задания и верификации расчетной модели трубопровода.

**АСТРА-СТАЦ** – программа расчета на статическую и циклическую прочность.

**АСТРА-ФОРМ**

– программа расчета собственных частот и форм колебаний.

**АСТРА-СЕЙСМ**

– программа расчета на сейсмические воздействия.

**АСТРА-ВИБР**

– программа расчета на вибропрочность.

**АСТРА-ДИН**

– программа расчета на неустановившиеся динамические процессы.

**ПОСТ-АСТРА**

– диалоговый Windows-постпроцессор для визуализации и построения таблиц результатов расчета.

**АСТРА-СТАДИО**

– подсистема уточненного расчета температурного и напряженно-деформированного состояния, статической, циклической и сейсмической прочности элементов-деталей трубопроводов при действии полной системы квазистатических и сейсмических нагрузок.

## Приложение 2. Алгоритм статического расчета трубопроводных систем (адаптированные фрагменты РТМ 108.020.01-75)

### 1. Предварительные замечания

**1.1.** Излагаемый алгоритм расчета трубопроводных систем основывается на специальном методе раскрытия статической неопределенности, а именно на методе прогонки в сочетании с методом перемещений и начальных параметров. Положительные особенности его – простая логическая схема и высокая вычислительная надежность, т.е. слабая чувствительность к погрешности округления.

**1.2.** Алгоритм излагается применительно к одному (любому) этапу полного расчета трубопроводной системы. При этом используется матричный аппарат, что делает алгоритм удобным для программирования. Применяются квадратные матрицы  $6 \times 6$  и  $3 \times 3$  и матрицы-столбцы (векторы)  $6 \times 1$ .

**1.3.** Учитываются промежуточные упругие опоры (в том числе пружинные подвески). В практических расчетах трубопроводов по данному алгоритму опоры с бесконечной жёсткостью можно учитывать по способу замены их упругими опорами (упругими связями) очень большой жесткости.

### 2. Термины и обозначения

**2.1.** Под *трубопроводной системой* понимается разветвленный трубопровод, концы которого заземлены.

**2.2.** Точки, в которых линия трубопровода разветвляется, называются *узловыми (узлами)*.

**2.3.** *Участок* – часть линии трубопроводной системы, заключенная между смежными узлами (в том числе, тройниковыми).

**2.4.** Каждый участок состоит из *отрезков (прямолинейных, криволинейных)*. Границами отрезков являются: точка сопряжения прямолинейной трубы с криволинейной; место приложения внешней сосредоточенной нагрузки; место установки промежуточной опоры; место сопряжения труб, имеющих различные размеры поперечного сечения; сечение, где требуется определить напряжения или перемещения.

**2.5.** *Пролет* – часть участка, состоящая из нескольких отрезков (не менее двух) и заключенная между двумя смежными промежуточными опорами или узлом и ближайшей промежуточной опорой.

**2.6.** Узлы нумеруются  $\bar{1}, \bar{2}, \bar{3}, \dots, \bar{N}$ , причем последовательность нумерации может быть любой. Заземленные концы трубопроводной системы обозначаются  $\bar{N} + 1, N + 2, \dots$

**2.7.** Точки деления участка на отрезки обозначаются числами  $0, 1, 2, \dots$  Отрезок обозначается числом, отмечающим его конечную точку (для отрезка  $i - (i+1)$  *конечной точкой* является  $i+1$ ).

**2.8.** Участок обозначается двумя числами с чертой наверху, отмечающими его концы. Так, участки трубопроводной системы обозначаются  $\bar{1}-\bar{2}$ ,  $\bar{1}-\bar{12}$ ;  $\bar{1}-\bar{4}$  и т.д. Первое число соответствует концу участка, от которого ведется нумерация точек деления на отрезки (начальное сечение участка). Это число должно быть меньше числа, отмечающего конечное сечение участка.

### 3. Координаты системы

**3.1.** Используются *правосторонние* общая и местная ортогональные координатные системы. В общей координатной системе ( $x_1x_2x_3$ ) определяются координаты точек деления участков на отрезки. Местная система координат ( $ix_1x_2x_3$ ) используется при учете монтажной растяжки и при определении положения бокового отверстия в трубе.

**3.2.** Начало *общей* координатной системы можно располагать в принципе в любой точке пространства. Ось  $x_3$  направляется вертикально вверх.

**3.3.** Начало *местной* координатной системы располагается в конечной точке отрезка.

В прямолинейном отрезке ось  $x_3$  направляется вдоль отрезка в сторону от сечения  $i-1$  к сечению  $i$ ; ось  $x_1$  располагается параллельно плоскости  $x_1x_2$  и направление ее выбирается в такую сторону, чтобы косинус угла между этой осью и осью  $x_1$  общей системы был положительным.

Расположение местной координатной системы криволинейного отрезка: ось  $x_3$  направляется по хорде в сторону сечения  $i-1$  к сечению  $i$ ; ось  $x_2$  лежит в плоскости криволинейного отрезка и направлена по перпендикуляру к хорде в сторону выпуклости отрезка.

**3.4.** В дальнейшем буквенные обозначения величин, отнесенных к местной системе  $ix_1x_2x_3$ , снабжаются штрихом.

**3.5.** Будет использоваться также правосторонняя ортогональная *подвижная* координатная система  $Sx_1''x_2''x_3''$  с началом в текущей точке  $S$  оси трубопровода. В криволинейном отрезке ось  $x_3''$  направлена по касательной в сторону от сечения  $i-1$  к сечению  $i$ ; ось  $x_2''$  – по радиусу в сторону выпуклости отрезка.

В прямолинейном отрезке направления осей  $x_1''$ ,  $x_2''$ ,  $x_3''$  совпадают с направлениями осей  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  соответственно.

**3.6.** Буквенные обозначения величин, отнесенных к подвижной координатной системе, дополняются двумя штрихами.

### 4. Исходные данные для расчета трубопровода

**4.1.** Для промежуточных точек (сечений) каждого участка задаются:

а) для каждой точки 0, 1, 2, ... деления на отрезки:

$$\left. \begin{array}{l} x_1, \text{ см} \\ x_2, \text{ см} \\ x_3, \text{ см} \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} \text{координаты в общей координатной системе } x_1x_2x_3 \\ \text{центра поперечного сечения;} \end{array}$$

б) дополнительно, для каждой точки в середине криволинейного отрезка:

$R, \text{ см}$  – радиус кривизны центральной оси;

в) для некоторых промежуточных точек:

$$\left. \begin{array}{l} e_{11}, \text{ кгс/см} \\ e_{22}, \text{ кгс/см} \\ e_{33}, \text{ кгс/см} \\ e_{44}, \text{ кгс} \cdot \text{см} / \text{рад} \\ e_{55}, \text{ кгс} \cdot \text{см} / \text{рад} \\ e_{66}, \text{ кгс} \cdot \text{см} / \text{рад} \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} \text{жесткости опоры скольжения или} \\ \text{направляющей опоры по осям } x_1x_2x_3; \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} P_1, \text{ кгс} \\ P_2, \text{ кгс} \\ P_3, \text{ кгс} \\ P_4, \text{ кгс} \cdot \text{см} \\ P_5, \text{ кгс} \cdot \text{см} \\ P_6, \text{ кгс} \cdot \text{см} \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} \text{проекции вектора сосредоточенной силы и} \\ \text{момента на оси } x_1x_2x_3; \end{array}$$

$P_{\text{зп}}, \text{ кгс}$  – нагрузка пружинной подвески;

$k, \text{ кгс/см}$  – жесткость пружинной подвески;

$L, \text{ см}$  – рабочая длина пружинной подвески;

г) для одной точки (не совпадающей с концом пролета):

$$\left. \begin{array}{l} \delta'_1, \text{ см} \\ \delta'_2, \text{ см} \\ \delta'_3, \text{ см} \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} \text{проекции вектора поступательного перемещения} \\ \text{начального сечения } (i+1)\text{-го отрезка относительно} \\ \text{конечного сечения } i\text{-го отрезка, возникающего при} \\ \text{выполнении монтажной растяжки в сечении } i, \text{ на оси} \\ \text{местной системы координат } ix_1x_2x_3; \end{array}$$

**4.2.** Для каждого отрезка задаются:

$p, \text{ кгс/см}^2$  – внутреннее избыточное давление;

$\beta, 1/^\circ\text{C}$  – коэффициент линейного расширения;

$$\left. \begin{array}{l} q_1, \text{ кгс/см} \\ q_2, \text{ кгс/см} \\ q_3, \text{ кгс/см} \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} \text{интенсивность распределенной нагрузки по осям} \\ x_1, x_2, x_3; \end{array}$$

$t_{\text{н}}, ^\circ\text{C}$  – температура нагрева;

$D_{\text{н}}, \text{ см}$  – наружный диаметр;

$S_{\text{н}}, \text{ см}$  – толщина стенки;

$c^*$ , см – утонение стенки;  
 $E$ , кгс/см<sup>2</sup> – модуль упругости;  
 $\nu$  – коэффициент Пуассона;

$$\left. \begin{array}{l} u_1, \text{ см} \\ u_2, \text{ см} \\ u_3, \text{ см} \\ u_4, \text{ рад} \\ u_5, \text{ рад} \\ u_6, \text{ рад} \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} \text{проекции вектора перемещения} \\ \text{защемленного конца.} \end{array}$$

## 5. Расчет отрезков

### 5.1. Матрица поворота для прямолинейного отрезка

5.1.1. Исходные данные: координаты в системе  $x_1x_2x_3$  концов  $i-1, i$  отрезка.

5.1.2. Матрица поворота

$$\alpha_i = \alpha_{2i} \alpha_{1i}, \quad (1)$$

где:

$$\alpha_{1i} = \begin{vmatrix} \cos \hat{x}_3 & \sin \hat{x}_3 & 0 \\ -\sin \hat{x}_3 & \cos \hat{x}_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (2)$$

$$\alpha_{2i} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \hat{\xi}_1 & \sin \hat{\xi}_1 \\ 0 & -\sin \hat{\xi}_1 & \cos \hat{\xi}_1 \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Здесь в обозначениях углов, а далее в обозначениях и других величин индекс  $i$ , отмечающий номер отрезка, для сокращения записи опущен.

В приведенных формулах:

$$\begin{aligned} \cos \hat{x}_3 &= \left| \frac{r_2}{\sqrt{r_1^2 + r_2^2}} \right|; \\ \sin \hat{x}_3 &= \pm \left| \frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 + r_2^2}} \right|; \\ \cos \hat{\xi}_1 &= \frac{r_3}{\nu}; \end{aligned}$$



$$\sin \hat{\xi}_1 = -\frac{1}{\nu}(-r_1 \sin \hat{x}_3 + r_2 \cos \hat{x}_3),$$

где:

$$r_j = x_j^{(i)} - x_j^{(i-1)} \quad (j=1,2,3);$$

$$\nu = \sqrt{\sum_{j=1}^3 r_j^2}. \quad (4)$$

В формуле для  $\sin \hat{x}_3$  берется знак плюс, если  $r_1$  и  $r_2$  имеют разные знаки, и знак минус – в противном случае.

В случае  $r_1=r_2=0$  принимается  $\cos \hat{x}_3 = 1$ ,  $\sin \hat{x}_3 = 0$ , а в случае  $r_1 \neq 0$ ,  $r_2=0$  вычисления  $\sin \hat{x}_3$  и  $\cos \hat{x}_3$  следует производить по общим формулам, приписывая значению  $r_2=0$  знак минус.

## 5.2. Матрица поворота для криволинейного отрезка

5.2.1. Исходные данные: координаты в координатной системе  $x_1x_2x_3$  концов  $i-1$ ,  $i$  криволинейного отрезка и конца  $i-2$  предшествующего прямолинейного отрезка; радиус кривизны  $R_i$ .

5.2.2. Искомая матрица поворота

$$\alpha_i = \alpha_{3i} \alpha_{2i} \alpha_{1i}. \quad (5)$$

Матрицы  $\alpha_{1i}$ ,  $\alpha_{2i}$  определяются для отрезка  $(i-1)$  -  $i$  по формулам прямолинейного отрезка (2), (3), а

$$\alpha_{3i} = \begin{pmatrix} \cos \hat{\eta}_3 & \sin \hat{\eta}_3 & 0 \\ -\sin \hat{\eta}_3 & \cos \hat{\eta}_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Здесь:

$$\cos \hat{\eta}_3 = \frac{1}{\nu_{i-1} \sin \frac{\theta_i^*}{2}} [(-r_1 \sin x_3 + r_2 \cos x_3) \cos \hat{\xi}_1 + r_3 \sin \hat{\xi}_1];$$

$$\sin \hat{\eta}_3 = -\frac{1}{\nu_{i-1} \sin \frac{\theta_1^*}{2}} (r_1 \cos \hat{x}_3 + r_2 \sin \hat{x}_3),$$

где:

$$r_j = x_j^{(i-1)} - x_j^{(i-2)} \quad (j=1,2,3);$$

$$\nu_{i-1} = \sqrt{\sum_{j=1}^3 r_j^2};$$

$$\sin \frac{\theta_i^*}{2} = \frac{\nu_i}{2R_i} \quad (\nu_i = \sqrt{\sum_{j=1}^3 (x_j^{(i)} - x_j^{(i-1)})^2}),$$

где  $\theta_i^*$  – угол между крайними сечениями криволинейного отрезка.

### 5.3. Определение координат точек излома вписанной ломаной, заменяющей криволинейный отрезок

5.3.1. Исходные данные: координаты в координатной системе  $x_1x_2x_3$  концов  $i-2, i-1, i$  отрезков; радиус кривизны  $R_i$

5.3.2. Координаты точек  $\mu$  ( $\mu=1, 2, \dots, 2\nu-1$ ) излома вписанной ломаной в системе  $x_1x_2x_3$  равны

$$\begin{pmatrix} x_1^{(\mu)} \\ x_2^{(\mu)} \\ x_3^{(\mu)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1^{(i)} \\ x_2^{(i)} \\ x_3^{(i)} \end{pmatrix} + \tilde{\alpha}_i R_i \begin{pmatrix} 0 \\ \cos(\theta_\mu - \frac{\theta_i^*}{2}) - \cos \frac{\theta_i^*}{2} \\ \sin(\theta_\mu - \frac{\theta_i^*}{2}) - \sin \frac{\theta_i^*}{2} \end{pmatrix}.$$

Здесь  $\alpha_i$  – матрица, являющаяся транспонированной по отношению к матрице  $\alpha_i$ , вычисляемой для данного криволинейного отрезка по формуле (5).

Угол  $\frac{\theta_i^*}{2}$  вычисляется из соотношения:

$$\sin \frac{\theta_i^*}{2} = \frac{\nu_i}{2R_i},$$

используемого при определении матрицы  $\alpha_i$ .

Угол  $\theta_\mu = \frac{\theta_i^*}{2\nu} \mu$  ( $\mu=1, 2, \dots, 2\nu-1$ ).

### 5.4. Матрица податливости для конечной точки отрезка

5.4.1. Исходные данные: координаты в координатной системе  $x_1x_2x_3$  концов отрезка (в случае криволинейного отрезка – координаты концов отрезка вписанной ломаной); модуль упругости  $E$ ; наружный диаметр трубы  $D_n$ ; толщина стенки трубы  $S_n$ .

5.4.2. Искомая матрица:

$$a_i = \tilde{D}_i a_i' D_i,$$

Здесь  $\tilde{D}_i$  – матрица, являющаяся транспонированной по отношению к матрице  $D_i$ ;

$D_i$  – матрица 6х6, равная:

$$D_i = \begin{pmatrix} \alpha_i & 0_3 \\ 0_3 & \alpha_i \end{pmatrix};$$

$$a'_i = \begin{vmatrix} F'_1 + F'_2 & F'_3 \\ F'_4 & F'_5 \end{vmatrix},$$

где  $0_3$  – матрица  $3 \times 3$ ;

$\alpha_i$  – матрица поворота, вычисляемая по формуле (1);

$$F'_1 = A\nu;$$

$$F'_2 = \frac{1}{3}\nu^3 \frac{k_p^*}{EJ_\gamma} \omega_1;$$

$$F'_3 = \frac{1}{2}\nu^2 \frac{k_p^*}{EJ_\gamma} \omega_2;$$

$$F'_4 = \frac{1}{2}\nu^2 \frac{k_p^*}{EJ_\gamma} \omega_2;$$

$$F'_5 = B\nu;$$

Здесь:

$$\omega_1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}; \quad \omega_2 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}; \quad (6)$$

$$A = \begin{vmatrix} \frac{2}{GF} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{GF} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{EF} \end{vmatrix}; \quad B = \begin{vmatrix} \frac{k_p^*}{EJ_\gamma} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_p^*}{EJ_\gamma} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{GJ_p} \end{vmatrix}, \quad (7)$$

где:

$$\left. \begin{aligned} F &= \pi S_u (D_u - S_u) \\ J_\gamma &= \frac{\pi D_u^4}{64} \left[ 1 - \left( \frac{D_u - 2S_u}{D_u} \right)^4 \right] \end{aligned} \right\}; \quad (8)$$

$$J_p = 2J_\gamma;$$

$$G = \frac{E}{2(1-\nu)}.$$

Формулы пригодны как для прямолинейных отрезков, так и для отрезков ломаной, заменяющей криволинейный отрезок; разница только в том, что в первом случае  $k_p^* = 1$ .

Длина отрезка вычисляется по формуле (4).

Примечание. В случае криволинейного отрезка расчет ведется для заменяющих прямолинейных отрезков, причем все исходные значения, кроме координат, соответствуют криволинейному отрезку в целом. Матрица  $D_i$  вычисляется для заменяющего отрезка, т.е. по координатам концов этого отрезка.

### 5.5. Матрица перемещений начального сечения отрезка вследствие распределенных воздействий и монтажной растяжки

5.5.1. Исходные данные: координаты в системе  $x_1x_2x_3$  концов отрезка  $i$  (в случае криволинейного отрезка – координаты концов отрезка вписанной ломаной); температура нагрева  $t_n$ ; значения перемещений данного сечения  $i$  при монтажной растяжке; значение интенсивности распределенной нагрузки для отрезка; коэффициент линейного расширения  $\beta$ ; значения  $E, \nu, G, D_n, S_n$  для отрезка  $i$ .

Примечание. В случае криволинейного отрезка расчет ведется для заменяющих прямолинейных отрезков, причем все исходные значения, кроме координат, соответствуют криволинейному отрезку в целом.

5.5.2. Искомая матрица перемещений (сечения  $i$  отрезка  $i+1$ ):

$$\Delta_i = \tilde{D}_i (\Delta'_{iq} + \Delta'_n + \delta'_i).$$

Здесь:

$$\Delta'_{iq} = \begin{bmatrix} \bar{F}'_1 + \bar{F}'_2 & 0_3 \\ \bar{F}'_4 & 0_3 \end{bmatrix} D_i q,$$

где:

$q$  – интенсивность распределенной нагрузки;

$$\bar{F}'_1 = \frac{1}{2} A \nu^2;$$

$$\bar{F}'_2 = \frac{1}{8} \nu^4 \frac{k_p^*}{EJ_3} \omega_1;$$

$$\bar{F}'_4 = \frac{1}{6} \nu^3 \frac{k_p^*}{EJ_3} \omega_2;$$

Значения  $\omega_1, \omega_2, A, F, J_3$ , определяются по формулам (6), (7), (8).

Для прямолинейных отрезков, не заменяющих криволинейные,  $k_p^* = 1$

Матрица  $q$  имеет вид:

$$q = \{\times \times \times 000\} \quad (\times - \text{элементы, значения которых задаются}).$$

Матрицы  $\Delta'_n$  и  $\delta'_i$  имеют значения:

$$\Delta'_{it} = \left[ \beta t_n \nu - \frac{2\nu}{E} \frac{P(D_n - 2S_n)^2}{(D_n^2 - (D_n - 2S_n)^2)} \right] \{001000\};$$

$$\delta'_i = \{\times \times \times 000\}.$$

Матрица  $D_i$  равна:

$$D_i = \begin{Bmatrix} \alpha_i & 0 \\ 0 & \alpha_i \end{Bmatrix},$$

где  $\alpha_i$  – матрица поворота, вычисляемая по формуле (1).

## 5.6. Матрица внутренних сил, вызываемых распределенной нагрузкой

5.6.1. Исходные данные: координаты в системе  $x_1x_2x_3$  концов отрезка (для криволинейного отрезка – координаты концов отрезка вписанной ломаной); значение интенсивности распределенной нагрузки.

5.6.2. Искомая матрица (для конечной точки отрезка):

$$V_i = \nu \bar{D}_i \begin{Bmatrix} I_3 & 0_3 \\ (1/2)\nu\omega_2 & I_3 \end{Bmatrix} D_i q.$$

Значения величин  $\nu$ ,  $D_i$ ,  $q$ ,  $\omega_2$  приводились выше;  $I_3$  – единичная матрица  $3 \times 3$ .

## 6. Расчет пролета

### 6.1. Определение некоторых матриц пролета

6.1.1. Определяются следующие матрицы (рис. П4.7):

$$\left. \begin{aligned} a_{pj} &= \tilde{G}_{pj}; \\ \bar{b}_{pj} &= G_{jp}; \\ b_{pj} &= - \sum_{v=j+1}^p \tilde{G}_{pv} a_v G_{jv}; \\ \bar{c}_{pj} &= \sum_{v=j+1}^p G_{vp} (V_v + P_v); \\ c_{pj} &= \sum_{v=j+1}^p \tilde{G}_{pv} [-a_v (\bar{c}_{vj} - P_v) + \Delta_v] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

при  $p = j+1, j+2, \dots, k$ .

Последнюю формулу при программировании целесообразно представить в виде:

$$c_{pj} = \sum_{v=j+1}^p \tilde{G}_{pv} \left[ -a_v \sum_{k=j+1}^v G_{kv} (V_k + P_k) + \Delta_v + a_v P_v \right].$$

В этих формулах:

$$G_{jp} = \begin{Bmatrix} I_3 & 0_3 \\ -\bar{r}_{jp} & I_3 \end{Bmatrix}, \quad \tilde{G}_{pj} = \begin{Bmatrix} I_3 & -\bar{r}_{jp} \\ 0_3 & I_3 \end{Bmatrix},$$

где:

$$\bar{r}_{jp} = \begin{vmatrix} 0 & -r_3^{jp} & r_2^{jp} \\ r_3^{jp} & 0 & -r_1^{jp} \\ -r_2^{jp} & r_1^{jp} & 0 \end{vmatrix},$$

причем:

$$\begin{aligned} r_1^{jp} &= x_1^p - x_1^j; \\ r_2^{jp} &= x_2^p - x_2^j; \\ r_3^{jp} &= x_3^p - x_3^j \end{aligned}$$

есть проекции радиуса-вектора  $\bar{r}_{jp}$  на оси координатной системы  $x_1x_2x_3$ ;

$P_v$  ( $v = j+1, j+2, \dots, k-1$ ) – матрица-столбец внешней сосредоточенной нагрузки и/или сосредоточенные нагрузки от действия внутреннего давления в элементах трубопровода

Матрицы  $a_v, V_v, \Delta_v$  вычисляются по приведенным в разделе 5 формулам.

Примечания:

1. При выполнении расчета по формулам (9) с целью формирования разрешающей системы уравнений следует принимать  $p=k$ .

2. Если участок не имеет промежуточных опор, то нужно принимать, что участок состоит из одного пролета и  $j=0, k=n$  ( $n$  – число отрезков в участке).

## 6.2. Вектор сил в начальном сечении пролета

6.2.1. Исходные данные:  $j, k$  – номера сечений концов пролета;  $\lambda_j, \lambda_k$  – векторы  $(6 \times 1)$  перемещений концов пролета (определение их см. в п. 9).

6.2.2. Искомый вектор:

$$X_j = b_{kj}^{-1} (\lambda_k - a_k \lambda_j - c_{kj}), \quad (10)$$

где  $b_{kj}, a_{kj}, c_{kj}$  вычисляются по формулам (9) при  $p=k$ .

Примечание. Если в участке нет промежуточных опор, то формула (10) используется только для определения сил  $X_0$  в начальном сечении участка.

## 6.3. Векторы перемещений и сил в промежуточных сечениях пролета

6.3.1. Исходные данные:  $\lambda_j$  – вектор перемещений начального сечения пролета;  $X_j$  – вектор сил в начальном сечении пролета.

6.3.2. Исходные векторы:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_i &= \tilde{G}_{i(i-1)} \lambda_{i-1} a_i (G_{(i-1)i} X_{i-1} + V_i) + \Delta_i; \\ X_i &= G_{(i-1)i} X_{i-1} + P_i + V_i \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

при  $i = j+1, \dots, k-1$ .

Примечание. Для последнего пролета участка (т.е. при  $k=n$ ) по формулам (11) вычисляются, кроме того, значения матриц  $\lambda_n, X_n$ . По  $\lambda_n$  производится контроль правильности вычислений: в случае заземленного конца перемещения  $\lambda_n$  должны быть равны заданным перемещениям, в противном случае – вычисленным перемещениям узла.

## 7. Расчет узла

7.1. Расчет начинается с замены криволинейных элементов вписанными ломаными, т.е. с определения координат точек, излома последних (см. подраздел 5.3). Кроме того, для криволинейных элементов должны быть вычислены значения коэффициента  $k_p^*$ .

Последовательно вычисляются для сечений, где установлены промежуточные опоры, матрицы:

$$\left. \begin{aligned} L_l &= -[c_l + b_l L_k]^{-1} d_l; \\ N_l &= -[c_l + b_l L_k]^{-1} b_l N_k; \\ M_l &= [c_l + b_l L_k]^{-1} [-b_l M_k + g_l] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

причем

$L_0=0_6$  (нулевая матрица 6х6);

$N_0=I_6$  (единичная матрица 6х6);

$M_0=\bar{0}_6$  (нулевой вектор 6х1);

$$\left. \begin{aligned} b_l &= \bar{b}_k b_k^{-1} a_k; \\ c_l &= -b_{ml}^{-1} a_{ml} \bar{b}_k b_k^{-1} + e_l; \\ d_l &= b_{ml}^{-1}; \\ g_l &= b_{ml}^{-1} c_{ml} - \bar{b}_k b_k^{-1} c_k + \bar{c}_k, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где:  $l$  – номер конца пролета;

$k$  – номер начала пролета;

$m$  – конец следующего пролета;

$e_l$  – матрица 6х6, в которой ненулевыми являются диагональные элементы  $e_{11}^l \div e_{66}^l$ :

$$e_l = \begin{vmatrix} e_{11}^l & & & & & \\ & e_{22}^l & & & & 0 \\ & & e_{33}^l & & & \\ & & & e_{44}^l & & \\ & & & & e_{55}^l & \\ 0 & & & & & e_{66}^l \end{vmatrix}$$

Для упругой опоры:

$$e_{11}^l = e_{22}^l = \frac{P_{3y}^{(1)}}{L_l}; \quad e_{33}^l = k_l,$$

где:  $k_l, L_l$  – жесткость и рабочая длина промежуточной пружинной подвески;

$P_{3y}^{(l)}$  – рабочая нагрузка пружинной подвески.

Для всех типов опор (кроме пружинных)  $e_{11}^l \div e_{66}^l$  вычисляются программой и/или принимаются по исходным данным.

Вычисление матриц с двойной нижней индексацией производится по формулам (9).

Примечание. Матрицы  $L_l, N_l, M_l$  желательно запоминать для проведения расчета напряжений.

Кроме того, вычисляются матрицы:

$$\left. \begin{aligned} N_{jn} &= N_j + \dots + L_j \dots L_k N_l + L_j \dots L_k L_l N_m + \dots + \\ &\quad + L_j \dots L_k L_l L_m \dots N_r; \\ M_{jn} &= M_j + \dots + L_j \dots L_k M_l + L_j \dots L_k L_l M_m + \dots + \\ &\quad + L_j \dots L_k L_l L_m \dots M_r; \\ L_{jn} &= L_j \dots L_k L_l L_m \dots L_r. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где:  $j$  – конец первого пролета;

$r$  – начало последнего пролета;

$n$  – конец участка.

Далее вычисляются матрицы:

$$\left. \begin{aligned} A_{00} &= b_{j0}^{-1} (a_{j0} - N_{jn}); \\ B_{00} &= b_{j0}^{-1} (c_{j0} - M_{jn}); \\ A_{0n} &= b_{j0}^{-1} L_{jn}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Для промежуточных участков, кроме того, вычисляются матрицы:

$$\left. \begin{aligned} A_{nn} &= \bar{b}_{nr} b_{nr}^{-1} (I_6 - a_{nr} L_r); \\ A_{n0} &= \tilde{A}_{0n}; \\ B_{n0} &= -\bar{b}_{nr} b_{nr}^{-1} (a_{nr} M_r + c_{nr}) + \bar{c}_{nr}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

В случае когда участок не имеет промежуточных опор, в формулах (16) следует принять:

$$r = 0; \quad L_r = 0_6; \quad M_r = \bar{0}_6,$$

а в формулах (15):

$$j = n; \quad N_{jn} = 0_6; \quad M_{jn} = \bar{0}_6; \quad L_{jn} = I_6;$$

формулы (12) и (14) в этом случае не используются.

Примечание. Принимается предположение, что в узлах промежуточные опоры отсутствуют.



## 8. Формирование разрешающей системы уравнений

8.1. Матрицы (15), (16) используются для формирования разрешающей системы уравнений:

$$\begin{pmatrix} A_{11}^{\Sigma} & A_{12}^{\Sigma} & A_{13}^{\Sigma} & A_{1N}^{\Sigma} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{i1}^{\Sigma} & A_{i2}^{\Sigma} & A_{i3}^{\Sigma} & A_{iN}^{\Sigma} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{N1}^{\Sigma} & A_{N2}^{\Sigma} & A_{N3}^{\Sigma} & A_{NN}^{\Sigma} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \dots \\ \lambda_i \\ \dots \\ \lambda_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1^{\Sigma} \\ \dots \\ B_i^{\Sigma} \\ \dots \\ B_N^{\Sigma} \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Целесообразно формирование системы (17) производить одновременно с расчетом участков, не выделяя в отдельный блок.

Коэффициенты  $A_{11}^{\Sigma}, A_{12}^{\Sigma}, \dots$  – матрицы  $6 \times 6$ ;

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, B_1^{\Sigma}, B_2^{\Sigma}, \dots$  – векторы-столбцы  $6 \times 1$ .

Каждая строка системы соответствует одному узлу, а именно узлу, номер которого составляет нижний индекс при  $\lambda$  и  $B^{\Sigma}$  и первый нижний индекс при  $A$  (второй индекс – номер узла, с которым данный узел соединен участком).

Коэффициенты и свободные члены системы (17) вычисляются следующим образом.

8.2. Матрица  $A_{ii}^{\Sigma}$  является суммой матриц  $A_{00}, A_{nn}$  участков, сходящихся в данном узле  $\bar{i}$ , причем для участков, нумерация точек деления которых на отрезки начинается в узле, берется  $A_{00}$ , а для участков, нумерация деления которых заканчивается в узле, берется  $A_{nn}$ .

8.3. Матрица  $B_i^{\Sigma}$  является суммой со знаком минус матриц  $B_{0n}$  и  $B_{n0}$  участков, сходящихся в узле  $\bar{i}$ , причем для участков, нумерация точек деления которых на отрезки начинается в узле, берется  $B_{0n}$ , а для таких участков, нумерация точек деления которых заканчивается в узле, берется  $B_{n0}$ . В случае когда к узлу подходит концевой участок, в сумму  $B_i^{\Sigma}$  включается также матрица  $A_{0n} \lambda_n$  этого участка.

Вместе с тем эта матрица  $A_{0n}$  исключается из матрицы коэффициентов системы (17).

В случае когда трубопроводная система имеет один узел, матрица перемещений его определяется по формуле:

$$\lambda_1 = (A_{11}^{\Sigma})^{-1} B_1^{\Sigma}.$$

При выборе метода для решения системы уравнений следует учитывать, что матрица коэффициентов получается симметричной, положительно определенной и может иметь большое количество нулевых элементов.

## 9. Расчет усилий, перемещений, напряжений

9.1. Перемещения сечений, где устанавливаются промежуточные упругие опоры (т.е. конечных сечений пролета), вычисляются по формуле обратного хода.

$$\lambda_l = L_l \lambda_m + N_l \lambda_0 + M_l$$

Усилия в начальных сечениях пролетов вычисляются по формуле (10). Для участков, не имеющих промежуточных опор, усилия  $X_0$  вычисляются по той же формуле при  $j=0, k=n$ .

Усилия и перемещения в промежуточных сечениях пролета вычисляются по формуле (11).

В вычисляемых матрицах сил первые три элемента являются проекциями вектора силы на оси  $x_1, x_2, x_3$ , а остальные три – проекциями вектора момента на те же оси. Первые три элемента матриц перемещений – проекции вектора поступательного перемещения на оси  $x_1, x_2, x_3$ , а остальные три – проекции на эти оси вектора углового перемещения.

Для сечений  $0, 1, 2, \dots, n$  участков, а также для сечений, расположенных по середине криволинейных отрезков, вычисляются напряжения. Предварительно матрица сил  $X_i$ , действующих в этих сечениях, должна быть приведена к осям подвижной координатной системы по формулам:

$$X_i'' = D_i X_i;$$

$$X_i'' = D_i^0 D_i X_i.$$

Первая формула справедлива для сечения, расположенного в конце прямолинейного отрезка и на середине криволинейного отрезка, а вторая формула – для сечения, расположенного в конце криволинейного отрезка.

Матрица  $D_i$  вычисляется в соответствии с п.5.4.2. Для сечений, расположенных в середине и в конце криволинейного отрезка, матрица  $D_i$  вычисляется для отрезка в целом ( $a_i$  вычисляется по формуле (5)).

Матрица:

$$D_i^0 = \begin{bmatrix} \alpha_i^0 & 0_3 \\ 0_3 & \alpha_i^0 \end{bmatrix},$$

где:

$$\alpha_i^0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \frac{\theta_i^*}{2} & \sin \frac{\theta_i^*}{2} \\ 0 & -\sin \frac{\theta_i^*}{2} & \cos \frac{\theta_i^*}{2} \end{pmatrix}.$$

При определении напряжений в криволинейных трубах следует учитывать равенства (см. раздел 5 РТМ):

$$N_z = -X_3'';$$

$$M_x = -X_4'';$$

$$M_y = X_5'';$$

$$|M_z| = |X_6''|,$$

где  $X_3''$ ,  $X_4''$ ,  $X_5''$ ,  $X_6''$  – элементы вектора внутренних сил, отнесенного к текущей системе координат.

Угол  $\Phi$ , характеризующий положение бокового отверстия в трубе (тройниковый узел, см. рис. П4.7 РТМ), должен отсчитываться от положительной оси  $x_1''$  в сторону положительной оси  $x_2''$ .

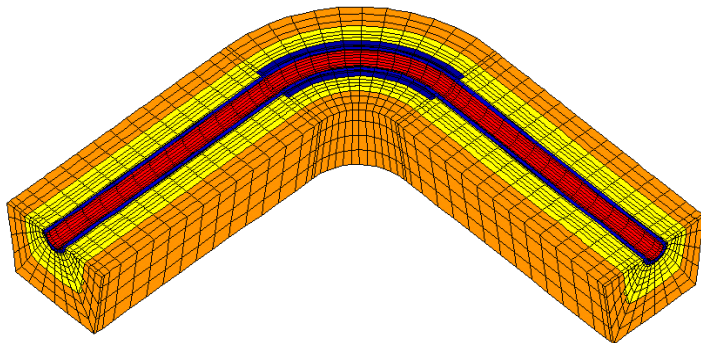
Напряжение  $\sigma_{zMN}^0$  определяется при этом по формуле:

$$\sigma_{zMN}^0 = \frac{-X_4'' \sin \Phi + X_5'' \cos \Phi}{W} - \frac{X_3''}{F}.$$

## Приложение 3. Численная методика расчета подземных трубопроводов

### П. 3.1. Общие положения

Рассматривается взаимодействие стального трубопровода с промышленной изоляцией (например, пенополиуретановой, ППУ) в оболочке (в частности, полиэтиленовой, ПЭ), компенсирующих подушек (как правило, из пенопласта) и грунта основания и засыпки.



Сопротивление перемещениям в плоскости, перпендикулярной оси трубопровода, вследствие его нагрева моделируется в каждой точке цепью последовательно соединенных пружин. На рис. 3.1 показана пружинная цепь, моделирующая сопротивление боковым перемещениям в горизонтальной плоскости. В вертикальной плоскости имеем аналогичную расчетную схему.

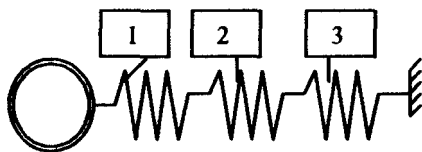


Рис. 3.1

Пружина 1 моделирует сопротивление боковым перемещениям ППУ-изоляции, пружина 2 – подушек из пенопласта, пружина 3 – грунта. Сопротивлением полиэтиленовой оболочки в силу его малости пренебрегаем.

Подушки из пенопласта могут отсутствовать, тогда число пружин сокращается, т. е. цепь будет состоять из пружин 1 и 3. В формуле:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_0 \cdot D_\kappa}{4K_p^* EI}}$$

назовем произведение  $k_0 D_\kappa$  линейным коэффициентом постели и обозначим его через  $k$ . Для этого коэффициента справедлива формула:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3}.$$

Пусть сжатие трех последовательно соединенных пружин  $\delta_k$ , тогда, деформации сжатия каждой пружины составит:

$$\delta_1 = \delta_k \frac{k}{k_1},$$

$$\delta_2 = \delta_k \frac{k}{k_2},$$

$$\delta_3 = \delta_k \frac{k}{k_3}.$$

Относительные деформации сжатия будут следующими:

$$\varepsilon_1 = \frac{\delta_1}{\delta_k} = \frac{k}{k_1},$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\delta_2}{\delta_k} = \frac{k}{k_2},$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\delta_3}{\delta_k} = \frac{k}{k_3}.$$

Жесткость каждой пружины характеризуется своим коэффициентом постели и зависит от бокового перемещения трубы нелинейно. Определение  $k_1, k_2, k_3$  приводится ниже.

### П. 3.2. ППУ-изоляция

Линейный коэффициент постели,  $H/мм^2$

$$k_1 = k_{h1} \cdot D_\kappa,$$

где:

$$k_{h1} = \frac{E_l^s}{s_u},$$

$E_l^s$  – модуль упругости ППУ-изоляции (секущая),  $H/мм^2$ ,

$s_u$  – толщина изоляции,  $мм$ .

$$s_u = 0,5(D_\kappa - D_n)$$

$D_\kappa$  – диаметр кожуха изоляции,  $мм$ ,

$D_n$  – наружный диаметр трубы,  $мм$ .

$E_l^s$  вычисляется по формулам:

- при  $\varepsilon \leq 0,03$   $E_l^s = 8,8 H/мм^2$ ,
- при  $\varepsilon > 0,03$

$$E_l^s = B_1(100\varepsilon - B_2)^{B_4} \cdot (B_3 - 100\varepsilon)^{B_5},$$

где:

$$\begin{aligned} B_1 &= 1016,2; \\ B_2 &= -4,0397; \\ B_3 &= 83,339; \\ B_4 &= -1,1678; \\ B_5 &= -0,56135. \end{aligned}$$

В приведенных формулах  $\varepsilon = \frac{\delta_1}{\delta_k}$

$k_l$ , находится с помощью итераций. Начальное приближение для  $E_l^s = 8,8 \text{ Н/мм}^2$ .

При дискретной модели взаимодействия с грунтом жесткость эквивалентной пружины  $c_l = k_l l$  ( $l$  – шаг расстановки упругих опор), а ее податливость  $\lambda_l = 1/c_l$ .

### II. 3.3. Компенсирующая подушка

Линейный коэффициент постели,  $\text{Н/мм}^2$

$$k_2 = k_{h2} \cdot D_\kappa = E_2^s,$$

где:

$$k_{h2} = \frac{E_2^s}{D_\kappa},$$

$E_2^s$  – модуль упругости подушки (секущая),  $\text{Н/мм}^2$ ,

$D_\kappa$  – толщина подушек, принимаемая равной диаметру кожуха изоляции,

мм.

$E_2^s$  вычисляется по формуле:

$$E_2^s = B_1 \cdot e^{B_2 \cdot \varepsilon} + B_3 \cdot e^{B_4 \cdot \varepsilon},$$

где:

$$\varepsilon = \frac{\delta_2}{\delta_k}.$$

Для “мягких” подушек

$$\begin{aligned} B_1 &= 0,4767 \cdot 10^{-10}; \\ B_2 &= 26,055; \\ B_3 &= 0,03062; \\ B_4 &= 1,5326. \end{aligned}$$

Для “средних” подушек

$$\begin{aligned} B_1 &= 0,1557 \cdot 10^{-6}; \\ B_2 &= 18,348; \\ B_3 &= 0,05082; \end{aligned}$$

$$B_4=2,0017.$$

Для “жестких” подушек

$$B_1=1,5026 \cdot 10^{-5};$$

$$B_2=16,347;$$

$$B_3=0,1242;$$

$$B_4=1,2863.$$

$k_2$  находится с помощью итераций. Начальное приближение для  $E_2^s - 0,3 \text{ Н/мм}^2$ .

При дискретной модели взаимодействия с грунтом жесткость эквивалентной пружины  $c_2=k_2l$  ( $l$  – шаг расстановки упругих опор), а ее податливость  $\lambda_2=1/c_2$ .

### П. 3.4. Грунт – горизонтальная плоскость

Линейный коэффициент постели,  $\text{Н/мм}^2$

$$k_3 = k_{h3} \cdot D_\kappa,$$

где:

$$k_{h3} = \begin{cases} \frac{R_{zp}}{|\delta_3|} & |\delta_3| > \frac{R_{zp}}{k_{h3}^0} \\ k_{h3}^0 & |\delta_3| \leq \frac{R_{zp}}{k_{h3}^0} \end{cases}.$$

В приведенных формулах:

$R_{ep}$  – несущая способность грунта,  $\text{Н/мм}^2$ .

$$k_{h3}^0 = \frac{0,12 E_{zp} \eta_{zp}}{(1 - \mu^2) \sqrt{l_0 D_\kappa}} \left( 1 - e^{\frac{-2Z}{D_\kappa}} \right),$$

$E_{zp}$  – модуль упругости грунта,  $\text{Н/мм}^2$ ;

$l_0$  – единичная длина трубопровода, равная  $1000 \text{ мм}$ ;

Примечание: если принимаются другие размерности, например килограммы – сантиметры, то  $l_0=100 \text{ см}$ , а если тонны-метры  $l_0=1 \text{ м}$ .

$\mu$  – коэффициент Пуассона грунта;

$Z$  – глубина заложения от поверхности до оси трубы,  $\text{мм}$ ;

$\eta_{zp}$  – коэффициент, характеризующий положение в траншее.

$$\eta_{zp} = 0,547 \beta^2 - \beta + 0,854,$$

$$\beta = \begin{cases} \frac{a}{Z} \frac{a}{Z} < 1 \\ 1 \frac{a}{Z} \geq 1 \end{cases},$$

$a$  – расстояние от боковой образующей поверхности кожуха до стенки траншеи, мм

$$a = \begin{cases} a = 150 & D_{\kappa} < 700 \\ a = 0,25D_{\kappa} & D_{\kappa} \geq 700 \end{cases}.$$

Величина  $k_3$  находится с помощью итераций. Начальное приближение для  $k_{h3} - k_{h3}^0$ .

При дискретной модели взаимодействия с грунтом жесткость эквивалентной пружины  $c_3 = k_3 l$  ( $l$  – шаг расстановки упругих опор), а ее податливость  $\lambda_3 = l/c_3$ .

### П. 3.5. Грунт – вертикальная плоскость, параллельная оси трубы

Линейный коэффициент постели, Н/мм<sup>2</sup>

$$k_3 = k_{h3} \cdot D_{\kappa},$$

где  $k_{h3}$  не линейно зависит от вертикальных перемещений трубопровода и рассчитывается по ниже приведенным формулам

$$k_{h3ocu}^0 = \frac{0,144E_{гр.осн}}{(1 - \mu^2)\sqrt{l_0 D_{\kappa}}}, \quad \text{при } \delta_{\kappa} \geq 0 \text{ (перемещение вниз)}$$

$$k_{h3зас}^0 = \frac{0,072E_{гр.зас}}{(1 - \mu^2)\sqrt{l_0 D_{\kappa}}} \left( 1 - e^{\frac{-2Z}{D_{\kappa}}} \right), \quad \text{при } \delta_{\kappa} < 0 \text{ (перемещение вверх)}.$$



$$k_{h3} = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \delta_3 \leq -\frac{q_{np.zp.}}{k_{h3зac}^0 D_{\kappa}} - \frac{q_{np}}{C_{p.z}} \\ -\frac{q_{np} + \left( \delta_3 + \frac{q_{np.zp.}}{k_{h3зac}^0 D_{\kappa}} \right) \cdot C_{p.z}}{\delta_3 D_{\kappa}} & -\frac{q_{np.zp.}}{k_{h3зac}^0 D_{\kappa}} - \frac{q_{np}}{C_{p.z}} < \delta_3 < -\frac{q_{np.zp.}}{k_{h3зac}^0 D_{\kappa}} \\ \frac{q_{np} k_{h3зac}^0}{q_{np.zp.}} & -\frac{q_{np.zp.}}{k_{h3зac}^0 D_{\kappa}} \leq \delta_3 \leq 0 \\ k_{h3оч}^0 & 0 < \delta_3 \leq -\frac{R_{zp}}{k_{h3оч}^0} \\ \frac{R}{\delta_3} & \frac{R_{zp}}{k_{h3оч}^0} \end{array} \right.$$

$q_{np.zp.}$  – предельное сопротивление грунта,  $H/мм$

$$q_{np.zp.} = \gamma_{zp} D_{\kappa} \left( Z - \frac{\pi}{8} D_{\kappa} \right) + k \left( \gamma_{zp} \cdot Z^2 \operatorname{tg} 0,7 \varphi_{zp} + \frac{0,7 Z C_{zp}}{\cos 0,7 \varphi_{zp}} \right),$$

$$k = \begin{cases} 1 & D_{\kappa} \geq 1000 мм \\ \frac{D_{\kappa}}{1000} & D_{\kappa} < 1000 мм \end{cases},$$

$\gamma_{zp}$  – объемный вес грунта,  $H/мм^3$ ;

$q_{np}$  – предельное сопротивление поперечным перемещениям,  $H/мм$ ;

$$q_{np} = q_{mp} + q_{np.zp.};$$

Определение  $q_{mp}$  приведено в П. 3.7.

$C_{pz}$  – коэффициент разгрузки,  $H/мм^2$ ;

$$C_{pz} = \frac{q_{np}}{Z + 0,5 D_{\kappa}}$$

$R_{np}$  – несущая способность грунта,  $H/мм^2$ .

### П. 3.6. Грунт – вертикальная плоскость, перпендикулярная оси трубы

Сопротивление грунта продольным перемещениям трубы в области упругопластических деформаций можно представить линейной зависимостью, предложенной А.Б. Айнбиндером [124]

$$\tau_{лр} = c_{x0} \Delta_{усл},$$

Здесь:

$\tau_{лр}$  – предельное сопротивление грунта сдвигу,  $H/см^2$ ,

$c_{x0}$  – обобщенный коэффициент касательного сопротивления грунта  $H/см^3$ ,

$\Delta_{ycl}$  – условное перемещение, соответствующее предельному сопротивлению грунта сдвигу,  $см$ .

Зависимость получена путем замены истинной диаграммы сопротивления грунта продольным перемещениям, идеализированной, построенной по аналогии с диаграммой Прандтля. Обобщенный коэффициент касательного сопротивления грунта представляет собой отношение:

$$c_{x0} = \frac{\tau_{лр}}{\Delta_{ycl}}$$

и имеет размерность коэффициента постели грунта при сдвиге. В нормативной базе по грунтам он сокращенно называется коэффициентом сопротивления продольным перемещениям. Значения  $c_{x0}$ , полученные в результате обработки экспериментальных данных для некоторых типов грунтов, приведены в таблице. При отсутствии экспериментальных данных для получения значения  $c_{x0}$  можно использовать приближенную формулу:

$$c_{x0} = nk_u(h_1),$$

где:

$k_u(h_1)$  – коэффициент постели грунта при сдвиге, соответствующий толщине слоя грунта над трубой  $h_1$  в 1 метр,

$n$  – понижающий коэффициент, принимаемый по таблице, когда толщина слоя грунта над трубой  $h_2$  превышает 1 метр. Зависит от отношения  $h_1/h_2$ .

Линейный коэффициент постели,  $H/мм^2$

$$k_3 = k_{h3} \cdot D_\kappa,$$

где:

$$k_{h3} = \begin{cases} \frac{q_{mp}}{|\delta_3| D_\kappa} & |\delta_3| > \frac{q_{mp}}{\pi D_\kappa c_{x0}} \\ \pi c_{x0} & |\delta_3| \leq \frac{q_{mp}}{\pi D_\kappa c_{x0}} \end{cases}.$$

В приведенных формулах:

$q_{mp}$  – интенсивность сил трения, действующих вдоль оси трубы при

бесканальной прокладке в грунте, Н/м [5];

$D_k$  – диаметр кожуха изоляции, м;

$c_{x0}$  – обобщенный коэффициент касательного сопротивления грунта Н/м<sup>3</sup>; вычисляется как средняя величина между коэффициентами грунта основания, засыпки сверху и сбоку;

$\delta_3$  – осевые перемещения трубопровода.

Величина  $k_3$  находится с помощью итераций. Начальное приближение для  $k_{h3} - k_{h3}^0$ .

В случае применения компенсирующих подушек, величина коэффициента постели  $k_3$  уменьшается в 1000 раз.

Для реализованной дискретной модели взаимодействия с грунтом жесткость эквивалентной пружины  $c_3 = k_3 l$  ( $l$  – шаг расстановки упругих опор), а ее податливость  $\lambda_3 = 1/c_3$ .

Таблица П3.1

**Значение обобщенного коэффициента и сопротивления грунта  $c_{x0}$ , МПа/см**

Виды грунтов	Пределы нормативных значений консистенции грунтов $I_L$	Характеристики грунтов при коэффициенте пористости $\varepsilon$				
		<0,5	0,5–0,6	0,61–0,7	0,71–0,8	>0,8
Пески гравелистые, крупные и средней крупности	–	0,033	0,030	0,027	0,025	0,025
Пески мелкие и пылеватые	–	0,025	0,021	0,021	0,019	0,019
Супеси	$0 < I_L \leq 0,25$	0,035	0,033	0,030	0,030	0,030
	$0,25 < I_L \leq 0,75$	0,035	0,032	0,030	0,025	0,025
Суглинки	$0 < I_L \leq 0,3$	0,038	0,035	0,035	0,032	0,030
	$0,3 < I_L \leq 0,75$	0,035	0,033	0,030	0,025	0,020
Глины	$0 < I_L \leq 0,3$	0,040	0,038	0,035	0,033	0,030
	$0,3 < I_L \leq 0,75$	0,045	0,040	0,035	0,030	0,030

Приближенные значения коэффициента постели  $k_u(h_i)$  для некоторых типов грунтов, заимствованные из [30], приведены в таблице П 3.3.

Таблица П 3.2

**Понижающий коэффициент  $n$**

$h_1/h_2$	1,0	0,8	0,6	$\leq 0,5$
$n$	1,0	0,9	0,8	0,75

Таблица П 3.3

**Значения коэффициента постели при сдвиге  
при высоте засыпки над трубой  $h_1=1,0\text{м}$**

Грунт	$k_u(h_i), \text{Н/см}^3$
Супесь	5
Суглинок	4
Торф сухой	0,5
Торф влажный	1,0

**П. 3.7. Определение нагрузки от веса грунта, действующей на трубопровод**

Нормативную нагрузку от веса грунта на единицу длины трубопровода, укладываемого в траншее, следует определять по формуле

$$q_{cp} = \eta_h \gamma_{cp} B H,$$

где  $B$  - расчетная ширина траншеи на уровне верха изоляции;

$$H = \left( Z - \frac{D_k}{2} \right);$$

$Z$  - расстояние от оси трубы до поверхности земли, м;

$\eta_h$  - коэффициент вертикального давления грунта, определяемый по таблице:

$H/B$	Коэффициент вертикального давления $\eta_h$ для типов грунтов				
	1	2	3	4	5
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,0	0,82	0,84	0,86	0,89	0,91
2,0	0,68	0,73	0,76	0,80	0,82
3,0	0,59	0,63	0,66	0,70	0,74
4,0	0,52	0,55	0,58	0,64	0,66
5,0	0,45	0,48	0,51	0,56	0,60
6,0	0,40	0,44	0,46	0,50	0,54

H/B	Коэффициент вертикального давления $\eta_h$ для типов грунтов				
	1	2	3	4	5
7,0	0,35	0,39	0,42	0,45	0,50
8,0	0,32	0,35	0,38	0,42	0,46
9,0	0,29	0,32	0,35	0,39	0,44
10,0	0,27	0,30	0,34	0,37	0,42

Примечание. Типы грунтов:

- 1 - пески маловлажные и растительный грунт;
- 2 - пески и растительный грунт влажные и насыщенные водой, супесь твердая, тугопластичная и пластичная; суглинок твердый и тугопластичный;
- 3 - супесь мягкопластичная и текучая; суглинок пластичный, глина твердая и тугопластичная;
- 4 - суглинок мягкопластичный и текучий, глина пластичная и мягкопластичная;
- 5 - глина текучая.

В трубопроводах бесканальной прокладки в грунте силы трения действуют вдоль оси трубы как распределенная нагрузка с интенсивностью Н/м:

$$q_{тр} = \mu \left[ (1 - 0,5 \sin \varphi_{гр}) \gamma_{гр} Z \pi D_k + g \right]$$

где:

$g$  – суммарный погонный вес материала трубы, продукта, изоляции.

$\varphi_{гр}$  – угол внутреннего трения грунта.

Коэффициент трения определяется по формуле

$$\mu = \operatorname{tg} n_m \varphi_{гр} ,$$

где:

$n_m$  - коэффициент, зависящий от конструкции изоляции и характера нагружения.

Для наиболее распространенных изоляционных конструкций значения  $n_m$  приведены в таблице. Для других изоляционных конструкций значения  $n_m$  следует принимать на основе справочных или экспериментальных данных.

Характер нагружения	Коэффициент $n_m$	
	Пенополиуретан с оболочкой из полиэтилена	Армопенобетон, полимербетон
Многократное чередование циклов нагрев - охлаждение	0,33	0,67
Однократный нагрев (охлаждение)	0,67	1,00
Кратковременное приложение нагрузки	1,00	1,15

## Приложение 4. Определение местной жесткости узлов врезки штуцера

Здесь приведены положения и формулы из ряда известных отечественных и зарубежных нормативных документов [3, 4, 5, 6, 16, 119–123], реализованные в “калькуляторе” препроцессора ПК АСТРА-НОВА для ортогональных (нормальных) соединений “штуцер-обечайка” и “штуцер-днище”. Эти положения и формулы согласованы, в частности, с реализацией в ПК PVP-Design (в целом сохранена в несколько усеченно-откорректированном виде авторская редакция к.т.н. Б.С. Вольфсона).

При этом необходимо четко понимать (и это подтверждено, в частности, решенными верификационными задачами по АСТРА-АЭС [78] с “точным” определением матриц коэффициентов локальной жесткости по пространственно-оболочечным конечноэлементным моделям), что реальные коэффициенты местной жесткости-податливости соединений “штуцер-обечайка” могут весьма значительно отличаться от приведенных аналитических выражений.

### 1. Условные обозначения (все линейные размеры – в мм)

$D$  – внутренний диаметр цилиндрической обечайки или выпуклого днища,

$D_k$  – внутренний диаметр конической обечайки в месте расположения штуцера,

$d$  – внутренний диаметр штуцера,

$H$  – внутренняя высота эллиптической части днища,

$l_l$  – исполнительная длина штуцера,

$l_{lv}$  – исполнительная длина усиленной части штуцера,

$l_2$  – исполнительная ширина накладного кольца,

$R_{сф}$  – внутренний радиус сферического сегмента торосферического днища,

$S$  – исполнительная толщина стенки обечайки,

$S_l$  – исполнительная толщина стенки штуцера,

$S_{lv}$  – исполнительная толщина усиленной части штуцера,

$S_2$  – исполнительная толщина накладного кольца,

$x$  – расстояние от центра отверстия до оси эллиптического днища,

$\alpha_k$  – половина угла раствора при вершине конической обечайки, рад, град,

$E$  – модуль упругости материала корпуса, МПа,

$\mu$  – коэффициент Пуассона

### 2. Пределы применения

В дополнение к требованиям п.п. 4.2, 4.4, 6.1.1 и 6.2.1 ГОСТ Р 52857.3-2007 действуют следующие ограничения для применения приведенных ниже зависимостей:

1) для узлов врезки штуцеров в цилиндрические и конические обечайки расстояние от края штуцера или накладного кольца до ближайшего конца

расчетной длины участка обечайки должно быть не менее  $0,5(D+S)$  или  $0,5(D/\cos \alpha_k + S)$ , соответственно;

2) для узлов врезки штуцеров в выпуклые днища расстояние от края штуцера или накладного кольца до края внешней поверхности выпуклого днища должно быть не менее  $0,1(D+2S)$ , а внутренний диаметр штуцера  $d$  не более чем  $0,67R-S_1$ .

### 3. Узел врезки штуцера в цилиндрическую обечайку

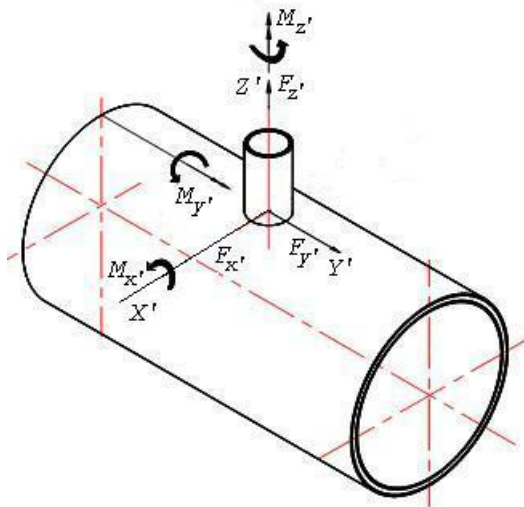


Рис. 4.1 Положительные направления сил и моментов

3.1. Угловая жесткость узла врезки штуцера без накладного кольца при действии момента  $M_x$  в продольном направлении:

$$K_{Mx} = \frac{M_x}{\theta_x} = \frac{EI}{k_x (d + 2S_1)}$$

$$\text{где: } k_x = 0.2 \frac{(D + 2S)}{S} \cdot \frac{S_1}{S} \sqrt{\frac{(d + 2S_1)S}{(D + 2S)S_n}}$$

$I$  – момент инерции сечения штуцера при изгибе,  $\text{мм}^4$ :

$$I = \frac{\pi \left[ (d + 2S_1)^4 - d^4 \right]}{64}$$



3.2. Угловая жесткость узла врезки штуцера без накладного кольца при действии момента  $M_y$  в окружном направлении:

$$K_{M_y} = \frac{M_y}{\theta_y} = \frac{EI}{k_y (d + 2S_1)}$$

$$\text{где: } k_y = 0.1 \frac{(D + 2S)}{S} \cdot \frac{S_1}{S} \sqrt{\frac{(d + 2S_1)}{S_n}}$$

– для штуцеров без утолщенной части:

$$S_n = S_1$$

– для штуцеров с утолщенной частью:

$$S_n = S_{1v} - \text{при } l_{1v} \geq 0.5 \sqrt{(d + S_{1v}) S_{1v}}$$

$$S_n = S_1 - \text{при } l_{1v} < 0.5 \sqrt{(d + S_{1v}) S_{1v}}$$

3.3. Угловая жесткость узла врезки штуцера без накладного кольца при действии крутящего момента  $M_z$ :

$$K_{M_z} = \frac{M_z}{\theta_z} = \frac{GI_K}{k_z (d + 2S_1)}$$

$$\text{где: } k_z = 0.06 \left[ \frac{(d + 2S_1) S_1}{(D + 2S) S} \right]^4 \left( \frac{D + 2S}{S} \right)^{1.5}$$

$I_K$  – момент инерции сечения штуцера при кручении, мм<sup>4</sup>:

$$I_K = \frac{\pi [(d + 2S_1)^4 - d^4]}{32}$$

$G$  – модуль сдвига, Н/мм<sup>2</sup>:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \approx \frac{E}{2.6}$$

3.4. Линейная жесткость узла врезки штуцера без накладного кольца при действии силы  $F_z$ , направленной по оси штуцера, Н/мм:

$$K_{F_z} = \frac{F_z}{\delta_z} = \frac{E(D + S)}{2A_n \gamma^m}$$

где:  $A_n(\alpha, \beta)$  – коэффициент, приведенный на рис. 4.2 для значений  $\beta=0$ , 1/8 и 1/4. Для промежуточных значений определяется линейной интерполяцией (см. ниже). При значениях  $\beta > 1/4$  линейная податливость узла врезки штуцера при действии силы  $F_z$ , направленной по оси штуцера, в сторону запаса, принимается равной нулю, а линейная жесткость не определяется.

$$\alpha = \frac{2L_{eq}}{D+S}; \quad \beta = \frac{d+S_1}{D+S}; \quad \gamma = \frac{D+S}{2S}$$

$L_{eq}$  – эквивалентная длина участка цилиндрической обечайки, на котором расположен штуцер, мм:

$$L_{eq} = L - \frac{4b_x^2}{L}$$

$L$  – расчетная длина участка обечайки, на котором расположен штуцер. Принимается равной расчетной длине  $l$  гладкой цилиндрической обечайки нагруженной наружным давлением или перерезывающей силой (п. 5.3.2.2 ГОСТ Р 52857.2-2007) или расчетной длине  $l$  обечайки, укрепленной кольцами жесткости и нагруженной наружным давлением, при определении допускаемого давления, исходя из условий упругой устойчивости между кольцами жесткости (п. 5.4.2.2.1 ГОСТ Р 52857.2-2007), мм.

$b_x$  – расстояние между центром штуцера и серединой расчетной длины  $L$  участка обечайки, на котором расположен штуцер, мм.

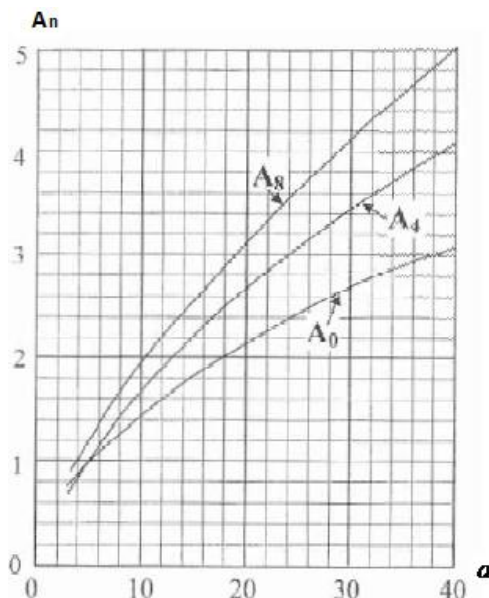


Рис. 4.2

$A_0$  – при  $\beta = 0$ ,  $A_8$  – при  $\beta = 1/8$ ,  $A_4$  – при  $\beta = 1/4$

$m$  – показатель степени. Принимается равным:  $m=2,22$  – при  $\beta=0$ ,  $m=2,125$  – при  $\beta=1/8$ ,  $m=2,10$  – при  $\beta=1/4$ .

Порядок интерполяции при определении величины  $K_{Fz}$  следующий. Вычисляется величина  $\beta$  и рассчитываются значения  $K_{Fz}$  для табличных значений  $\beta$  (0, 1/8, 1/4), между которыми лежит вычисленная величина  $\beta$ . С помощью линейной интерполяции  $K_{Fz}$  определяется значение жесткости, соответствующее вычисленной величине  $\beta$ .

#### 4. Узел врезки штуцера в коническую обечайку

Величины жесткости конической обечайки в месте врезки штуцера при воздействии внешних сил и моментов от присоединенных трубопроводов вычисляются по формулам раздела 3, также как для цилиндрической обечайки, с учетом следующих особенностей.

Значения коэффициентов  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$  для определения жесткости конической обечайки в месте врезки штуцера при действии изгибающих и крутящего моментов рассчитываются по формулам:

$$k_x = 0.2 \frac{(D_{\hat{e}} + 2S)}{S \sqrt{\cos \alpha_{\hat{e}}}} \cdot \frac{S_1}{S} \sqrt{\frac{(d + 2S_1)S}{(D_{\hat{e}} + 2S)S_n}}$$

$$k_y = 0.1 \frac{(D_{\hat{e}} + 2S)}{S \cos \alpha_{\hat{e}}} \cdot \frac{S_1}{S} \sqrt{\frac{(d + 2S_1)}{S_n}}$$

$$k_z = 0.06 \left[ \frac{(d + 2S_1)S_1}{(D_{\kappa} + 2S)S} \right]^4 \left( \frac{D_{\kappa} + 2S}{S} \right)^{1.5} (\cos \alpha_{\kappa})^{2.5}$$

Величины жесткости и расчетных коэффициентов при действии силы  $F_z$ , направленной по оси штуцера, рассчитываются по формулам:

$$K_{Fz} = \frac{F_z}{\delta_z} = \frac{E(D_{\kappa} + S)}{2A_n \gamma^m \cos \alpha_{\kappa}}$$

$$\alpha = \frac{2L_{eq}}{D_{\kappa} + S} \cos \alpha_{\kappa}; \quad \beta = \frac{d + S_1}{D_{\kappa} + S} \cos \alpha_{\kappa}; \quad \gamma = \frac{D_{\kappa} + S}{2S \cos \alpha_{\kappa}}$$

При определении эквивалентной длины участка цилиндрической обечайки, на котором расположен штуцер,  $L_{eq}$ , расчетная длина участка обечайки  $L$  принимается равной длине конической обечайки.

5. Узел врезки штуцера в полусферическое, торосферическое или эллиптическое днище

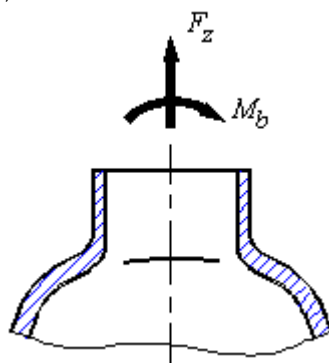


Рис. 4.3

Расчетный средний радиус днища в месте расположения отверстия, мм:

– для полусферического днища:

$$R = \frac{D + S}{2}$$

– для торосферического днища:

$$R = R_{сф}$$

– для эллиптического днища:

$$R = \frac{(D + S)^2}{2(2H + S)} \sqrt{1 - 4 \frac{(D^2 - 4H^2)}{D^4} x^2}$$

Безразмерный параметр:

– для штуцеров без утолщенной части:  $u = 0.91 \frac{(d + S_1)}{\sqrt{RS}}$

– для штуцеров с утолщенной частью:  $u = 0.91 \frac{(d + S_{1v})}{\sqrt{RS}}$

5.1. Линейная жесткость узла врезки штуцера без накладного кольца при действии силы  $F_z$ , направленной по оси штуцера, Н/мм:

$$K_{F_z} = \frac{F_z}{\delta_z} = \frac{ES^2}{k_0 R}$$

где:  $k_0$  – безразмерный коэффициент, определяемый по рис. 4.4, в зависимости от параметра  $u$ .

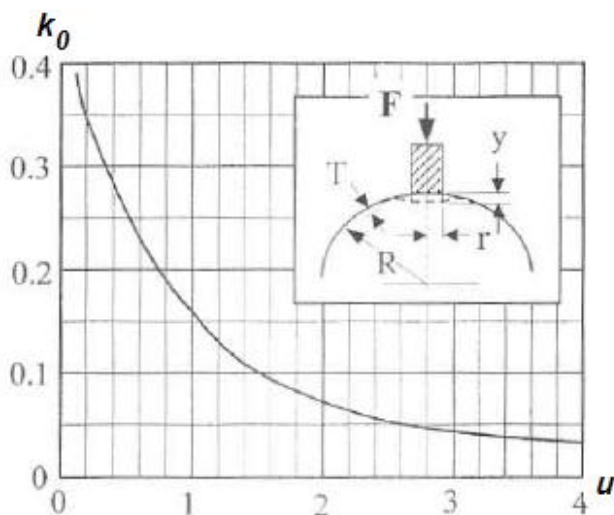


Рис. 4.4

5.2. Угловая жесткость узла врезки штуцера без накладного кольца при действии момента  $M_b$ :

$$K_{Mb} = \frac{M_b}{\theta_b} = \frac{uES^3}{1.82k_b}$$

где:  $k_b$  – безразмерный коэффициент, определяемый по рис. 4.5, в зависимости от параметра  $u$ .

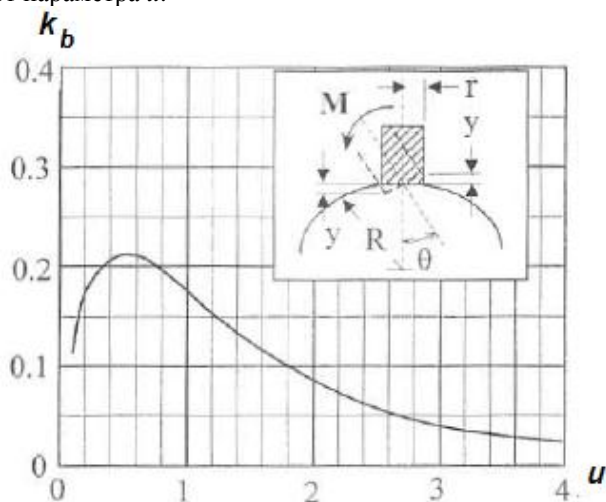


Рис. 4.5

# **6. Приближенное определение местной жесткости узла врезки штуцера, укрепленного накладным кольцом**

В случае, если ширина накладного кольца удовлетворяет условиям:

– для цилиндрической обечайки:  $l_2 \geq 1.4\sqrt{D(S+S_2)}$

– для конической обечайки:  $l_2 \geq 1.4\sqrt{\frac{D(S+S_2)}{\cos \alpha}}$

– для выпуклого днища:  $l_2 \geq 2\sqrt{R(S+S_2)}$

местная жесткость узла врезки штуцера, укрепленного накладным кольцом, рассчитывается по формулам разделов 3, 4, 5, также как для узла врезки штуцера без накладного кольца, но при этом, вместо толщины корпуса  $S$  в формулы разделов 3, 4, 5 следует подставлять суммарную толщину корпуса и накладного кольца  $(S+S_2)$ .

В случае, если приведенные выше условия не выполняются и ширина накладного кольца меньше соответствующих значений для цилиндрической и конической обечаек и выпуклых днищ, местные податливости узла врезки  $Y_i$  определяются как сумма двух величин:

$$Y_i = Y_i'' + Y_i^{rp}$$

где:  $Y_i''$  – рассчитывается по формулам разделов 3, 4, 5, также как для узла врезки штуцера без накладного кольца, но при этом, вместо толщины корпуса  $S$  в формулы разделов 3, 4, 5 следует подставлять суммарную толщину корпуса и накладного кольца  $(S+S_2)$ .

$Y_i^{rp}$  – рассчитывается по формулам разделов 3, 4, 5, также как для узла врезки штуцера без накладного кольца, но при этом, вместо толщин  $S_I$  и  $S_{IV}$  в формулы разделов 3, 4, 5 следует подставлять  $(S_I+l_2)$  или  $(S_{IV}+l_2)$ , соответственно.

Жесткость узла врезки штуцера с накладным кольцом при действии  $i$ -ой нагрузки определяется как:

$$K_i = \frac{1}{Y_i}$$