

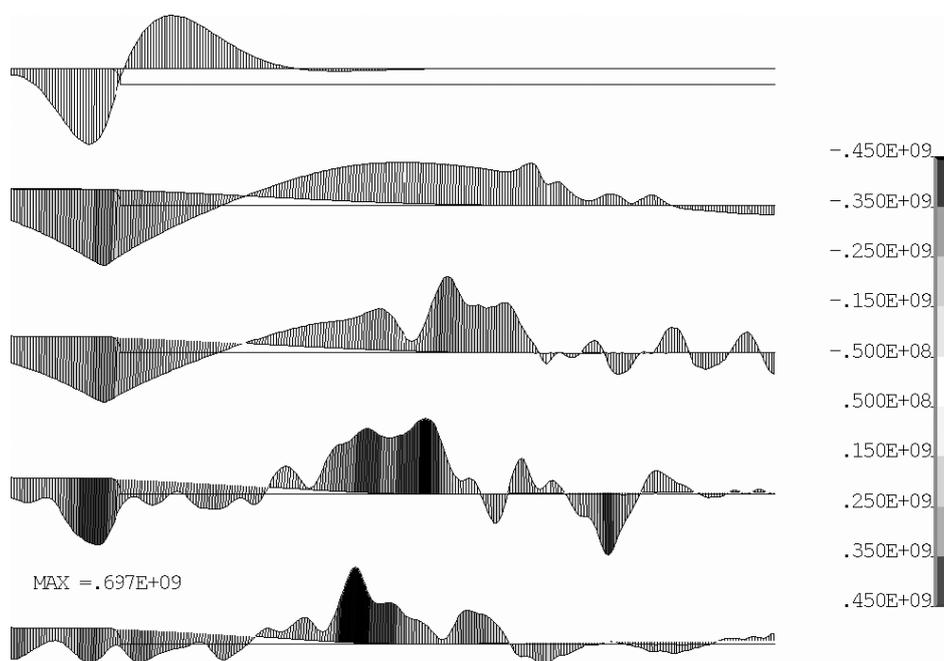
# МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

*А.О. Чернявский*

Прокладка магистральных трубопроводов в сейсмически опасных районах должна выполняться таким образом, чтобы исключить разрушение трубы с нарушением герметичности при сейсмических воздействиях, вызывающих подвижки грунта. Схожие задачи возникают при необходимости обеспечения прочности трубопроводов в условиях оползней или морозного пучения. Наибольшей величины подвижки грунта при сейсмиче-

ских воздействиях достигают в окрестностях геологических разломов. Так, например, трассы нефте- и газопроводов, соединяющие шельфовые месторождения северной части о. Сахалин с перерабатывающим заводом на юге острова, пересекают 3 разлома, берега которых при землетрясении могут получить взаимные смещения до 3 м по вертикали и 3 м по горизонтали [1]. Смещающиеся берега разделены малым – порядка метров – расстоянием, и возникающие смещения должны приводить к появлению значительных перерезывающих сил, действующих на трубу.

При опускании грунта одного из берегов разлома часть трубопровода может оказаться висящей без опоры на грунт. Расчеты в квазистатической постановке, приведенные в [1], показывают, что напряжения при этом не превышают предела текучести и опасности разрушения трубы нет. Для оценки влияния динамического характера нагружения при быстром опускании (свободном падении) грунта был выполнен прикидочный расчет, не учитывавший влияние грунта засыпки. Расчет показал, что при падении трубы на опустившуюся часть грунта (рис. 1) точка контакта трубы с грунтом движется по направлению к возникшей «ступеньке», при этом в трубе возникают волны напряжений; максимальные напряжения, оцененные в предположении линейной упругости материала оказываются примерно в 2,6 раза больше вычисленных без учета динамических эффектов и примерно в 1,5 раза превосходят предел текучести материала трубы. Грунт засыпки, располагающегося в том числе и над трубой, может еще более усугубить ситуацию, что делает необходимым уточнение расчетов.



**Рис. 1.** Осевые напряжения в трубе при быстром опускании одного из берегов разлома. Последовательные моменты времени

Анализ напряженно-деформированного состояния трубопроводов, находящихся в грунте, выполняются с помощью ряда методик и реализующих их программ. В частности, программный комплекс CAN-PIPE, аттестованный в атомной промышленности, содержит специальные конечные элементы типа «труба в грунте», у которых сопротивление смещению трубы различно по направлениям «вверх», «вниз» и «по горизонтали». Однако существующие методики ориентированы на относительно малые смещения, позволяющие пренебречь изменением геометрии системы «труба – траншея – грунт засыпки». Испытания по определению сопротивления трубы смещению (см., например, [Сахалин-2]), также проводятся при небольших – порядка сантиметров – смещениях вследствие очевидных трудностей проведения таких экспериментов на трубах диаметром 1220 мм.

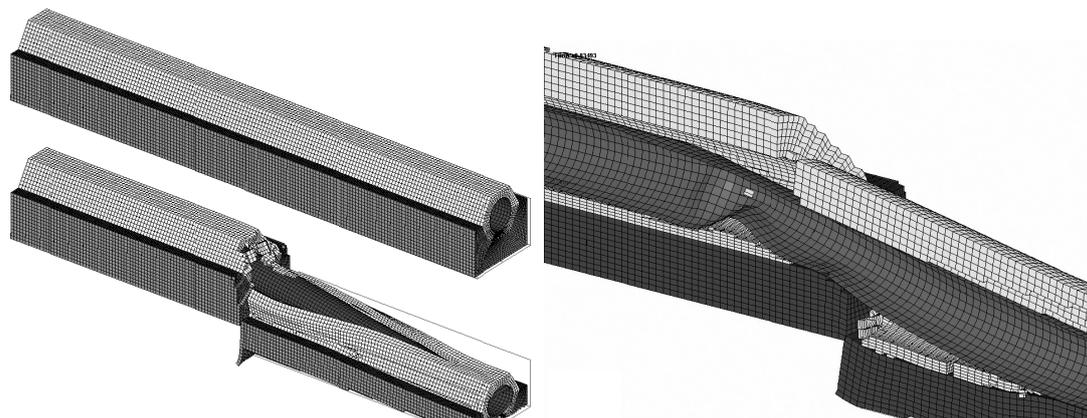
Для расчета напряженно-деформированного состояния системы «труба – траншея в основном грунте – грунт засыпки» была выполнена серия расчетов методом конечных элементов с использованием пакета LS-DYNA [2]. Материал трубы рассматривался как упруго-пластический с линейным упрочнением, параметры материала определялись по нормативным данным (пределу текучести, пределу прочности и удлинению при разрыве) стали класса прочности X60. Материал грунта описывался моделью Друкера-Прагера: упруго-пластический материал с линейным кинематическим упрочнением и линейной зависимостью предела текучести от среднего напряжения; параметры модели основного грунта задавались по [3], а параметры грунта засыпки подбирались так, чтобы описать результаты экспериментов по малым (до 10 см) смещениям труб, приведенные в [1].

Конечно-элементное моделирование системы «основной грунт – труба – засыпка» (рис. 2, засыпка показана более светлой) при вертикальном смещении берегов разлома более 2 метров предсказывает местную потерю устойчивости трубы с образованием складок. Точную форму складок расчетом предсказать невозможно, поскольку она зависит от начальных несовершенств формы трубы, но концентрация деформаций в «вершинах» складок вполне может привести к исчерпанию ресурса пластичности и образованию недопустимых сквозных трещин.

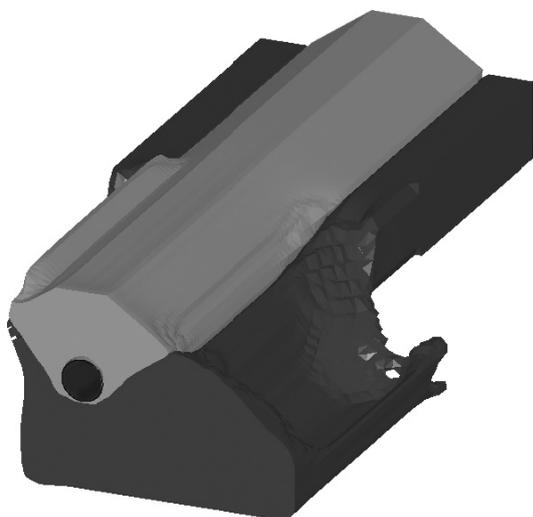
При моделировании грунта конечными элементами в формулировке Лагранжа (см. рис. 2) обязательным оказывается введение «разрушения» грунта путем исключения конечных элементов. Такое исключение нужно как для имитации реального разрушения грунта при растяжении (рассыпания, особенно характерного для легкого грунта засыпки), так и для исключения численных проблем с элементами в зоне высоких градиентов смещений. Искусственность этого приема (удаление элементов для исключения проблем с интегрированием на слишком деформированных элементах) и противоречащая физике потеря массы системы при таком исключении дают ошибку, которая в данном случае будет идти не в запас прочности.

Для исключения этой ошибки расчеты могут быть выполнены с моделированием грунта в формулировке Эйлера – как среды, «текущей» сквозь неподвижную в пространстве сетку.

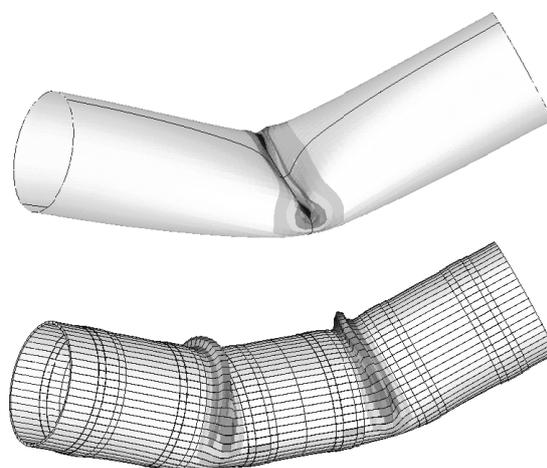
Использование смешанной формулировки (грунт – в формулировке Эйлера, труба – в формулировке Лагранжа) позволяет без использования искусственных приемов решать задачи о больших перемещениях. Пример результатов расчета приведен на рис. 3. Как и при использовании подхода Лагранжа, расчет предсказывает образование складок на трубе.



**Рис. 2.** Деформирование системы «основной грунт – труба – грунт засыпки». Конечные элементы в формулировке Лагранжа



**Рис. 3.** Большие смещения грунта (в формулировке Эйлера)



**Рис. 4.** Деформации гладкой и оребренной труб (более темный цвет соответствует большей интенсивности деформаций)

Для снижения опасности образования складок с большой концентрацией деформаций и возможностью исчерпания ресурса пластичности материала могут быть использованы разные подходы. Авторы работы (Сахалин-2) предлагают использовать трубы с увеличенной почти в 2 раза

толщиной стенки (32 мм против 17 мм для трубы диаметром 1220 мм) из сталей класса X60. Отметим, что такие трубы в России не выпускаются. В качестве альтернативы рассматривались оребренные трубы: имеющаяся на кафедре ПМиДПМ технология [4] позволяет с помощью теплосмен создавать кольцевые утолщения-ребра без изменения физико-механических характеристик материала (без фазовых превращений). По оценкам, стоимость создания таких ребер не превышает 1/10 стоимости трубы производства ЧТПЗ, тогда как труба даже обычно (не сейсмического) класса прочности производства Германии (Mannesmann) примерно в 3 раза дороже трубы производства ЧТПЗ того же класса прочности. Наличие ребер позволяет изменить форму потери устойчивости и получать вместо одной складки с высокими деформациями несколько складок с соответственно меньшими уровнями деформаций. Пример моделирования показан на рис. 4: наличие ребер уменьшает максимальную деформацию с 55 до 25 %, значительно снижая опасность образования сквозной трещины.

#### Библиографический список

1. Анализ участков пересечения с тектоническими разломами – нефтепровод 24" и газопровод 48" – разлом 20 (Fault crossing analysis – 24" oil and 48" gas p/l – fault 20). Проект Сахалин II, этап 2 – ипс контракт h-00464, Документ 5600-Z-90-42-C-9019-00. – Italy: Фирма Snamprogetti, 2007. – 61 с.
2. LS-DYNA v.971 keyword manual. – USA, Livermore, LSTC, 2007. – 2206 p.
3. СНиП 2.02.01-83. Основания зданий и сооружений. – М., 1995. – 34 с.
4. Устройство для выполнения гофров на трубных заготовках: а. с. № 1333441 / Д.А. Гохфельд, А.В. Ильин, О.Ф. Чернявский. – Зарегистр. в Госреестре изобрет. СССР 01.05.1987 г. – 1987.