

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИИ В МЕСТЕ ВЗАИМНОГО ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ANSYS И LS-DYNA

С.В. Ганага, С.А. Ковалев (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)

Среди критически важных участков газотранспортной системы России особое место занимают места взаимных пересечений газопроводов, а также газопроводов с нефтепроводами, в частности случаи, когда нижняя труба в месте пересечения принадлежит газопроводу. В настоящее время нет четкого ответа на вопрос о возможности развития каскадных эффектов при разрыве нижней нитки газопровода.

Целью работы являлся поиск возможных технических решений по повышению устойчивости функционирования мест пересечения газо- и нефтепроводов и предотвращение каскадных эффектов.

Используемая в расчетах программа LS-DYNA включена в состав и полностью интегрирована с многофункциональным расчетным программным комплексом ANSYS. Программа LS-DYNA (наряду с известными коммерческими расчетными комплексами «явной» динамики, такими как ABAQUS/Explicit, MSC.DYTRAN, ANSYS AUTODYN и пр.) является на сегодняшний момент наиболее используемым и удобным продуктом.

На базе ANSYS LS-DYNA разработана расчетная методика и выбраны наиболее приемлемые модели для расчета динамических процессов при аварийном разрыве одной из ниток напряженно-деформированного состояния стенок трубопроводов и условий их возможного разрушения.

Расчетная методика

Для расчета движения и деформирования сред в работе применяется подход, основанный на математическом аппарате механики сплошной среды (МСС). Полная система дифференциальных нестационарных уравнений МСС в самом общем виде представлена ниже:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla_i v^i = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = F_i + \nabla_j \sigma_{ij}, \quad (2)$$

$$\rho \frac{dE}{dt} = \sigma^{ij} \dot{\epsilon}_{ij} + \nabla_i q^i, \quad (3)$$

$$\frac{du_i}{dt} = v_i, \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (\nabla_i v_j + \nabla_j v_i), \quad (5)$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} (\nabla_i u_j + \nabla_j u_i + \nabla_i u_k \nabla_j u^k), \quad (6)$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(\epsilon_{ij}, \dot{\epsilon}_{ij}, T). \quad (7)$$

где t – текущее время; ρ – плотность среды; v_i – компоненты вектора массовых скоростей; F_i – компоненты вектора массовых сил; σ_{ij}^j – компоненты тензора напряжений; ϵ_{ij} , $\dot{\epsilon}_{ij}$ – компоненты тензоров деформаций и скоростей деформаций; q^i – вектор тепловых потоков; u_i – перемещения; T – температура.

Индивидуальные особенности рассматриваемой среды в отношении оказания сопротивления деформированию учитываются физическими соотношениями (7), включаемыми в систему исходных уравнений согласно выбранной модели сплошной среды. Система дополнена начальными и граничными условиями, соответствующими постановке конкретной задачи.

Модели механического поведения материалов

Модель среды конкретизирует общую формулировку физических соотношений $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(\epsilon_{ij}, \dot{\epsilon}_{ij}, E)$, замыкающих систему уравнений МСС. Используемые в конечно-элементной вычислительной методике модели деформирования различных сред основаны на принципе выделения из тензоров деформаций и напряжений отдельных компонентов – шарового тензора и девиатора, соответственно, отвечающих за изменение объема и формы, то есть физическое и механическое поведение $\sigma_{ij} = -p + D_{\sigma ij}$. В итоге определяющими соотношениями модели будут две независимых составляющих: уравнение состояния (УРС) – зависимость, связывающая три величины – давление, плотность и удельную внутреннюю энергию (или температуру), $p = p(\rho, E)$ как мера объемной сжимаемости и термических эффектов и зависимость девиаторных компонентов тензора напряжений от девиаторных компонентов тензоров деформаций и скоростей деформаций $D_{\sigma} = D_{\sigma}(D_{\epsilon}, D_{\dot{\epsilon}})$ как мера формоизменения.

Для расчета поведения жидких и газообразных сред достаточно учесть только уравнения состояния.

Соотношения для компонентов девиатора тензора напряжений определяются композицией закона пластического течения Прандтля-Рейсса – при пластическом деформировании и закона Гука – для нагрузок, не превышающих предел пластического течения. Уравнения Прандтля-Рейсса формируются следующим образом:

$$\frac{dD_{\sigma ij}}{dt} + 2G\dot{\lambda}D_{\sigma ij} = 2G(\dot{\epsilon}_{ij} + \frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt} g_{ij}), \quad (8)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{3}{2\sigma_T^2} \sigma^{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^{(p)}, \quad (9)$$

где G – модуль сдвига; λ – скалярный множитель, определяемый удельной мощностью пластических деформаций; σ_T – предел текучести; $\dot{\epsilon}_{ij}^{(p)}$ – компоненты тензора скоростей пластических деформаций. В данной численной реализации представленной теории скалярный множитель явным образом не вычисляется, а применяется эквивалентная процедура приведения вектора полных напряжений в пространстве напряжений в «круг текучести», подробно описанная в [1].

Модель природного газа

Для описания физического поведения природного газа в расчетах использовалось УРС идеального газа в форме:

$$p = \rho RT, \quad (10)$$

где $R = C_p - C_v$ – газовая постоянная; C_p, C_v – удельные теплоемкости при постоянном давлении и объеме. Для природного газа принималось (соответствует 100%-ному содержанию метана): $R = 518,2$ Дж/кг·К, $\rho_0 = 0,668$ кг/м³ – плотность при стандартных атмосферных условиях.

Модель нефти

Физическое поведение нефти описывалось моделью баротропной вязкой жидкостью с постоянным коэффициентом объемного сжатия, равным $5 \cdot 10^8$ Па.

Модель грунтовых сред

Грунт представляет собой дисперсную среду – смесь минеральных частиц, воды и воздуха. Минеральные частицы образуют пористый скелет, поры которого заполнены водой и воздухом. Основными механическими свойствами грунтовых сред, которые необходимо учитывать при математическом моделировании компрессионного воздействия на грунтовые массивы, являются: наличие внутреннего трения, необратимость объемных и сдвиговых деформаций, пластическое течение и разрушение скелета грунта. В работе используется модель упругопластической сжимаемой среды, учитывающая нелинейные процессы сдвигового и объемного деформирования.

Критерий пластичности Мизеса в самом общем случае для грунтов при наличии внутреннего трения имеет вид

$$\frac{D_{\sigma_{ij}} D_{\sigma_{ij}}}{2} = \frac{Y^2(p)}{3}, \quad (11)$$

где Y – динамический предел текучести. Среда, подчиненная такому закону, может находиться в двух состояниях – упругом и пластическом. Наличие внутреннего трения у грунтов обуславливает то, что предел прочности Y не постоянен и зависит от давления. Эффекты дилатансии – появление объемных деформаций в условиях чистого сдвига – в модели не учитываются. Для данного класса задач, где грунты подвергаются очень большим степеням деформации, при наличии фрагментации, а также возможной фильтрации сквозь грунтовый массив сжатого газа, использование сложных дилатансионных моделей представляется нецелесообразным.

В основе большинства критериев сдвиговой прочности грунтов лежит комбинация закона сухого трения Кулона, то есть зависимости максимальных сдвиговых напряжений от давления, а также классических теорий прочности Мизеса и Треска. В данной работе критерием пластичности, при котором упругопластическая среда переходит из упругого состояния в пластическое, в работе выбирается критерий, предложенный в работах [2–4]. Предел сдвиговой прочности для грунтов является функцией давления и определяется зависимостью (рис. 1):

$$Y(p) = Y_0 + \frac{\mu p}{1 + \mu p / (Y_{pl} - Y_0)}, \quad (12)$$

где Y_0 – сцепление грунта, то есть прочность при нулевом давлении; Y_{pl} – предельное значение сдвиговой прочности; μ – коэффициент трения.

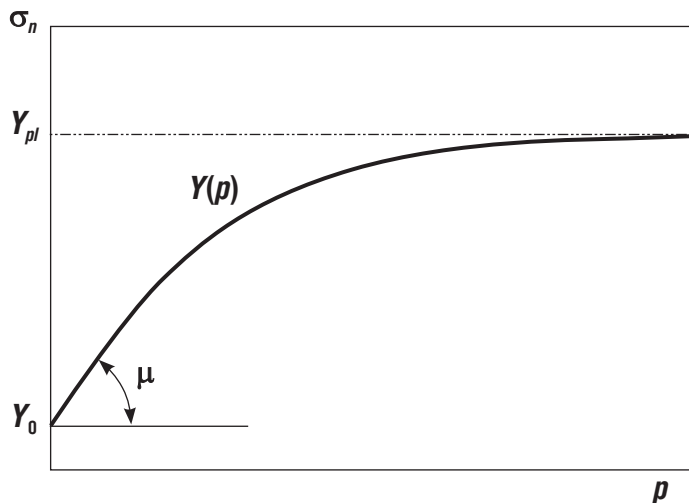


Рис. 1. Зависимость предела сдвиговой прочности от давления

Параметры Y_0 и μ могут быть пересчитаны по методикам, изложенным в [5], на основании нормативных значений прочностных характеристик грунтов – сцепления C_n и угла внутреннего трения φ_n , входящих в линейное уравнение закона Кулона-Мора:

$$|\tau_n| = C_n + \operatorname{tg} \varphi_n \cdot \sigma_n, \quad (13)$$

где τ_n – касательное напряжение; σ_n – нормальное напряжение. Механические характеристики C_n и φ_n определяются по результатам лабораторных испытаний грунтов на приборах одно- и многоплоскостного среза или в стабилометрах [2].

Поверхность текучести, построенная по уравнению (12), и поверхность, построенная по линейному уравнению Кулона-Мора (13), различны по форме и представляют собой в первом случае гладкую поверхность плавного сопряжения конуса и цилиндра, а во втором – шестигранную призму. Поэтому пересчет констант может быть выполнен лишь приближенно, так как между этими двумя поверхностями существует бесконечное множество аппроксимаций. Для упрощения принимаем, что предел сдвиговой прочности Y_{pl} в уравнении (12) бесконечно большой, тогда сцепление принимает вид закона Мизеса-Шлехтера, которая представляет гладкую коническую поверхность:

$$Y(p) = Y_0 + \mu p. \quad (14)$$

Предлагается вариант аппроксимации, условно показанный на рис. 2 пунктирной линией. В этом случае формулы для пересчета коэффициентов уравнения (12) по нормативным коэффициентам имеют вид:

$$\mu = \frac{6 \sin \varphi_n}{3 + \sin \varphi_n}, \quad Y_0 = \frac{6 \cdot C_n \cos \varphi_n}{3 + \sin \varphi_n}. \quad (15)$$

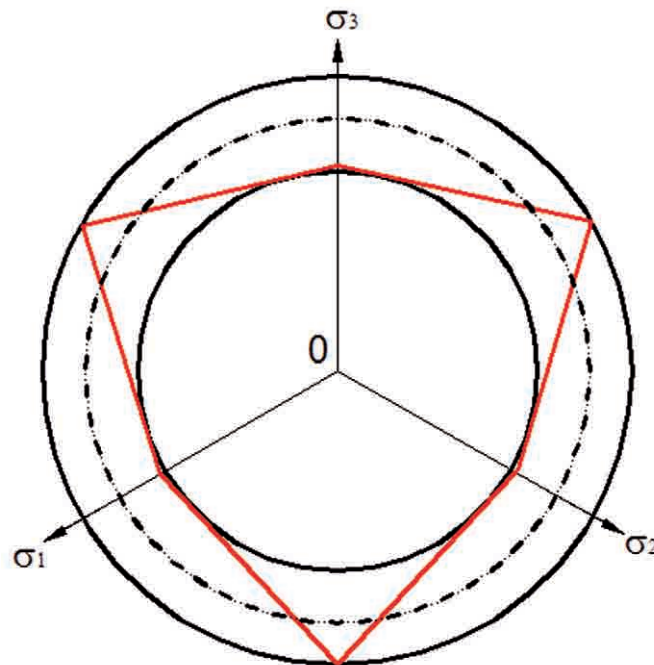


Рис. 2. Сечение предельной поверхности Кулона-Мора и различных аппроксимаций Мизеса-Шлехтера плоскостью

Для ориентировочного получения значений предельной сдвиговой прочности может быть использована эмпирическая зависимость [2]:

$$Y_{pl} = 50 \cdot \exp(-20,7 \cdot W / (1 + W)), \quad (16)$$

где W – весовая влажность в долях единицы.

В расчетах модуль сдвига принимался постоянным и вычислялся по рекомендуемым нормативным значениям [6] модуля деформации E и коэффициенту Пуассона ν . При отсутствии прямых данных для большинства песчаных грунтов и суглинков коэффициент Пуассона может быть вычислен через коэффициент пористости e_0 по эмпирической зависимости [2]:

$$\nu = \frac{0,15}{e_0} + 0,05. \quad (17)$$

Численное моделирование развития аварийной ситуации на пересечении подземных трубопроводов

Построение расчетной модели развития аварийной ситуации

С целью получения полной физической картины развития аварийной ситуации в месте пересечения трубопроводов на основании технического задания на выполнение данной работы и предварительных численных экспериментов разработана расчетная модель, схема которой с учетом симметрии задачи представлена на рис 3.

С целью сокращения размерности расчетной сетки вводилось условие симметрии и рассчитывалась $\frac{1}{4}$ часть от полной модели.

Для грунта, сред внутри труб (газа или нефти) и воздушного пространства сверху расчетной области применялся многокомпонентный метод конечных объемов с описанием сплошной среды в переменных Эйлера. При такой постановке расчетная сетка жестко связана с пространством, не деформируется во времени.

Материалы при движении перетекают из одной ячейки в другую. Расчетная область для грунта имела размеры (с учетом симметрии) в плане 20×20 м, глубину 12 м и высоту 10 м. Для более достоверного описания граничных условий на концах труб, бесконечно удаленных от точки пересечения, грунт локально продлевался еще на 30 м.

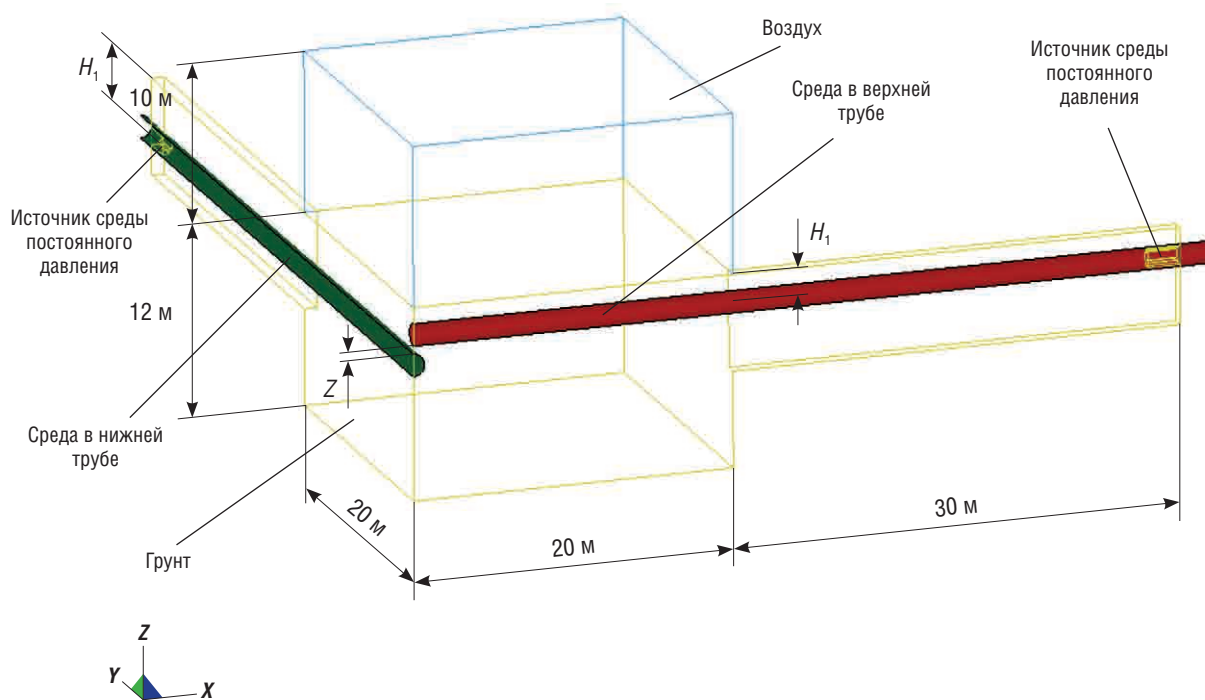


Рис. 3. Схема построения расчетной модели

В начальный момент времени в трубах среде задавалось начальное давление посредством установки степени сжатия. Для природного газа при давлении 7,5 МПа она составляла $\rho/\rho_0 = 75,0$. Для нефти при давлении 6,0 МПа степень сжатия равнялась $\rho/\rho_0 = 1,05$. Над грунтовым массивом находился воздух при давлении 1 атм.

В качестве базового варианта для оценки влияния различных факторов выбрана модель со следующими параметрами: трубы из стали 17ГС диаметром 1420 мм, толщиной 20 мм, пересекаются под прямым углом, верхняя труба находится в грунте на глубине $H_2 = 1$ м, расстояние между трубами – $Z = 0,5$ м, грунт – суглинок, длина трещины – 24 м (в модели с учетом симметрии – 12 м). Длина трещины выбиралась из предпосылок, что разорвутся две сваренных трубы длиной по 12 м.

Оценка влияния характера и размера разрыва на условия нагружения соседней трубы

Для получения полной информации о характере нагружения верхней трубы при разрыве нижнего газопровода проведены расчетные исследования, в которых варьировалось место разрыва, а также динамика роста трещины.

Методом численного моделирования решены три задачи при условии, что разрыв нижней трубы происходит снизу, сверху и сбоку. Для расчета бокового разрыва формировалась новая расчетная модель без учета одной плоскости симметрии. На рис. 4 показаны картины деформирования труб и характер образовавшейся воронки в грунтовом массиве. Отмечается существенное качественное различие в характере нагружения труб при нижнем и верхнем разрывах.

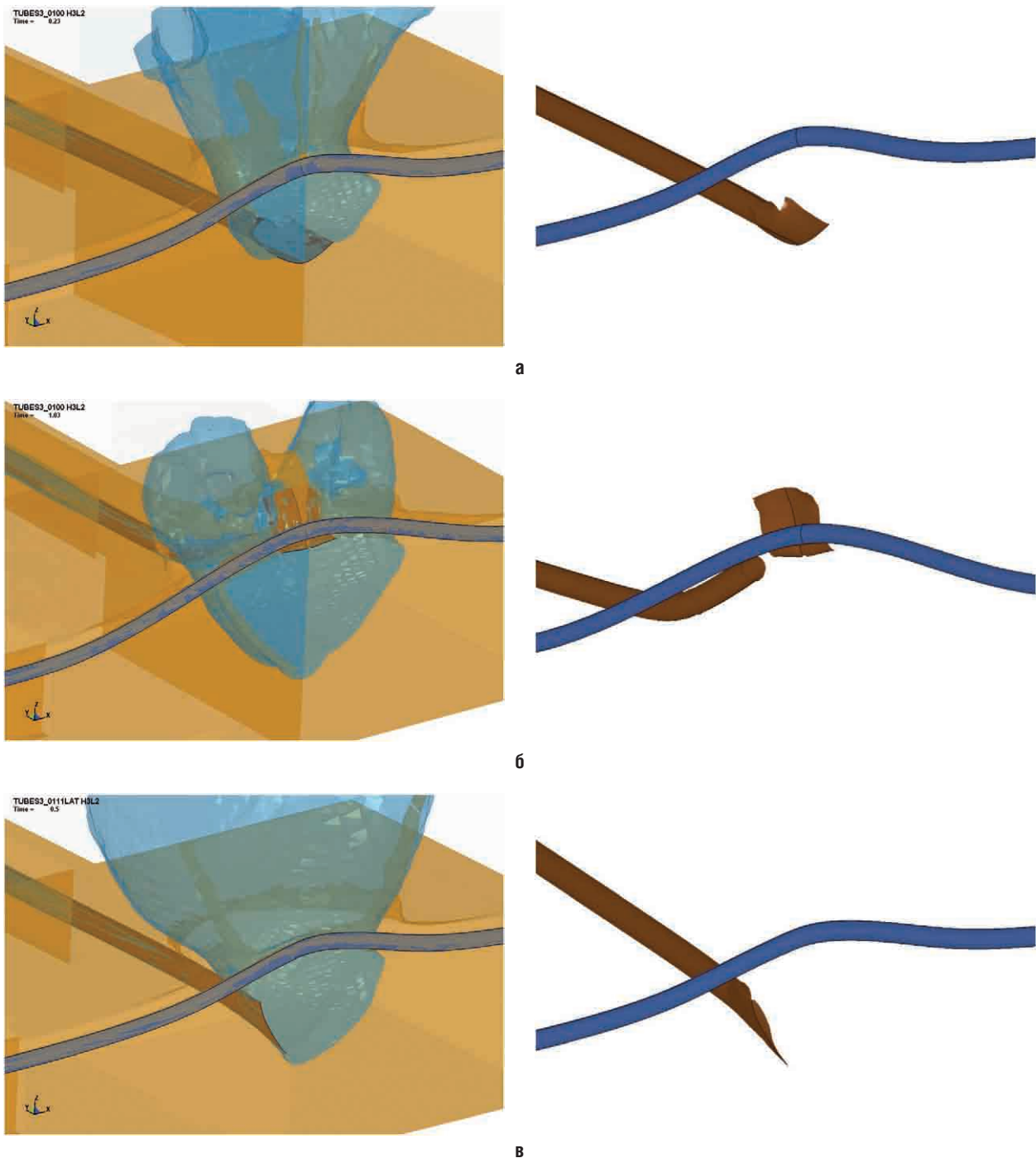


Рис. 4. Характер деформирования труб и грунтового массива при различных местах разрыва нижней трубы: а - разрыв сверху; б - разрыв снизу; в - разрыв сбоку

При первоначальном разрыве сверху, так же, как и сбоку, происходит интенсивный прорыв сквозь грунт сжатого газа к поверхности. При этом поврежденный участок нижней трубы под действием реактивной силы утапливается в грунтовой массив, непосредственно не воздействуя на верхнюю трубу. В данной модельной постановке общее время процесса составляет 0,3–0,5 с от момента появления трещины до окончания интенсивного движения верхней трубы и установления режима стационарного истечения газа из разрыва. Приток природного газа в расчетную модель происходил из области с граничным условием постоянного давления. Нагружение верхней трубы происходит сначала под действием движущегося вверх грунта, затем посредством газодинамического обтекания трубы потоком сжатого газа.

Развитие процесса при разрушении нижней трубы строго снизу носит принципиально иной характер. Поврежденный участок трубы разворачивается под действием внутреннего давления и на начальном этапе запирает газы от возможности течения сквозь грунт к поверхности.

В месте разрыва образуется газовая полость, которая прорывается сквозь грунт с боков, только достигнув больших размеров. Аварийный участок разорванной трубы движется вверх и, достигнув критических деформаций, разрушается и отделяется от основной трубы. Летящий кусок трубопровода воздействует на верхнюю трубу через небольшую прослойку грунта. Прорыв газа из полости на поверхность происходит в месте отрыва участка нижней трубы. Непосредственного воздействия истекающего газового потока на верхнюю трубу в данной постановке не наблюдается. Продолжительность развития аварийной ситуации до установления стационарного режима истечения газа превышает соответствующее время при разрывах сверху и сбоку в 2–4 раза и составляет 1–3 с.

Опасные с точки зрения разрушения зоны имеют протяженность не более одного диаметра трубы. В нижней зоне, как показано на рис. 5, видна характерная при изгибе трубы складка. Разрыв трубы в нижней части вызывают существенно большие перемещения соседней трубы, чем при нижнем и боковом разрывах, при примерно одинаковом уровне пластических деформаций за счет увеличенной зоны деформирования до 20–30 диаметров.

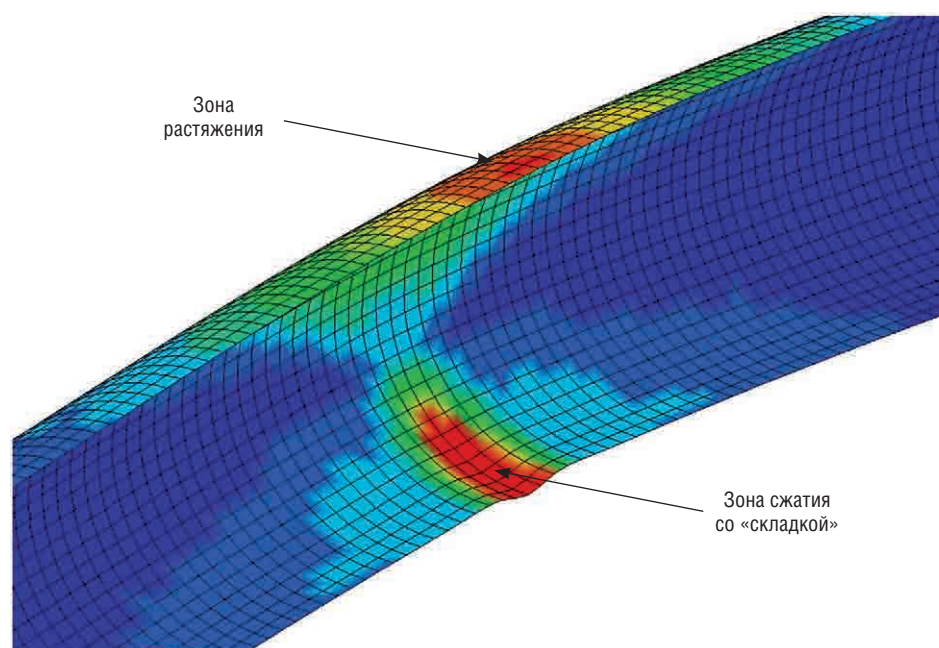


Рис. 5. Распределение пластических деформаций в вершине трубы при разрыве соседней трубы в верхней части

Далее рассмотрено влияние скорости роста магистральной трещины. Исходя из условия создания наихудшей с точки зрения нагрузки ситуации в нижней трубе моделировалось раскрытие трещины с постоянной скоростью 200 м/с с началом в точке проекции пересечения труб. Анализ результатов расчетов показал, что деформации верхней трубы при учете реальной скорости распространения трещины не превышали соответствующее значение при мгновенном разрушении более чем на 15 %.

Выводы

На базе программных комплексов численного моделирования ANSYS/LS-DYNA разработана расчетная методика и выбраны наиболее приемлемые модели для расчета параметров движения, напряженно-деформированного состояния и условий возможного разрушения мест пересечения подземных многониточных трубопроводов при аварийном разрыве одной из ниток.

Для расчетной модели проведены исследования сходимости и подобраны оптимальные параметры пространственно-временной дискретизации.

Подобрана модель механического поведения грунтовых сред, которая в рамках нелинейного упругопластического поведения учитывает основные особенности поведения грунтов – пластические деформации, наличие внутреннего трения и сцепления, нелинейную сжимаемость, возможность разрушения при разрыве и сдвиге.

Для расчета деформирования трубных сталей используется модель пластичности на основе истинной диаграммы «предел текучести – истинные пластические деформации». В качестве критерия разрушения предложен критерий по исчерпанию запаса пластичности с предельным параметром – эквивалентной пластической деформацией, вычисляемой по предельному сужению материала. В расчетах для стали 17ГС максимальная эквивалентная пластическая деформация равнялась 0,5.

По результатам численного моделирования получена предварительная физическая картина развития аварийной ситуации на пересечении трубопроводов при разрыве нитки нижнего эшелона труб. Выявлены ключевые особенности процесса и степени влияния отдельных факторов на процесс деформирования и возможного разрушения трубопроводов.

Отмечено существенное качественное различие в условиях нагружения верхних труб при образовании магистральной трещины, проходящей по верхней, боковой и нижней образующей нижней трубы. При верхнем (боковом) разрыве происходит интенсивный прорыв природного газа к поверхности без непосредственного контактного взаимодействия между трубами. При разрыве по нижней образующей кусок нижней трубы, разворачиваясь, сначала запирает прямой путь газов к поверхности, затем после возможного отрыва ударяет через грунт по верхней трубе, передавая на нее существенно больший импульс.

Список литературы

1. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений / М.Л. Уилкинс / В сб.: Новое в зарубежной механике. – 1967.
2. Замышляев Б.В. Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред / Б.В. Замышляев, Л.С. Евтерев. – М.: Наука, 1990. – 215 с.
3. Вовк А.А. Поведение грунтов под действием импульсных нагрузок / А.А. Вовк и др. – Киев: Наукова думка, 1984. – 288 с.
4. Механическое действие ядерного взрыва. / Ред. кол.: В.Н. Архипов и др. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 384 с.
5. Селезнев В.Е. Методы и технологии численного моделирования газопроводных систем / В.Е. Селезнев, А.В. Алешин, Г.С. Клишин / Под ред. В.Е. Селезнева. – 2-е изд., перераб. – М.: ДомКнига, 2005. – 328 с.