

Н.Л.ГОРОХОВ, аспирант, moyapochta87@mail.ru
А.П.ГОСПОДАРИКОВ, д-р техн. наук, профессор, gospodarikov@mail.ru
Санкт-Петербургский государственный горный университет

N.L.GOROKHOV, post-graduate student, moyapochta87@mail.ru
A.P. GOSPODARIKOV, Dr. in eng. sc., professor, gospodarikov@mail.ru
Saint Petersburg State Mining University

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ГАЗОПРОВОДА, НАХОДЯЩЕГОСЯ В ГРУНТЕ, ПРИ ВЕДЕНИИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ

Предложен метод оценки влияния взрывных работ на газопровод, основывающийся на математическом моделировании совместных колебаний трубопровода и грунта при прохождении сейсмических волн от взрывных работ. Расчет проводился в условиях плоской задачи, грунт моделировался винклеровским упругим основанием, трубопровод – геометрически нелинейной оболочкой. Численная реализация была проведена с помощью итерационного алгоритма.

Ключевые слова: основание упругое, грунт, волна ударная, трубопровод, расчет прочностной, воздействие взрывное, расчет численный.

ABOUT OF AN ESTIMATION OF DURABILITY OF THE GAS PIPELINE WHICH IS IN A GROUND, AT CONDUCTING EXPLOSIVE WORKS

In this paper we propose a method for assessing the impact of blasting operations in the pipeline, which is based on mathematical modeling of the joint fluctuations of pipeline and soil during the passage of seismic waves from blasting. The calculation was performed in a plane problem, the soil was modeled Winkler elastic foundation, piping – a geometrically nonlinear shell. The numerical implementation was carried out using an iterative algorithm.

Key words: The base of the elastic, ground, shock wave, the pipeline, the calculation of strength, the impact of an explosive, numerical calculation.

В принятых в настоящее время нормативных документах отсутствуют прямые указания на величину допустимой скорости смещения грунта в месте залегания действующих газопроводов при воздействии сейсмозрывных волн [4]. В связи с этим возникает необходимость дать приближенную оценку уровня безопасного воздействия взрывных работ, проводимых в зоне расположения действующего газопровода.

Пусть в скальном грунте на небольшой глубине и в засыпке из песка залегает трубопровод, по которому течет газ под давлением. Параллельно залеганию трубопровода

на расстоянии 18 м проводятся взрывные работы для прокладки траншеи нового газопровода (рис.1).

При взрыве зарядов в грунте распространяется сейсмозрывная волна, которая оказывает давление на трубопровод (рис.2).

Условно различают «длинную» и «короткую» ударные волны. В первом случае $L > d$, где $L = D_{\phi} \tau_{\text{сж}}$ – длина волны; D_{ϕ} – скорость фронта; $\tau_{\text{сж}}$ – продолжительность фазы сжатия; d – линейный размер объекта.

Нагрузку для длинных волн будем считать мгновенно прикладываемой по всей поверхности конструкций. Поскольку длина

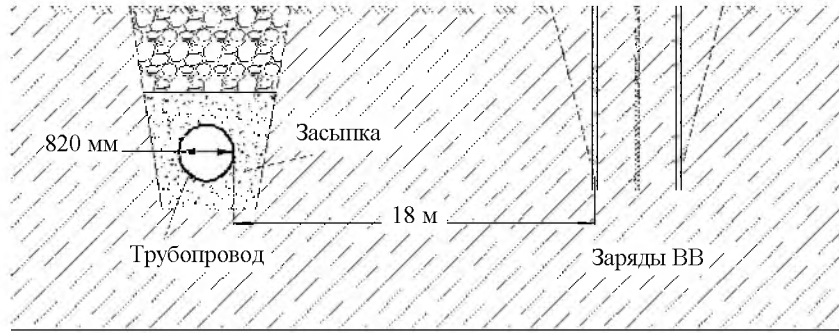


Рис.1. Схема расположения трубопровода и зарядов (вертикальный разрез)



Рис.2. Распространение сейсмозврывной волны

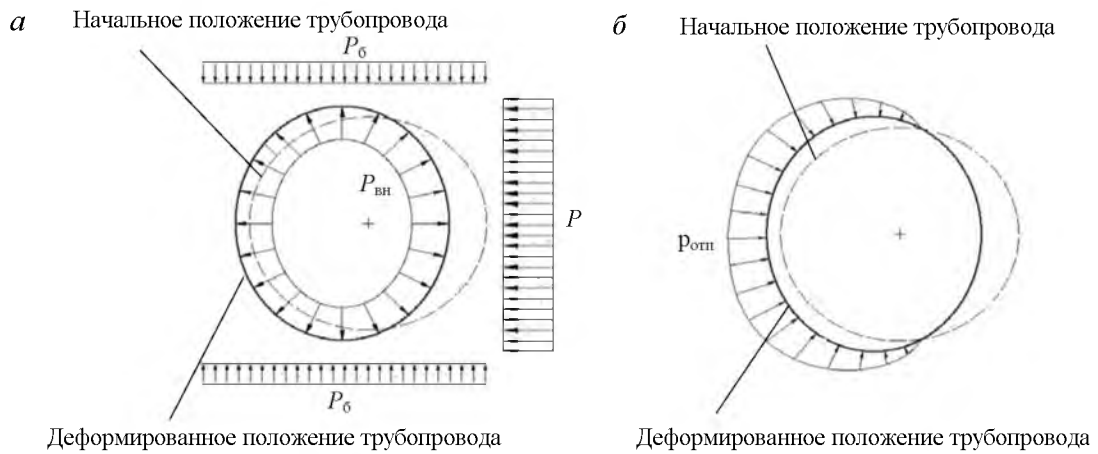


Рис.3. Нагрузки, действующие на трубопровод: *a* – активные; *б* – реактивные
 P – фронтальное давление; $P_б$ – боковое давление; $P_{вн}$ – внутреннее давление; $P_{отп}$ – реактивный отпор грунта

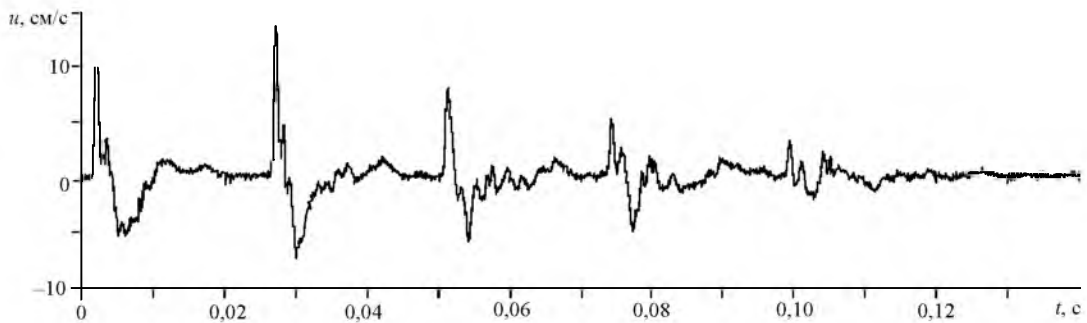


Рис.4. Сейсмограмма опытного взрыва при $Q = 12$ гу

сейсмозрывной волны в грунте значительно превышает диаметр трубопровода, то такая волна для него является длинной. Действие длинной волны включает две основные фазы взаимодействия: дифракцию и установившееся квазистатическое обтекание. Возникающие деформации, определяющие прочность конструкции, в основном, связаны с квазистатическим обтеканием.

В первом приближении деформацию сечения трубопровода можно считать плоским изгибом кольца внутри грунта. Фронт ударной волны, подошедший к трубопроводу, считается плоским, а давление в нем не меняется по длине и высоте.

Рассмотрим силы, действующие на трубу (рис.3).

Боковое давление

$$P_6 = P \frac{\mu}{1 - \mu},$$

где μ – коэффициент Пуассона.

В качестве реактивной нагрузки принимается упругий отпор, возникающий в ходе деформации трубопровода и продавливания им грунта. Активными нагрузками являются воздействие взрыва и внутреннее давление.

Нагрузку от действия взрыва, в каждый фиксированный момент времени примем в упрощенной форме: P и P_6 . Для определения давления P необходимо знать зависимость давления во фронте ударной волны, подошедшей к трубопроводу от времени, $P(t)$. Для этого сначала найдем зависимость массовой скорости смещения грунта в точке, находящейся близко к трубопроводу, от времени $u(t)$, затем переведем ее в эквивалентную ей зависимость для давления $P(t)$ по формуле [6]

$$P = \rho_0 c u,$$

где c – скорость звука в грунте; ρ_0 – плотность грунта в первоначальном состоянии; u – скорость смещения грунта.

Для определения зависимости $u(t)$ группой экспертов Санкт-Петербургского государственного горного университета под руководством В.А.Артемова на полигоне были произведены четыре опытных взрыва со схе-

мой взрывания, соответствующей проходке траншеи под газопровод, но с зарядами различной массы в каждом взрыве. На расстоянии 18 м от ближайшего заряда были пробурены скважины и в них установлены сейсмоматчики, регистрирующие параметры сейсмозрывных волн. Зарегистрированные осциллограммы по каждому опытному взрыву были переведены в графики зависимостей скорости смещения и давления во фронте ударной волны. Пример сейсмограммы взрыва с массой зарядов $Q = 12$ кг представлен на рис.4.

Внешняя нагрузка, приложенная к оболочке трубы в каждый момент времени, исходя из выбранных приближений, определяется по формулам (рис.5):

$$q_1 = k_{отр} P \sin^2 \vartheta, \quad q_2 = k_{отр} P_6 \cos^2 \vartheta, \\ q_3 = -P_{вн}$$

где ϑ – угол наклона касательной к оси Ox в текущей точке упругой линии кольца трубы; $k_{отр}$ – коэффициент отражения,

$$k_{отр} = \frac{2}{1 + (K_{ж.гр} / K_{ж.тр})};$$

$K_{ж.тр}$ и $K_{ж.гр}$ – динамические жесткости грунта и материала трубы соответственно, $K_{ж.гр} = \sqrt{K \rho_{гр}}$, $K_{ж.тр} = \sqrt{E \rho_{тр}}$; K – коэффициент упругости грунта; E – модуль упругости материала трубы; $\rho_{гр}$ и $\rho_{тр}$ – плотность грунта и металла трубы соответственно.

Так как взрывная нагрузка на трубу сильно изменяется во времени, то для расчета напряженно-деформированного состояния необходимо делать динамический прочностный расчет, учитывая в нем инерцию трубопровода.

В настоящей работе была использована следующая схема решения динамической задачи: для любого деформированного положения кольца априори задавался закон изменения возможных перемещений. Поскольку изначальная постановка расчета ведется на квазистатическое действие взрыва, то предполагалось, что труба воспринимает нагрузку всеми частями сразу и деформируется одновременно. Деформированная форма трубы под действием нагрузки $f = q_1 + q_2 + q_3 + p_{отп}$ между моментами времени t_0 и t_1 рассчитывается по статическому закону деформирования под действием таким же образом приложенной модельной нагрузки $f_m = K_I f$, где K_I – коэффициент интенсивности модельной нагрузки.

Модельная нагрузка f_m отличается от действующей f только интенсивностью, причем коэффициент K_I на каждом шаге выбирается, чтобы рассчитываемые перемещения получались малыми, а при деформации удовлетворялся закон сохранения энергии.

После выбора коэффициента K_I производится статический расчет. Чтобы учесть влияние внутреннего давления в газопроводе на его сопротивляемость деформациям, необходимо учитывать изменения сил и моментов в процессе деформации и не прибегать к гипотезе малых перемещений. В результате задача становится нелинейной. Теоретическое описание задачи может быть выполнено на основе метода расчета криволинейных элементов конструкций на упругом основании [3]. В данном случае упругим основанием для трубопровода является песок, поэтому наиболее адекватно отражающей экспериментальные данные моделью упругого основания является винклеровская модель [5].

Разрешающая система уравнений, предложенная в работе [2], была решена не

напрямую, а с помощью итерационного алгоритма. На каждом его шаге линейная задача решалась без учета изменения сил и моментов в процессе деформации, затем рассчитывалось новое положение упругой линии кольца трубы и к нему снова прикладывались те же силы и моменты до тех пор, пока упругая линия не пришла в равновесие.

После решения статической задачи определялось новое положение точек кольца и вычислялись перемещения Δx и Δy по осям x и y соответственно. Далее составлялось уравнение баланса работ и энергий

$$A_p - A_{изг} - A_{ин} = 0, \quad (1)$$

где A_p – работа внешней нагрузки f на перемещениях Δx и Δy ; $A_{изг}$ – изменение потенциальной энергии деформации на промежутке времени $\Delta t = t_1 - t_0$; $A_{ин}$ – работа сил инерции на промежутке времени Δt .

Здесь

$$A_p = 0,5 \left\{ \int_l (f_0 \cos \vartheta_0 + f_1 \cos \vartheta_1) \Delta y(s) dl - \int_l (f_0 \sin \vartheta_0 + f_1 \sin \vartheta_1) \Delta x(s) dl \right\}, \quad (2)$$

где $f_0, \vartheta_0, x_0, y_0$ и $f_1, \vartheta_1, x_1, y_1$ – внешняя нагрузка, угол наклона касательной к упругой линии, координата упругой линии x , координата упругой линии y в моменты времени t_0 и t_1 соответственно; l – длина окружности кольца трубы; s – длина дуги окружности;

$$A_{изг} = \int_l \frac{M_1^2(s)}{2EJ} dl - \int_l \frac{M_0^2(s)}{2EJ} dl, \quad (3)$$

$M_0(s), M_1(s)$ – изгибающие моменты при $t = t_0$ и $t = t_1$ соответственно; J – момент инерции продольного сечения кольца трубы;

$$A_{ин} = m \left(\int_l a_x(s) \Delta x(s) dl + \int_l a_y(s) \Delta y(s) dl \right), \quad (4)$$

m – масса трубопровода длиной l м; $a_x(s), a_y(s)$ – ускорение точек трубы в проекциях на оси x и y соответственно

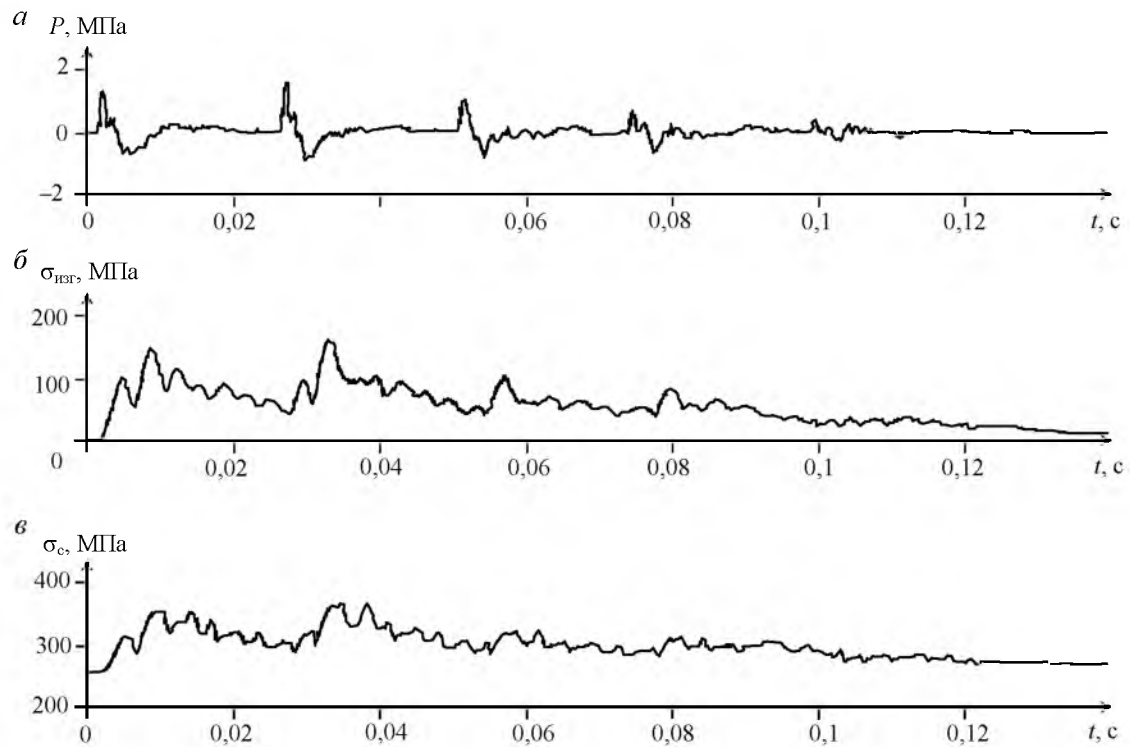


Рис.6. Графики напряжений во времени: изменения давления P в сеймовзрывной волне (а), максимальных напряжений от изгиба $\sigma_{\text{изг}}$ (б) и максимальных суммарных напряжений σ_c (в)

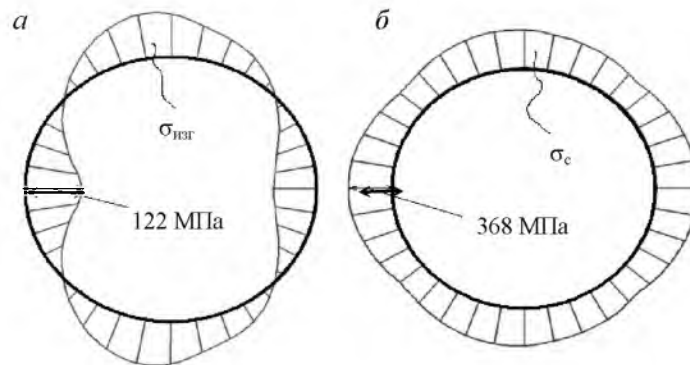


Рис.7. Эпюры напряжений $\sigma_{\text{изг}}$ (а) и σ_c (б) на момент максимальных суммарных напряжений

$$\begin{aligned}
 a_x(s) &= 2 \left(\frac{\Delta x(s)}{\Delta t^2} - \frac{v_{0x}(s)}{\Delta t} \right); \\
 a_y(s) &= 2 \left(\frac{\Delta y(s)}{\Delta t^2} - \frac{v_{0y}(s)}{\Delta t} \right),
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

$v_{0x}(s)$, $v_{0y}(s)$ – скорости элементов трубы в момент времени t_0 в проекциях на оси координат.

Отметим, что интегралы в формулах (2)-(4) берутся численно, путем разбиения l на конечное число интервалов $N = 1000$.

После расчета A_p и $A_{\text{изг}}$ по формулам (2) и (3) и $A_{\text{ин}}$ по выражению (1) определялся промежуток времени Δt , за который деформировалась труба между исходным и новым положениями в соответствии с формулами (4) и (5) и скорость точек в проекциях на оси в новом положении:

$$v_{1x}(s) = \frac{\Delta x(s)}{\Delta t} + \frac{a_x(s)\Delta t}{2};$$

$$v_{1y}(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta t} + \frac{a_y(s)\Delta t}{2}.$$

После всех необходимых вычислений рассчитанное положение упругой линии принималось за нулевое: $t_0 = t_1$; $x_0(s) = x_1(s)$; $y_0(s) = y_1(s)$; $\vartheta_0(s) = \vartheta_1(s)$; $f_0(s) = f_1(s)$; $M_0(s) = M_1(s)$; $v_{0x}(s) = v_{1x}(s)$; $v_{0y}(s) = v_{1y}(s)$. Затем при заданном малом приращении к коэффициенту интенсивности модельной нагрузки $K'_I = K_I + \Delta K_I = K_I + \Delta K_I$ и расчет повторялся заново.

По изложенному алгоритму была написана программа, с помощью которой были просчитаны все сейсмограммы по четырем опытными взрывам и построены эпюры напряженно-деформированного состояния трубопровода в каждый момент времени и графики изменения максимальных напряжений в кольце трубы во времени. При взрыве зарядов массой 12 кг максимальные суммарные напряжения в трубопроводе были достигнуты на 39-й миллисекунде и составили 368 МПа. Такие напряжения не опасны для трубопровода и не могут его разрушить: предел прочности металла трубопровода (сталь 17ГС) составляет 520 МПа. Результаты расчета программы для взрыва с зарядами массой 12 кг представлены на рис.6 и 7.

С помощью предложенного метода оценки влияния взрывных работ на подземные газопроводы удалось произвести

обоснованный выбор параметров буровзрывных работ, обеспечивающих сохранность газопровода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов Н.Н. Расчет железобетонных конструкций на взрывные и ударные нагрузки / Н.Н.Белов, Д.Г.Копаница, О.Г.Кумпяк, Н.Т.Югов. Томск, 2004.
2. Горохов Н.Л. К расчету криволинейных элементов конструкций на винклеровском основании // Освоение минеральных ресурсов Севера. Проблемы и решения: Труды 8-й Межрегион. научн.-практ. конф. Воркута, 2010.
3. Горохов Н.Л. Об одном подходе к расчету криволинейных элементов конструкций на упругом основании // Там же.
4. Единые правила безопасности при взрывных работах. ПБ 13-407-01. М., 2002.
5. Клепиков С.Н. Расчет конструкций на упругом основании. Киев, 1957.
6. Ляхов Г.М. Взрывные волны в грунтах / Г.М.Ляхов, Г.И.Покровский. М., 1962.

REFERENCES

1. Belov N.N., Kopanitsa D.G., Kumpiyak O.G., Yugov N.T. Calculation of reinforced concrete structures to blast and impact loads. Tomsk, 2004.
2. Gorokhov N.L. Calculation of curved structural elements on the Winkler foundation // Development of mineral resources in the North. Challenges and Solutions: Proceedings of the 8th Inter-Regional. Scientific-Practical Conf. Vorkuta, 2010.
3. Gorokhov N.L. An approach to the calculation of curved structural elements on the elastic base // Development of mineral resources in the North. Challenges and Solutions: Proceedings of the 8th Inter-Regional. Scientific-Practical Conf. Vorkuta, 2010.
4. Unified safety rules for blasting. PB 13-407-01. Moscow, 2002.
5. Klepikov S.N. Calculation of structures on elastic foundation. Kiev, 1957.
6. Lyakhov G.M., Pokrovskii G.I. Blast waves in soils. Moscow, 1962.