

В. А. Котляревский, А. А. Александров,  
В. И. Ларионов

## АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ ЗАГЛУБЛЕННЫХ В ГРУНТ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ НАГРУЖЕНИЯ

*Рассмотрены нагрузки, действующие на линейную часть магистральных нефтепроводов, и внутренние силы в материале трубы при сложных условиях нагружения.*

**E-mail:** lar@esrc.ru; ualabu@inbox.ru

**Ключевые слова:** магистральный нефтепровод, грунт, нагрузки, внутренние силы, температурный перепад.

Заглубленные в грунт линейные части (ЛЧ) магистральных нефтепроводов (МН) на участках трасс с вертикальной кривизной рельефа статически нагружены массой засыпки, а также изгибающими моментами от искривлений рельефа. Кроме того, при эксплуатации оболочка МН растягивается под действием гидростатического давления транспортируемого продукта. Температура заглубленных труб отличается от начальной температуры при прокладке в грунт, такой температурный перепад вызывает осевое нагружение труб. На трубы с продуктом также может действовать вертикальное выталкивание от водоизмещения и внешнее гидростатическое давление (для случая обводненной среды). В сейсмически активных регионах на МН действуют волновые сейсмические нагрузки.

В общем случае условия, вызывающие статическое нагружение и напряженно-деформированное состояние (НДС) МН, включают в себя: литостатические давления; выталкивающие силы водоизмещения и внешнее градиентное гидростатическое давление; кривизну МН в условиях местного рельефа; температурный перепад; внутреннее гидростатическое давление транспортируемого продукта.

Рассмотрим методы и некоторые результаты определения НДС и ресурса прочности трубопроводов при возможных сочетаниях компонент тензора напряжений в реальных комплексных условиях статического и сейсмического нагружений.

**Нагрузки на МН и внутренние силы.** Действие погонной силы  $G_1$  от массы грунта над трубой определяется по формуле

$$G_1 = 2\rho ghD,$$

а выталкивающей силы водоизмещения  $G_2$  из выражения

$$G_2 = \pi\rho_v gR^2,$$

где  $D$  — внешний диаметр МН;  $\rho$  и  $\rho_v$  — плотности грунта и воды;  $h$  — толщина грунтовой засыпки;  $g$  — ускорение свободного падения.

При совместном действии массы засыпанного грунта и возможного водоизмещения оболочка сжимается по вертикали под действием силы  $G = G_1 + G_2$  (боковым давлением пренебрегаем):

$$G = Rg(2\rho h + \pi\rho_b R). \quad (1)$$

В случае обводненной среды кроме выталкивающей силы на трубопровод будет действовать гидростатическое давление, зависящее от изменяющейся глубины  $y$  как  $p_y = \rho_b g y$  с градиентом 10 кПа/м (при плотности воды  $\rho_b = 1000 \text{ кг/м}^3$ ). Среднее внешнее гидростатическое давление на реальный заглубленный МН крайне слабо разгружает внутреннее гидростатическое давление транспортируемого продукта, и при расчете ресурса прочности внешнее давление воды  $p_y$  далее во внимание не принимается.

Возможная геологическая кривизна при прокладке МН в условиях местного рельефа вызывает статический изгиб трубопровода в вертикальной плоскости, и значение изгибающего момента  $M_{kr}$  в зависимости от кривизны  $K_R$  и изгибной жесткости  $EJ$  трубы можно определить как

$$M_{kr} = K_R E J, \quad (2)$$

где  $J = \frac{1}{64} \pi (D^4 - d^4)$  — момент инерции поперечного сечения оболочки трубы с внутренним диаметром  $d$ ;  $E$  — модуль упругости материала трубы.

Текущая температура трубопровода  $T_2$  во время эксплуатации обычно отличается от начальной температуры  $T_1$  при строительстве, и под действием температурного перепада  $\Delta T = T_2 - T_1$  в оболочке возникают продольные силы  $N_t$ , зависящие от продольной жесткости  $EF$  сечения трубы и коэффициента температурного расширения материала  $\alpha$  (для стали  $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$ ):

$$N_t = -\alpha \Delta T \cdot EF. \quad (3)$$

Сила  $N_t$  вызывает осевое сжатие МН при  $\Delta T > 0$  и растяжение при  $\Delta T < 0$ .

Гидростатическое давление  $P_g$  транспортируемого продукта вызывает кольцевые растягивающие силы  $N_p$  в стенке трубы

$$N_p = 0,5dP_g, \quad (4)$$

а также осевые силы  $N_\mu = \mu N_p$ , зависящие от коэффициента Пуассона  $\mu$ , и  $N_{gos} = (1 - K_z) F_0 P_g$  с коэффициентом защемления  $K_z$  трубопровода в грунте при давлении  $P_g$  на торцевую площадь трубы  $F_0 = \frac{1}{4} \pi d^2$ :

$$N_{pz} = N_\mu + N_{gos}. \quad (5)$$

Поперечная, сжимающая трубу сила  $G$  (1) вызывает кольцевой изгиб и сжатие стенки оболочки с переменными по окружности

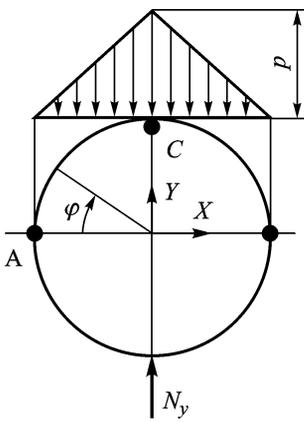


Рис. 1. Аппроксимирующая распределенная нагрузка на трубу в плоскости  $XY$ , нормальной оси  $Z$  трубопровода

внутренними силами (нормальной силой  $N$  и изгибающим моментом  $M$ ), зависящими от угла  $\varphi$  [1] ( $\varphi$  – угловая координата с отсчетом от диаметра, ортогонального направлению действия нагрузки (рис. 1)).

Распределение давлений, действующих на оболочку радиусом  $R = D/2$  при учете неравномерности взаимодействия нагрузки в грунте с трубой в плоскости  $XY$ , нормальной оси трубы, принято в форме треугольника, симметричного относительно оси  $Y$  (вдоль силы  $N_y = G$ ), с максимумом давления  $p = N_y/R$ . Предположим, что внешнее давление  $p$  вызывает только деформацию оболочки, тогда гидростатическое давление в жидком продукте, заполняющем оболочку на все сечение, не снижает изгибающих моментов  $M$ .

При треугольной аппроксимации нагрузки с максимальным давлением  $p$  нормальная сила  $N$  в стенке оболочки определяется как

$$N = \begin{cases} N_0 \cos \varphi - \frac{1}{2} p R \sin \varphi; & N_0 = -0,02653 p R \quad \left(0 \leq \varphi \leq \frac{1}{2} \pi\right); \\ N_0 \cos \varphi - \frac{1}{2} p R \sin \varphi + \frac{1}{2} p R (1 - \sin \varphi)^2 \sin \varphi & \left(\frac{1}{2} \pi \leq \varphi \leq \pi\right); \end{cases} \quad (6)$$

изгибающий момент – по выражениям

$$M = \begin{cases} 0,305 p R^2 - N_0 R (1 - \cos \varphi) - \frac{1}{2} p R^2 \sin \varphi, & \left(0 \leq \varphi \leq \frac{1}{2} \pi\right); \\ 0,305 p R^2 - N_0 R (1 - \cos \varphi) - \\ - \frac{1}{2} p R^2 \sin \varphi - \frac{1}{6} p R^2 (1 - \sin \varphi)^3 & \left(\frac{1}{2} \pi \leq \varphi \leq \pi\right), \end{cases} \quad (7)$$

а поперечная сила определяется по уравнениям

$$Q = \begin{cases} -N_0 \sin \varphi - \frac{1}{2} p R \cos \varphi & \left(0 \leq \varphi \leq \frac{1}{2} \pi\right); \\ -N_0 \sin \varphi - \frac{1}{2} p R \cos \varphi + \\ + \frac{1}{2} p R (1 - \sin \varphi)^2 \cos \varphi & \left(\frac{1}{2} \pi \leq \varphi \leq \pi\right). \end{cases} \quad (8)$$

Экстремальные значения усилий в опасных точках  $A$  ( $\varphi = 0$  и  $+\pi$ ) и  $C$  ( $\varphi = \pm\pi/2$ )<sup>1</sup> можно найти как

$$N_A = -0,02653 p R, \quad N_C = -0,5 p R \quad (9)$$

<sup>1</sup>При аппроксимации распределения нагрузки по закону синуса изгибающий момент в опасных точках  $A$  и  $C$  составляет  $M_A = 0,219 P_m R^2$  и  $M_C = -0,233 P_m R^2$ .

— нормальные силы;

$$M_A = 0,305pR^2, \quad M_C = -0,16847pR^2 \quad (10)$$

— изгибающие моменты.

**Эквивалентные напряжения в МН и НДС.** Далее приведены расчетные соотношения для эквивалентного напряжения в МН и НДС от действия рассмотренной системы статических сил. Для комплексной оценки ресурса прочности МН к системе нагрузок добавлено осевое сейсмическое воздействие [2]. Напряжение, определяющее резерв прочности, находят, выбирая экстремальное значение из числа компонент тензора напряжений и эквивалентного напряжения, рассчитанного по энергетической теории прочности для всех возможных сочетаний главных напряжений в оболочке МН с учетом знакопеременности изгибных напряжений.

*Компоненты тензора напряжений.* В условиях статики оболочка напряжена вдоль оси  $Z$ , а в плоскости  $XY$  она находится в симметричном деформированном состоянии и напряжения рассматриваются в двух опасных сечениях стенки трубы — в точках  $A$  и  $C$  (см. рис. 1, 2).

От обжимающего давления с максимумом  $p = G/R$  при возникающих сжимающих силах  $N_{A/C}$  (9) и моментах  $M_{A/C}$  (10) в опасных точках кольцевого сечения оболочки действуют нормальные напряжения

$$\sigma_{NA/NC} = N_{A/C}/F_\delta$$

и фибровые изгибные напряжения

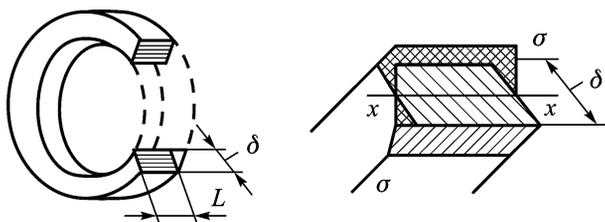
$$\sigma_{MA/MC} = \pm M_{A/C}/W_\delta,$$

где  $F_\delta = \delta$  и  $W_\delta = \frac{1}{6}\delta^2$  — площадь поперечного сечения и момент сопротивления стенки оболочки на единицу ее длины.

При наличии ненулевой начальной кривизны  $K_R$  (2) возникают фибровые нормальные изгибные напряжения в вертикальной плоскости, которые в точках  $C$  нормального сечения определяются по формуле

$$\sigma_{C,kr} = \pm M_{kr}R/J = \pm K_R ER,$$

где  $J$  — момент инерции поперечного сечения оболочки радиуса  $R$



**Рис. 2.** Оболочка единичной длины ( $L = 1$  м) и сечение стенки при кольцевом изгибе и сжатии (показаны напряжения при изгибе)

с модулем упругости  $E$  (в точках  $A$  на нейтральной оси напряжения отсутствуют).

При температурном перепаде  $\Delta$  (3), не равном нулю, осевые равномерные по сечению (и в точках  $A$  и  $C$ ) напряжения определяются как

$$\sigma_{\Delta T} = N_T/F = \alpha \Delta T E.$$

Кольцевые растягивающие равномерные по сечению (и в точках  $A$  и  $C$ ) напряжения от гидростатического давления продукта  $P_g$  (4) можно найти по формуле

$$\sigma_g = N_p/F_\delta = P_g R/\delta,$$

а осевые напряжения от действия сил  $N_{pz}$  (5) определяются как  $\sigma_\mu = N_\mu/F$  и  $\sigma_{gos} = N_{gos}/F$ .

Соотношения для кольцевого изменения формы МН. Абсолютные значения диаметральных деформаций расширения ( $\delta_x$ ) и укорочения ( $\delta_y$ ) оболочки составляют

$$\delta_x = 0,1228 p_m R^4 / (E J_\delta), \quad \delta_y = -0,1220 p_m R^4 / (E J_\delta),$$

где  $J_\delta = \frac{1}{12} \delta^3$  — момент инерции стенки оболочки.

Определение системы эквивалентных напряжений при всех сочетаниях главных напряжений с учетом нормативной сейсмической нагрузки. К системе статических напряжений присоединим сейсмические напряжения [2]:

$$\sigma_{seism} = \pm 0,04 m_0 k_0 k_{\pi} a_c E T_0 / V_1,$$

где  $m_0$  — коэффициент защемления трубопровода в грунте;  $k_0$  — коэффициент ответственности трубопровода;  $k_{\pi}$  — коэффициент повторяемости землетрясений;  $a_c$  — сейсмическое ускорение;  $E$  — модуль упругости материала трубы;  $T_0$  — преобладающий период сейсмических колебаний;  $V_1$  — скорость продольной сейсмической волны.

Суммируя напряжения на ортогональных площадках опасных сечений стенки трубы, запишем формулы для главных напряжений:

$$\sigma_1 = \sigma_{\Delta T} + \sigma_{gos} + \sigma_\mu \pm \sigma_{seism}, \quad \sigma_2 = \sigma_{NA} \pm \sigma_{MA} + \sigma_g$$

— в опасной точке  $A$ ;

$$\sigma_1 = \pm \sigma_{C,kr} + \sigma_{\Delta T} + \sigma_{gos} + \sigma_\mu \pm \sigma_{seism}, \quad \sigma_2 = \sigma_{NC} \pm \sigma_{MC} + \sigma_g$$

— в опасной точке  $C$ .

При рассмотрении системы внутренних сил и напряжений возникает необходимость выполнить анализ плоского напряженного состояния с интенсивностью напряжений, представляющей собой эквивалентное напряжение (по энергетической теории прочности)

$$\sigma_3 = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2}.$$

Сравнивая значения модулей компонент  $\sigma_i$  тензора напряжений и эквивалентных напряжений  $\sigma_3$  для всех возможных сочетаний  $\sigma_i$ , находим экстремум напряжений  $\sigma_m$  и сопоставляем с предельно допустимым напряжением  $[\sigma_d]$ , проверяя тем самым условие обеспеченной прочности

$$\sigma_m \leq [\sigma_d].$$

При удовлетворении неравенства определяется ресурс прочности

$$R_{\text{пр}} = 1 - \sigma_m / [\sigma_d].$$

Варианты (общим числом 18) сочетаний  $\sigma_i$  нахождения  $\sigma_3$  отличаются наличием и знаками кривизн  $K_R$  и наличием сейсмического воздействия  $a_c$  (табл. 1).

Алгоритм определения экстремума напряжений и ресурса прочности запрограммирован для ПК (программа STRING).

В результате вариантных расчетов выдаются значения литостатической нагрузки  $G$  с учетом водоизмещения (для водонасыщенного грунта), давления  $P_m$  обжатия трубы, изгибающего момента  $M_{kr}$  от кривизны рельефа, а также значения следующих компонент тензора напряжений:  $\sigma_{MA}$  или  $\sigma_{MC}$  — фибровых кольцевых изгибных напряжений стенки;  $\sigma_{NA}$  или  $\sigma_{NC}$  — равномерных кольцевых напряжений сжатия стенки;  $\sigma_g$  — кольцевого растяжения от давления продукта;  $\sigma_{\Delta T}$  — осевого сжатия от температурного перепада;  $\sigma_\mu$  — осевого растяжения Пуассона;  $\sigma_{gos}$  — осевого растяжения от торцевого давления продукта;  $\sigma_{C,kr}$  — фибровых продольных изгибных напряжений от кривизны рельефа;  $\sigma_{seism}$  — осевого напряжения от сейсмического воздействия.

При различных наборах входных данных (в условиях статического и сейсмического нагружений, при наличии или отсутствии температурных перепадов, кривизны рельефа и водонасыщенности грунта) выдаются максимальные по модулю значения интенсивности напряжений для всех условий нагружения и сочетаний знакопеременных напряжений, а также глобальный экстремум интенсивности — эквивалентное напряжение  $\sigma_3$ . В результате сравнения с максимальной по модулю компонентой тензора выдаются экстремальные значения напряжений  $\sigma_m$  и ресурса прочности.

**Вариантные прочностные расчеты нефтепроводов.** *Исходные данные.* Проведены вариантные прочностные расчеты МН по программе STRING со следующими исходными данными [2, 3]: диаметр труб  $D = 1220$  мм; толщина стенки  $\delta = 13$  и 20 мм; давление продукта  $P_g = 8,8$  МПа; кривизна рельефа  $K_R = 0,002 \text{ м}^{-1}$ ; температурный перепад  $\Delta T = -20$  и  $+20$  °С; плотность воды  $\rho_v = 1000 \text{ кг/м}^3$ ; сейсмичность  $A_c = 8$  баллов ( $a_c = 200 \text{ см/с}^2$ ).



Металл труб: модуль упругости  $2,06 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона 0,3, плотность  $7850 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент температурного расширения  $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$ ; класс прочности К60, предел текучести 460 МПа, предел прочности 590 МПа.

Плотность нефти  $800 \text{ кг/м}^3$ .

Грунт: толщина засыпки 0,915 м, плотность  $1500 \text{ кг/м}^3$ , модуль упругости  $2 \cdot 10^4$  МПа, угол внутреннего трения  $22^\circ$ , удельное сцепление 0,028 МПа; при сейсмической интенсивности 8 баллов для грунта  $V_1 = 350 \text{ м/с}$ ;  $m_0 = 0,45$ ;  $k_0 = 1,5$ ;  $k_{\text{н}} = 1$ ;  $T_0 = 1,7 \text{ с}$ .

Анализ прочности выполнен при последовательном наращивании нагрузок до полного комплекса изменения реальных условий.

Вначале (*вариант 1*) для труб с толщиной стенки 13 мм был проведен расчет для статических условий и получен весьма низкий ресурс прочности  $R_{\text{пр}} = 1,71 \%$ . В связи с этим далее толщину стенки увеличили до 20 мм и в статике (*вариант 2*) значение ресурса прочности составило  $R_{\text{пр}} = 40,84 \%$ .

При расчете по *варианту 3* (и следующим вариантам) учитывали сейсмическую интенсивность  $A_c = 8$  баллов было получено  $R_{\text{пр}} = 39,6 \%$ .

Расчет прочности по *варианту 4* (и далее) при учете кривизны рельефа  $K_p = 0,002 \text{ м}^{-1}$  дал следующее значение ресурса прочности  $R_{\text{пр}} = 12,4 \%$ .

Для *варианта 5* (и далее) был добавлен отрицательный температурный перепад  $-20^\circ\text{C}$ , тогда  $R_{\text{пр}} = 3,78 \%$ ; в *варианте 6* (и далее) учтено действие водоизмещения и  $R_{\text{пр}} = 3,38 \%$ ; при расчета по *варианту 7* знак температурного перепада был изменен на положительный, полученное значение ресурса прочности составило  $R_{\text{пр}} = 3,02 \%$ .

*Результаты расчета.* Итак, по результатам расчета по 7-му варианту можно заключить, что трубопровод диаметром  $D = 1220$  мм и толщиной стенки  $\delta = 20$  мм под внутренним давлением продукта 8,8 МПа на местности с геологической кривизной  $0,002 \text{ м}^{-1}$  с сухим или влагонасыщенным грунтом при температурных перепадах от  $-20$  до  $+20^\circ\text{C}$  выдерживает землетрясение интенсивностью 8 баллов с резервом прочности 3 %.

В табл. 2 приведены результаты расчета по всем вариантам (для напряжений приведены значения их модулей, кроме напряжений  $\sigma_{\Delta T}$ ). В табл. 3 даны результаты определения интенсивности напряжений всех сочетаний главных напряжений для наиболее показательных четырех последних вариантов. По ним устанавливается значение экстремума  $\sigma_3 = \sigma_m$ , т.е. расчетного эквивалентного напряжения, поскольку величина  $\sigma_3$  во всех вариантах превосходит значения всех компонент тензоров напряжений. Окно программы расчета приведено на рис. 3.

**Результаты прочностных расчетов МН при изменении условий эксплуатации с наращиванием нагружения**

Параметры	№ варианта						
	1	2	3	4	5	6	7
	Сочетание 17–18		Сочетание 9–12		Сочетание 1–8		
$\delta$ , мм	13	20	20	20	20	20	20
$P_g$ , МПа	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8
$K_R$ , м <sup>-1</sup>	–	–	–	0,002	0,002	0,002	0,002
$\Delta T$ , град.	–	–	–	–	–20	–20	+20
$A_c$ , балл	–	–	8	8	8	8	8
$\rho_B$ , кг/м <sup>3</sup>	–	–	–	–	–	1000	1000
$G$ , кН	16,40	16,40	16,40	16,40	16,40	27,89	27,89
$P_m$ , МПа	26,93	26,93	26,93	26,93	26,93	45,73	45,73
$M_{kr}$ , МН·м	–	–	–	5,59	5,59	5,59	5,59
$\sigma_{MA/MC}$ , МПа	108,50	45,84	45,84	25,32	25,32	43,00	43,00
$\sigma_{NA/NC}$ , МПа	0,034	0,022	0,022	0,41	0,41	0,697	0,697
$\sigma_g$ , МПа	412,92	268,4	268,4	268,4	268,4	268,4	268,4
$\sigma_{\Delta T}$ , МПа	–	–	–	–	49,44	49,44	49,44
$\sigma_\mu$ , МПа	123,88	80,52	80,52	80,52	80,52	80,52	80,52
$\sigma_{gos}$ , МПа	113,55	73,81	73,81	73,81	73,81	73,81	73,81
$\sigma_{C,kr}$ , МПа	–	–	–	251,32	251,32	251,32	251,32
$\sigma_{seism}$ , МПа	–	–	54,03	54,03	54,03	54,03	54,03
$P_s$ , МПа	452,14	272,14	278,00	403,1	442,61	444,47	446,10
$R_{np}$ , %	1,71	40,84	39,60	12,40	3,78	3,38	3,02

Таблица 3

**Интенсивности напряжений (локальные эквивалентные напряжения), МПа, при всех сочетаниях главных напряжений**

№ варианта	Сочетание							
	1	2	3	4	5	6	7	8
4	396,3	266,8	<b>403,1</b>	317,0	311,8	344,0	326,4	391,3
5	441,1	239,5	<b>442,6</b>	290,1	349,9	306,4	359,5	355,2
6	441,9	221,5	<b>444,5</b>	307,5	348,2	289,2	364,4	372,0
7	355,8	282,5	370,6	365,8	271,9	368,4	306,5	<b>446,1</b>

Примечание. Выделены экстремальные значения — расчетные эквивалентные напряжения

ПРОГРАММА <STRING> СТАТИКА ТРУБОПРОВОДОВ С СЕЙСМО ПО СНИП 2.05.06-85* АВТОР В.А. КОТЛЯРЕВСКИЙ																																																										
ПРОТОКОЛ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ И РЕСУРСА МТ																																																										
СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ																																																										
ТОЛЩИНА ЗАСЫПКИ 0.915 м																																																										
НАГРЗКА ЛИТОСТАТИЧЕСКАЯ И ВОДОИЗМЕЩЕНИЯ 27.894 кН																																																										
ДАВЛЕНИЕ ОБЖАТИЯ ТРУБЫ 43.728 кПа																																																										
ИЗГИБАЮЩИЙ МОМЕНТ ОТ КРИВИЗНЫ РЕЛЬЕФА 5.593 МН.м																																																										
НАПРЯЖЕНИЯ																																																										
ФИБРОВОЕ КОЛЬЦЕВОЕ ИЗГИБНОЕ (МОДУЛЬ) 42.999 МПа																																																										
РАВНОМЕРНОЕ КОЛЬЦЕВОЕ СЖАТИЕ 0.937 МПа																																																										
КОЛЬЦЕВОЕ РАСТЯЖЕНИЕ ОТ ДАВЛЕНИЯ ПРОДУКТА 268.4 МПа																																																										
ОСЕВОЕ СЖАТИЕ ОТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПЕРЕПАДА 49.44 МПа																																																										
ОСЕВОЕ РАСТЯЖЕНИЕ (ПЬАССОН) ОТ ВЛИЯНИЯ ГИДРОДАВЛЕНИЯ 80.52 МПа																																																										
ОСЕВОЕ РАСТЯЖЕНИЕ ОТ ВЛИЯНИЯ ГИДРОДАВЛЕНИЯ НА ТОРЕЦ 73.81 МПа																																																										
ИЗГИБНОЕ ОТ КРИВИЗНЫ РЕЛЬЕФА (МОДУЛЬ) 291.32 МПа																																																										
ОСЕВОЕ НАПРЯЖЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЕ ПО НОРМАМ (МОДУЛЬ) 54.0 МПа																																																										
НАПРЯЖЕНИЕ ПРИ СОЧЕТАНИИ 1 441.921316770382 МПа																																																										
НАПРЯЖЕНИЕ ПРИ СОЧЕТАНИИ 2 221.534537963306 МПа																																																										
НАПРЯЖЕНИЕ ПРИ СОЧЕТАНИИ 3 444.471425612123 МПа																																																										
НАПРЯЖЕНИЕ ПРИ СОЧЕТАНИИ 4 307.512231786562 МПа																																																										
НАПРЯЖЕНИЕ ПРИ СОЧЕТАНИИ 5 348.167668302025 МПа																																																										
НАПРЯЖЕНИЕ ПРИ СОЧЕТАНИИ 6 289.195074330387 МПа																																																										
НАПРЯЖЕНИЕ ПРИ СОЧЕТАНИИ 7 364.381897143900 МПа																																																										
НАПРЯЖЕНИЕ ПРИ СОЧЕТАНИИ 8 372.042163761075 МПа																																																										
ЭКВИВАЛЕНТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ 444.471 МПа																																																										
РЕСУРС ПРОЧНОСТИ ПО ЭКВИВАЛЕНТНОМУ НАПРЯЖЕНИЮ 3.376 %																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">ДАНИЕ НЕФТЕПРОВОДА</th> <th colspan="2">СЕЙСМИКА И ГЕОЛОГИЯ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Диаметр трубы, мм</td> <td>1220</td> <td>Бальность</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>Толщина стенки трубы, мм</td> <td>20</td> <td>Долженаяный период, с</td> <td>1.7</td> </tr> <tr> <td>Плотность стали, кг/л3</td> <td>7850</td> <td>Скорость волны, м/с</td> <td>350</td> </tr> <tr> <td>Модуль упругости стали, МПа</td> <td>2.06e5</td> <td>Геологическая кривизна, 1/м</td> <td>0.002</td> </tr> <tr> <td>Коэффициент Пуассона</td> <td>0.3</td> <td>Температурный перепад, град.</td> <td>-20</td> </tr> <tr> <td>Коэффициент температурного расширения, 1/град.</td> <td>1.2E-5</td> <td>Коэффициент защеления</td> <td>0.45</td> </tr> <tr> <td>Предел текучести, МПа</td> <td>460</td> <td>Плотность воды, кг/л3 (и признак обводненности)</td> <td>1000</td> </tr> <tr> <td>Предел прочности, МПа</td> <td>590</td> <td>ГРУНТ</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">ПРОДУКТ</td> <td>Плотность грунта, кг/л3</td> <td>1500</td> </tr> <tr> <td>Плотность нефти, кг/л3</td> <td>800</td> <td>Модуль упругости, МПа</td> <td>2e4</td> </tr> <tr> <td>Гидростатическое давление нефти, МПа</td> <td>8.8</td> <td>Угол внутреннего трения, град</td> <td>22</td> </tr> <tr> <td colspan="2">ПУСК</td> <td>Числен сцепления грунта, МПа</td> <td>0.028</td> </tr> <tr> <td colspan="2">ВЫХОД</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			ДАНИЕ НЕФТЕПРОВОДА		СЕЙСМИКА И ГЕОЛОГИЯ		Диаметр трубы, мм	1220	Бальность	8	Толщина стенки трубы, мм	20	Долженаяный период, с	1.7	Плотность стали, кг/л3	7850	Скорость волны, м/с	350	Модуль упругости стали, МПа	2.06e5	Геологическая кривизна, 1/м	0.002	Коэффициент Пуассона	0.3	Температурный перепад, град.	-20	Коэффициент температурного расширения, 1/град.	1.2E-5	Коэффициент защеления	0.45	Предел текучести, МПа	460	Плотность воды, кг/л3 (и признак обводненности)	1000	Предел прочности, МПа	590	ГРУНТ		ПРОДУКТ		Плотность грунта, кг/л3	1500	Плотность нефти, кг/л3	800	Модуль упругости, МПа	2e4	Гидростатическое давление нефти, МПа	8.8	Угол внутреннего трения, град	22	ПУСК		Числен сцепления грунта, МПа	0.028	ВЫХОД			
ДАНИЕ НЕФТЕПРОВОДА		СЕЙСМИКА И ГЕОЛОГИЯ																																																								
Диаметр трубы, мм	1220	Бальность	8																																																							
Толщина стенки трубы, мм	20	Долженаяный период, с	1.7																																																							
Плотность стали, кг/л3	7850	Скорость волны, м/с	350																																																							
Модуль упругости стали, МПа	2.06e5	Геологическая кривизна, 1/м	0.002																																																							
Коэффициент Пуассона	0.3	Температурный перепад, град.	-20																																																							
Коэффициент температурного расширения, 1/град.	1.2E-5	Коэффициент защеления	0.45																																																							
Предел текучести, МПа	460	Плотность воды, кг/л3 (и признак обводненности)	1000																																																							
Предел прочности, МПа	590	ГРУНТ																																																								
ПРОДУКТ		Плотность грунта, кг/л3	1500																																																							
Плотность нефти, кг/л3	800	Модуль упругости, МПа	2e4																																																							
Гидростатическое давление нефти, МПа	8.8	Угол внутреннего трения, град	22																																																							
ПУСК		Числен сцепления грунта, МПа	0.028																																																							
ВЫХОД																																																										

Рис. 3. Окно программы STRING с расчетным вариантом № 6

На основе расчета можно сделать следующие **выводы**:

1. Анализ прочности трубопровода в сложных условиях нагружения необходимо проводить при последовательном наращивании нагрузок до полного комплекса.
2. Для рассматриваемых условий общее число вариантов напряжений составляет 18 сочетаний.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биргер И. А. Растяжение и изгиб стержней // Прочность, устойчивость, колебания. Т. 1. – М.: Машиностроение, 1968. – С. 183–238.
2. Магистральные трубопроводы. СНИП 2.05.06-85\*, с изм. 1996 г.
3. Оценка сейсмостойкости магистральных трубопроводов / А.А. Александров, В.А. Котляревский, В.И. Кушнарев и др. // Энциклопедия безопасности. Строительство, промышленность, экология. Т. 3. – М.: Изд-во АСВ, 2010. – С. 132–164.

Статья поступила в редакцию 3.10.2011

Владимир Абрамович Котляревский родился в 1922 г., окончил в 1947 г. Московское Краснознаменное высшее военное инженерное училище. Д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-образовательного центра исследований экстремальных ситуаций МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 400 научных работ в областях изучения взрывных процессов.

V.A. Kotlyarevskii (b. 1922) graduated from The Order of the Red Banner Moscow Higher Military Engineering School in 1947. D. Sc. (Eng.), professor. Chief researcher of the Scientific and Educational Center of Extremal Situation Study of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 400 publications in the field of study of explosion processes.

