

когда $k = 3$, аналитическое решение с хорошей точностью описывает экспериментальные результаты по взрывному обжатию трубок на начальном участке схлопывания, который имеет протяженность 0,2—0,3 от внутреннего радиуса трубы. В зависимости от материала, толщины стенки трубы и типа ВВ, выбором модели, по которой определяется начальное состояние газа, и значения показателя k можно добиться высокой точности описания экспериментальных результатов.

В заключение автор выражает благодарность Ю. А. Тришину за внимание к работе и полезные обсуждения.

Поступила в редакцию
23/IX 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. С. С. Бацанов, А. А. Дерибас, С. А. Кутюлин. НТПГВ, 1965, 1, 2.
2. Ю. В. Гаек, Н. Е. Никитченко и др. ФГВ, 1967, 3, 3.
3. А. Н. Михайлов, Ю. А. Гордополов, А. Н. Дремин. ФГВ, 1974, 10, 2.
4. Г. Е. Кузьмин. Канд. дис. Новосибирск, ИГ СО АН СССР, 1978.
5. С. А. Кинеловский, Н. И. Матюшкин, Ю. А. Тришин.— В сб.: Динамика сплошной среды. Вып. V. Новосибирск, ИГ СО АН СССР, 1970.
6. С. А. Кинеловский, Н. И. Матюшкин, Ю. А. Тришин.— В сб.: Динамика сплошной среды. Вып. VII. Новосибирск, ИГ СО АН СССР, 1971.
7. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Механика сплошных сред. М., Гостехиздат, 1954.

ДЕФОРМАЦИИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ГРУНТЕ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ, НАГРУЖЕННОЙ ИМПУЛЬСОМ ДАВЛЕНИЯ

В. А. Котляревский, Р. А. Румянцева
(Москва)

В одномерной постановке рассматривается поведение упругопластической системы, расположенной в грунте, нагруженном на свободной поверхности кратковременным импульсом давления. Для описания реологических свойств грунта используется модель нелинейной упруговязкой среды [1—3]. Численным анализом установлено влияние независимых инвариантов задачи на динамические деформации системы.

1. Динамика двухмассовой упругопластической системы, впаиванной в грунтовый столб, описывается уравнениями механики сплошной среды

$$\rho_0 v' = -p', \quad \varepsilon' = -v' = -u'', \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{p}{C} + \int_0^t \Gamma(t-t_1) p(t_1) dt_1, \quad \Gamma = \begin{cases} \Gamma_{(1)} (\varepsilon - p/C \geq 0), \\ \Gamma_{(2)} (\varepsilon - p/C < 0) \end{cases} \quad (2)$$

и уравнениями движения масс m_j ($j = 1, 2$) системы

$$m_j v_j' = -(-1)^j (p_j - R). \quad (3)$$

Здесь ρ_0 — начальная плотность грунта; p — давление; ε — деформация сжатия; u — смещение; v — массовая скорость частиц грунта; C , Γ — мгновенный модуль упругости и ядро ползучести в уравнении состояния (3) наследственного типа, причем $\Gamma_{(1)}$ и $\Gamma_{(2)}$ — соответственно ядра ползучести для уплотняющегося и разуплотняющегося грунта; v_j — скорости масс m_j ; p_j — волновые давления, действующие на систему. Точкой в (1), (2) обозначены частные, а в (3) обыкновенные производные по времени t . Штрихом обозначены частные производные по лагранжевой координате x с началом $x = 0$, совмещенным с границей заданного давления.

Граничное давление примем в виде

$$p_{x=0} = p_\Phi f(t, \theta),$$

где p_Φ — амплитуда давления; θ — длительность положительной фазы $p > 0$ (для нагрузок взрывного типа обычно $p_\Phi = p_{t=+0}$). Нижняя граница грунтового столба высотой x_* считается неподвижной: $v(x_*, t) = 0$. Уравнения (3) дают граничные условия на плоскостях $x = x_1$ и $x = x_2$ контакта системы со средой: $v(x_1 - 0, t) = v_1(t)$, $v(x_2 + 0, t) = v_2(t)$. Начальные условия для уравнений нулевые.

Зависимость $R(t)$ сопротивления R деформации сжатия T двухмассовой системы принята по упругопластической диаграмме Прандтля билинейного вида

$$R = \left. \begin{array}{l} f_1(t) \quad (p > 0, R \geq R_*, R_* = R(t_*), R'(t_*) = 0, R''(t) < 0) \\ f_2(t, t_*) \quad (R < R_* = f_1(t_*), T_* = T(t_*)) \end{array} \right\} \quad (4)$$

$$T' = y_1 - y_2, \quad y_j = v_j, \quad (5)$$

$$f_1 = \left. \begin{array}{l} NT, \\ R_T + G(T - R_T/N), \quad f_2 = R_* - N(T_* - T) \end{array} \right\} \quad (6)$$

причем функция f_1 характеризует сжатие при одноэтапном нагружении, а f_2 — упругие разгрузки и повторные упругие нагружения до уровня f_1 ; N — жесткость; G — модуль упрочнения; R_T — предельное сопротивление текучести; t_* — момент начала последней разгрузки с уровня f_1 ($R_*(0) = T_*(0) = 0$).

Учитывая, что размер системы $x_2 - x_1$ в задачу не входит и геометрия задачи определяется двумя значениями x_1 и x_* , введем параметры, пометая безразмерные величины знаком сверху,

$$\begin{aligned} x_0 &= \tau(\rho_0 \Phi_m)^{-1/2}, \quad u_* = \hat{\omega} \hat{m}_1 T_q, \quad T_q = p_\Phi / N, \\ \hat{m}_j &= m_j (\rho_0 x_0)^{-1}, \quad \hat{\omega} = \tau(N/m_1)^{1/2}, \quad \hat{G} = G/N, \\ \hat{K} &= R_T / p_\Phi, \quad \hat{x}_1 = x_1 / x_0, \quad \hat{x}_* = x_* / x_0, \quad \hat{\theta} = \theta / \tau, \quad \hat{C} = \Phi_m C, \end{aligned}$$

где τ — время, соответствующее главному максимуму спектра запаздывания $L_{(1)}$ модели (2); Φ_m — равновесная податливость для $L_{(1)}$, [1]. Безразмерные зависимые переменные ($\hat{\eta}_i$) примем в форме

$$\begin{aligned} \hat{u} &= u / u_*, \quad \hat{y}_j = y_j / u_*, \quad \hat{T} = T / T_q, \\ \hat{u}' &= \hat{v} = v \tau / u_*, \quad \hat{y}'_j = \hat{v}_j = v_j \tau / u_*, \quad \hat{p} = p / p_\Phi, \quad \hat{p}_j = p_j / p_\Phi, \\ \hat{\varepsilon} &= \varepsilon (\Phi_m p_\Phi)^{-1}, \quad \hat{R} = 2R / p_\Phi \end{aligned}$$

где \hat{T} — функция динамичности деформации упругопластической системы, представляющая отношение ее динамической деформации к статической деформации упругой системы с жесткостью N от давления p_Φ .

Решение обезразмеренной системы (1)–(6) при независимых переменных $r = x/x_0$, $s = t/\tau$ для конкретного грунта (Γ) и нагрузки (f) имеет вид

$$\hat{\eta}_i = \hat{\eta}_i(\hat{m}_j, \hat{\omega}, \hat{G}, \hat{K}, \hat{x}_1, \hat{x}_*, \hat{\theta}, \hat{C}, r, s).$$

2. Аппроксимация уравнений и численное решение задачи проведено методом полудискретного аналога [1] с шагом пространственной сетки 0,15 м. Уравнения движения масс m_j включены в систему аппроксимирующих обыкновенных дифференциальных уравнений, интегрируемых методом Рунге — Кутты. В расчетах использовались спектральные характеристики суглинистого грунта, приведенные в [1]; $\Phi_m = 1,822 \cdot 10^{-7}$ Па⁻¹,

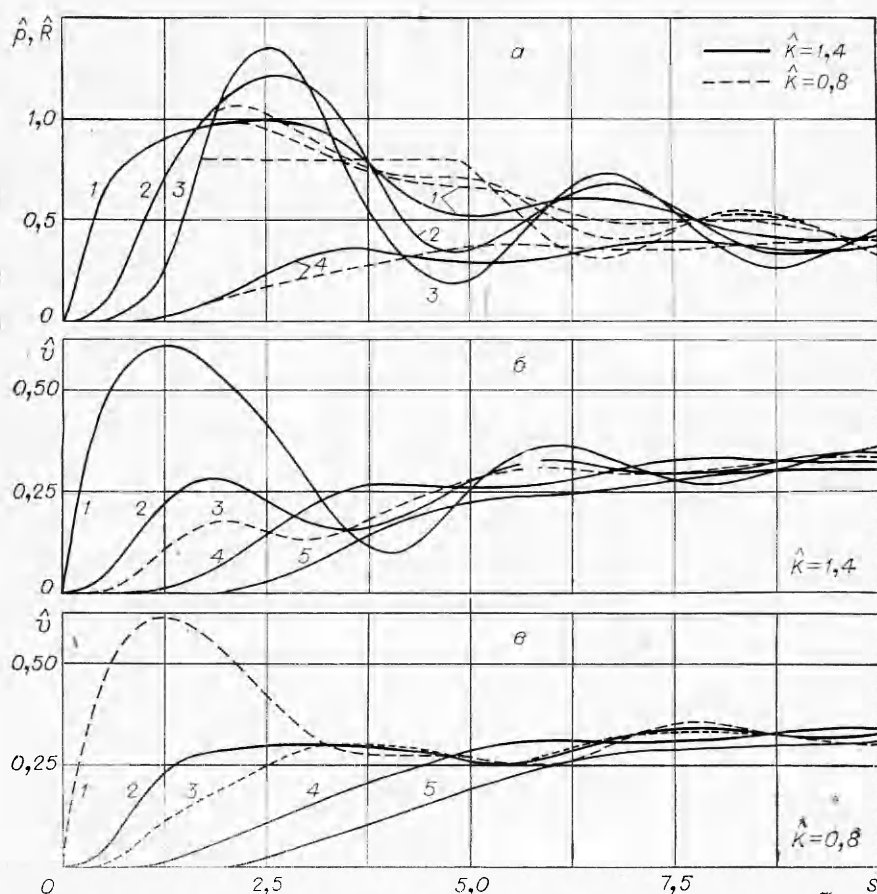


Рис. 1. Изменение давления \hat{p} в упругой и упругопластической системах, сопротивления \hat{R} их деформированию, скорости частиц грунта и масс \hat{m}_j систем. а) 1 — \hat{p} на глубине $r=0,673$, 2, 4 — давления на верхнюю (\hat{p}_1) и нижнюю (\hat{p}_2) грани систем, 3 — \hat{R} ; б, в) 1, 2, 5 — \hat{v} на глубинах $r=0,336, 1,68, 3,70$; 3, 4 — скорости масс \hat{v}_j .

$\tau = 4$ мс, $\rho_0 = 1,77 \cdot 10^3$ кг/м³. При аппроксимации сплошного спектра $L_{(1)}$ дискретным [1] фойгтговым звеном с минимальным временем запаздывания ($\tau_1 = 0,104$ мс) имело жесткость $C_1 = 1,47 \cdot 10^8$ Па; учитывая, что $\tau_1 \ll \tau$, можно принять C_1 за мгновенный модуль (C), т. е. $\hat{C} \approx 27$. Впрочем, параметр \hat{C} несуществен и лишь отражает вклад наиболее жесткого звена дискретного спектра, т. е. зависит от временных интервалов, принятых при аппроксимации спектра $L_{(1)}$.

Функция f , характеризующая граничное давление, принята в виде ($\beta = 2,2$)

$$f(s, \hat{\theta}) = (1 - s/\hat{\theta}) \exp(-\beta s/\hat{\theta}).$$

Кроме того принято $\hat{G} = 0$ (диаграмма Прандтля без упрочнения) и $\hat{x}_1/\hat{x}_* = 0,13 (\ll 1)$, что сводило к минимуму влияние волны сжатия, отраженной от твердой границы \hat{x}_* (условия, близкие к полупространству).

В целях сравнительной оценки на рис. 1, 2 показаны функции $\hat{\eta}_i(s)$ для двух впаянных в грунт систем — упругой ($K \geq 1,4$) и упругопластической ($K = 0,8$) при $\hat{m}_1 = 2,242$, $\hat{m}_1/\hat{m}_2 = 0,3$, $\hat{\omega} = 2$, $\hat{x}_1 = 2,018$, $\hat{\theta} = 37,5$ (без учета размера системы везде условно принято $\hat{x}_1 = \hat{x}_2$).

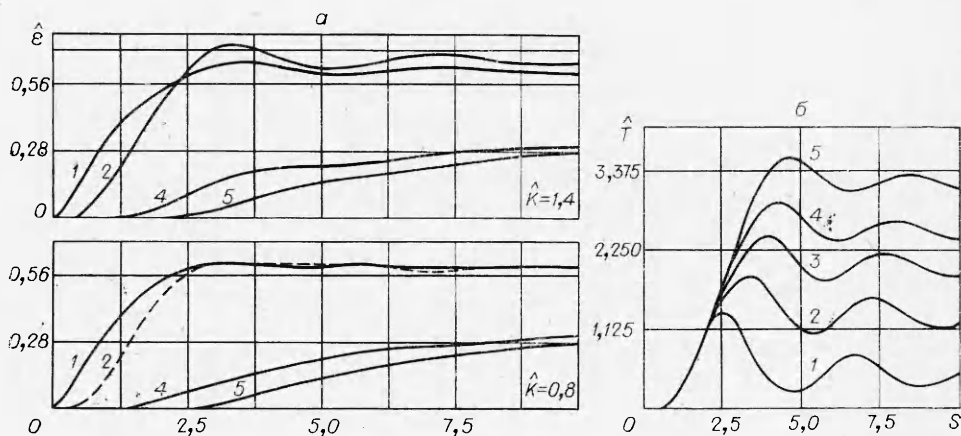


Рис. 2. Деформация грунта с впаивными системами и функции динамичности деформации упругопластических систем с различными предельными сопротивлениями текучести.

а) 1, 5 — деформация на глубинах $r=0,673; 4,04$; 2, 4 — деформации частиц грунта, контактирующих с верхней и нижней гранями системы; б) 1 — $\bar{K} > 1,35$, 2—5 — $\bar{K}=1; 0,9; 0,85; 0,8$; при $\bar{K}=1,35$ система работает упруго.

Изменение со временем давлений в грунте с впаивными системами и сопротивления деформированию систем показано на рис. 1, а. Система с $\bar{K} = 1,4$ не получила пластических деформаций, так как максимум реакции в ней не достигает предельного сопротивления ($\bar{K} > \bar{R}_{\max} = 1,36$). При $\bar{K} = 0,8$ система работает в стадии пластического деформирования в интервале $1,7 < s < 4,7$, а затем происходят ее упругие колебания. Максимум волнового давления \hat{p}_1 на упругую систему превысил на 16% давление на пластическую систему, причем последнее на 31% выше величины \bar{K} , что объясняется инерцией смещения массы \hat{m}_1 . Еще более существенно влияние инерции смещения массы \hat{m}_2 , вследствие чего и благодаря быстрому убыванию граничной нагрузки давление \hat{p}_2 под двумя системами не превышает 0,4.

Изменение во времени скоростей частиц грунта и масс рассматриваемых систем дано на рис. 1, б, а деформаций грунта — на рис. 2, а. Функция динамичности деформации впаивной системы $\hat{T}(s)$ существенно зависит от параметра \bar{K} (см. рис. 2, б). С убыванием \bar{K} растет остаточная деформация и амплитуда $K_{\text{п}} = \hat{T}_{\max}$, представляющая коэффициент динамичности деформации. При $K_{\text{п}} < \bar{K}$ система работает в пределах упругих деформаций и $K_{\text{п}}$ есть также отношение максимума внутренних усилий в системе к величине $p_{\text{ф}}$.

Иными словами, если при $K_{\text{п}} < \bar{K}$ коэффициент $K_{\text{п}}$ определяет эквивалентную статическую нагрузку $P_{\text{эkv}} = K_{\text{п}} p_{\text{ф}}$ по внутренним усилиям и деформациям, то при $K_{\text{п}} > \bar{K}$ он соответствует эквивалентной нагрузке по деформациям, а коэффициентом динамичности по усилиям является параметр \bar{K} .

Числовым экспериментом получены зависимости $K_{\text{п}}$ от $\bar{\omega}$ для си-

Таблица 1
Геометрия задачи и длительность импульса

Номер кривых на рис. 3	\hat{x}_1	\hat{x}_1/\hat{x}_*	$\bar{\omega}$
1	13,45	0,23	12,5
2	6,73	0,33	12,5
3	2,02	0,13	12,5
4	13,45	0,23	37,5
5	6,73	0,33	37,5
6	2,02	0,13	37,5
7	13,45	0,23	112,5
8	6,73	0,33	112,5
9	2,02	0,13	112,5

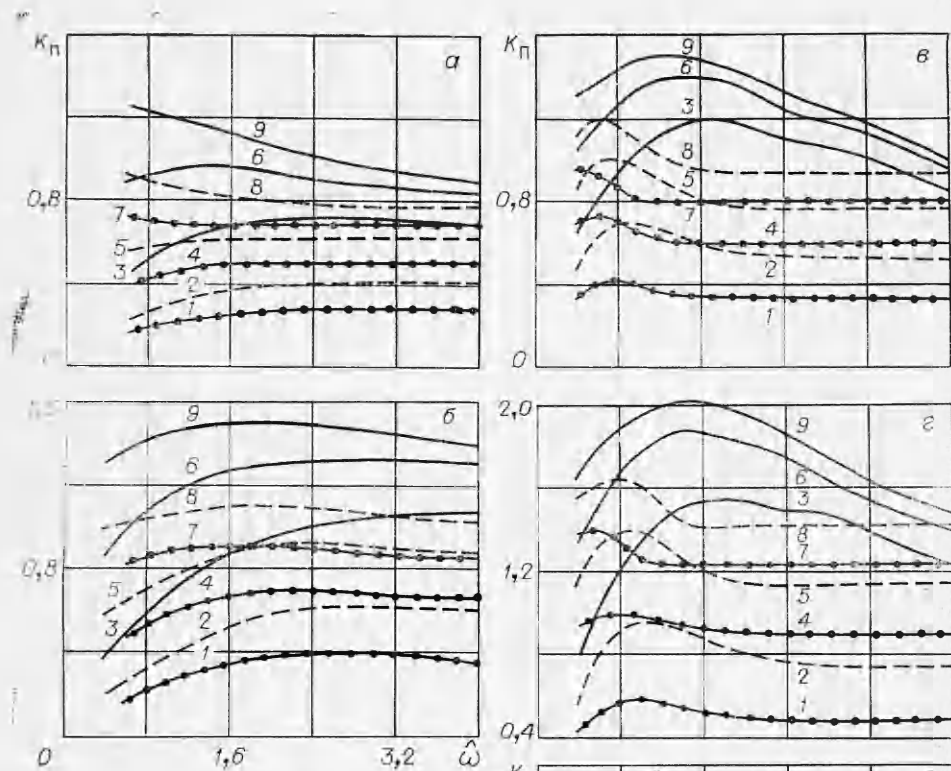


Рис. 3. Зависимость $K_n(\hat{\omega})$ для систем с $K_n \leq \hat{K}$.

стем с различными \hat{m}_1 и \hat{K} для трех пар значений \hat{x}_1 , \hat{x}_* и трех времен $\hat{\theta}$. Параметр $\hat{\omega}$ варьировался в диапазоне 0,4—4. Часть расчетов (рис. 3) ограничена упругой стадией работы систем ($K_n \leq \hat{K}$), и по экстремальным значениям коэффициента K_n установлены минимальные величины $(\hat{K})_{\min}$, при которых системы не получают пластических деформаций. Сводка данных для этой серии расчетов приведена в табл. 1, 2.

Из приведенных данных следует, что при равных значениях \hat{m}_1 и $\hat{\omega}$ коэффициент K_n растет вместе с параметрами \hat{m}_2 и $\hat{\theta}$, что связано с уменьшением влияния соответственно смещений массы \hat{m}_2 (т. е. податливости системы в целом) и волны разгрузки, излучаемой свободной поверхностью. Влияние \hat{m}_1 сказывается на форме функции $K_n(\hat{\omega})$, максимум которой смещается в направлении возрастания $\hat{\omega}$ при уменьшении \hat{m}_1 . С ростом заглубления \hat{x}_1 системы K_n убывает повсюду, за исключением нескольких расчетных вариантов в узкой зоне у низкочастотной границы диапазона $\hat{\omega}$, причем для небольших заглублений ($\hat{x}_1 = 2,02$) и особенно при малых длительностях нагрузки K_n меняется в широких пределах. Так, при $\hat{m}_1 = 24,9$ и $\hat{\theta} = 12,5$ $K_n = 0,3 \div 1,47$.

Таблица 2

Предельные значения коэффициента \hat{K} , при которых система не получает пластических деформаций

Рис. 3	\hat{m}_1	\hat{m}_2	Значения $(\hat{x})_{\text{ш.п.}}$ для кривых								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
a	0,23	0,747	0,28	0,42	0,73	0,51	0,63	0,98	0,72	0,92	1,26
b	0,23	7,47	0,40	0,63	1,08	0,70	0,93	1,33	0,91	1,12	1,51
в	2,24	7,47	0,43	0,70	1,19	0,73	1,01	1,40	0,96	1,20	1,51
г	2,24	74,7	0,58	0,96	1,56	0,99	1,40	1,88	1,40	1,64	2,02
д	24,9	74,7	0,63	0,99	1,47	1,18	1,52	1,74	1,58	1,84	1,87

На рис. 4 приведены зависимости $K_{\text{п}}(\hat{\omega}, \hat{K})$. Получено, что с увеличением \hat{x}_1 коэффициент $K_{\text{п}}$ резко уменьшается во всем диапазоне частот, вследствие чего пластические деформации на большей части диапазона $\hat{\omega}$ несутся или не возникают вовсе. Наблюдается сильная чувствительность $K_{\text{п}}$ к параметру \hat{K} , возрастающая вместе с θ . Для фиксированного θ имеется некоторое критическое значение \hat{K} , при переходе через которое к его меньшим значениям замечен эффект динамической неустойчивости — резкий рост максимума пластической деформации при незначительном убывании \hat{K} . При $\theta = 12,5$ $\hat{K} \sim 0,73$, а при $\theta = 37,5$ диапазон устойчивой работы системы сужается и \hat{K} возрастает до $\sim 0,82$.

Заметим, что численное решение задачи, аналогичной рассматриваемой, но связанной с нагружением двухмассовой упругой системы в слое грунта небольшой толщины, приведено в [4] в зависимости от безразмерных параметров, записанных (кроме $\hat{\omega}$) в несколько иной форме и для других диапазонов. Поэтому приведенные выше результаты и данные [4] для упругих систем взаимно дополняют друг друга.

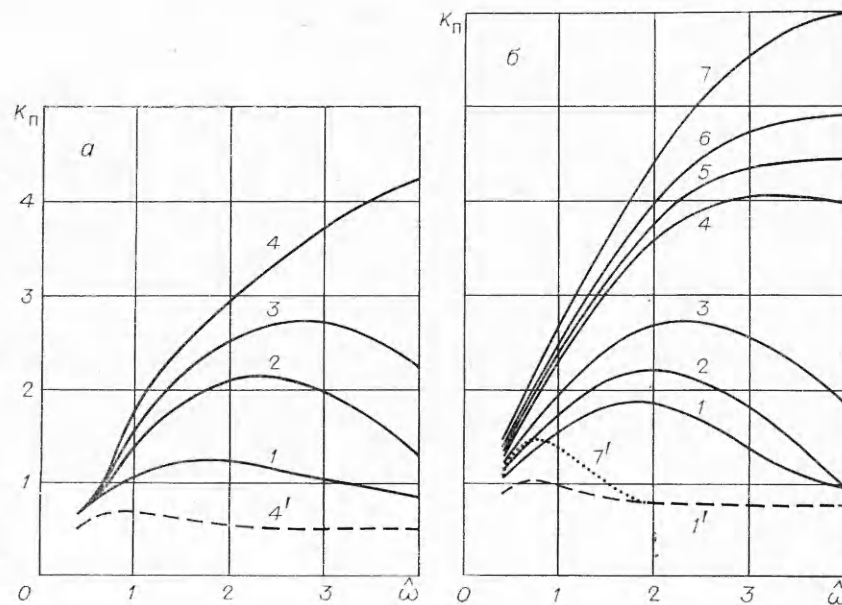


Рис. 4. Зависимость $K_{\text{п}}(\hat{\omega}, \hat{K})$ для упругопластических систем с $\hat{m}_1=2,23$, $\hat{m}_2=7,47$ при импульсах различной длительности.

а) $\hat{\theta}=12,5$: 1-4 — $\hat{K}=1,0$; 0,8; 0,75; 0,7 ($\hat{x}_1=2,02$, $\hat{x}_1/\hat{x}_*=0,13$), 4' — $\hat{K}=0,7$ ($\hat{x}=6,73$, $\hat{x}_1/\hat{x}_*=0,33$); б) $\hat{\theta}=37,5$: 1-7 — $\hat{K}=1,0$; 0,9; 0,85; 0,84; 0,83; 0,82; 0,80 ($\hat{x}_1=2,02$, $\hat{x}_1/\hat{x}_*=0,13$), 1', 7' — $\hat{K}=1,0$; 0,8 ($\hat{x}_1=6,73$, $\hat{x}_1/\hat{x}_*=0,33$).

Итак, численным анализом получены зависимости коэффициента динамичности деформации K_n от основных безразмерных параметров задачи динамики двухмассовых упругих и упругопластических систем, впаянных в грунтовую среду, нагруженную на свободной поверхности кратковременным импульсом давления с амплитудой p_Φ до $4 \cdot 10^5$ Па. Приведенные данные позволяют проводить расчетную оценку динамических деформаций упругопластических конструкций методами статики упругих систем по эквивалентной статической нагрузке.

Поступила в редакцию
4/IX 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Котляревский, Р. А. Румянцева, А. Г. Чистов. Изв. АН СССР, МТТ, 1977, 5.
2. Дж. Ферри. Вязкоупругие свойства полимеров. М., ИЛ, 1963.
3. М. А. Колтунов. Ползучесть и релаксация. М., Высшая школа, 1976.
4. В. А. Котляревский, Р. А. Румянцева. ФГВ, 1978, 14, 1.

О ТЕПЛОМ ВЗРЫВЕ ОКТОГЕНА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Л. А. Шипицын
(Раменское)

Для вычисления критических условий инициирования детонации вторичных ВВ ударными волнами и параметров процесса детонации необходимо знать кинетические характеристики термического распада и параметры теплового взрыва ВВ при давлениях порядка 100 кбар. В подобных расчетах [1—3] используются значения энергии активации и предэкспонента, определенные в обычных условиях, что нельзя признать достаточно обоснованным. Согласно [4, 5], в настоящее время кинетика термораспада ВВ в условиях детонационного процесса неизвестна.

При возбуждении детонации нитрометана ударными волнами обнаружено, что энергия активации уменьшается на 12 ккал/моль [6] и на 30 ккал/моль, согласно [7]. В работе [8] отмечается удивительно слабая зависимость времени реакции тротила в детонационной волне от температуры ударного сжатия и предполагается, что основной причиной наблюдаемой закономерности является изменение кинетических констант при давлении детонации. В [9] показано, что с учетом зависимости константы скорости реакции от давления и энергии упругого сжатия кристалла ВВ эффективное значение энергии активации определяется приближенным выражением

$$E_{\text{эфф}} = E + p\Delta V - \alpha\varepsilon, \quad (1)$$

где E — энергия активации, определенная в обычных условиях, например, с помощью манометрического метода; ΔV — активационный объем; p — давление; ε — энергия упругого сжатия ВВ ударной волной; α — численный коэффициент порядка единицы. В [10] обнаружено, что начиная с динамического давления ~ 130 кбар в нитробензоле развивается быстрая химическая реакция (пиролиз), сопровождающаяся скачкообразным уменьшением объема, потерей прозрачности и резким увеличением электропроводности. Следует, однако, заметить, что термин «пиролиз» не отражает роли давления и поэтому предпочтительнее использование названия термобарораспад.

Таким образом, теоретические и экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что при детонационных давлениях кинетические характеристики термического распада ВВ могут меняться существенным