

3. Горшков А. Г., Поцувев В. И. Стационарная задача динамики для пластин и оболочек, взаимодействующих с инерционными средами // Итоги науки и техники. ВИНТИ. Механика деформ. тв. тела. – М.: 1989. – № 20. – С. 3–41.

4. Левитан Ю. А., Моисеенко Б. Д. Численное моделирование разрушения упругих оболочек детонационной волной. – М.: 1990 (Препр. / АН СССР. Ин-т прикл. математики; № 5).

5. Костин В. В., Резцов А. С., Сучак С. Г., Фортвов В. Е. Численное моделирование взрывного разрушения толстостенных цилиндров. – Минск: 1990 (Препр. / АН БССР. Ин-т тепло- и массообмена; №5).

6. Годунов С. К., Рябенский В. С. Разностные схемы. Введение в теорию. – М.: Наука, 1973. – 400 с.

7. Дерibas А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1972. – 320 с.

8. Луговой П. З., Мукоид В. П., Мейш В. Ф. Динамика оболочечных конструкций при взрывных нагрузках. – К.: Наук. думка, 1991. – 280 с.

9. Цикулин М. А. Ударная воздушная волна при взрыве цилиндрического заряда большой длины // ПМТФ. – 1960. – № 3. – С. 188–193.

УДК 539.375+654.139.329

УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ДВУХСЛОЙНОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ В ГРУНТОВОМ МАССИВЕ ПРИ ВНУТРЕННЕМ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

Н. С. Ремез, канд. техн. наук (Институт гидромеханики НАН Украины)

Наведено результати чисельних розрахунків напружено-деформованого стану двошарової сферичної оболонки в ґрунтовому масиві при внутрішньому вибуховому навантаженні.

Проблема взаимодействия ударных волн с элементами конструкций в грунтах является актуальной в связи с тем, что многие объекты современной техники и гражданские сооружения испытывают в процессе строительства, эксплуатации и в аварийном режиме импульсные воздействия со стороны окружающей или заполняющей их среды. При этом возникает проблема рационального проектирования таких конструкций и оценки их прочностных свойств, что невозможно без точного знания воздействия внешних сил.

Математическая формулировка проблемы нестационарного взаимодействия деформируемых конструкций со сжимаемыми средами с учетом нелинейных эффектов приводит к сложным начально-краевым задачам, решение которых является актуальным с научной и практической точек зрения. Большинство исследований в данном направлении посвящено нестационарной

аэрогидроупругости, в значительно меньшей степени – динамическому взаимодействию оболочек с грунтовыми средами.

Широкий круг задач аэрогидроупругости исследован в работах В. А. Баталова, А. С. Вольмира [1–2], А. Н. Гузя, В. Д. Кубенко, А. Э. Бабаева, В. П. Годенко, В. П. Кругленко, В. В. Кришталева [3–9], В. В. Безиной, А. Г. Горшкова [10]; А. Э. Бабаев, А. Г. Лейко, В. Г. Савин [11–13] рассмотрели задачи нестационарной гидроэлектроупругости.

В работах В. Г. Баженова, С. Ю. Зефирова, А. В. Кочеткова, С. С. Михайлова, С. В. Крылова, В. К. Ломунова, В. Р. Фельдгуна [14–18] проведено численное исследование динамического поведения оболочек, погруженных в жидкость или газ при импульсном нагружении.

Результаты экспериментальных исследований взаимодействия оболочек с сильными ударными волнами в воздухе обобщены в монографии А. В. Кармишина, Э. Д. Скурлатова, В. Г. Старцева, В. А. Фельдштейна [19].

В рамках нелинейной постановки задач гидроупругости в монографиях [20–23] Ш. У. Галиев аналитически и численно исследовал распространение волн различной физико–механической природы в элементах конструкций, состоящих из однослойных или многослойных материалов с твердыми или жидкими заполнителями.

П. З. Луговой, В. П. Мукоид [24–26] рассмотрели ряд связанных задач гидроупругости цилиндрических оболочек конечной длины в рамках геометрически нелинейной теории оболочек типа Тимошенко.

В отличие от задач аэрогидроупругости задачи нестационарного взаимодействия элементов конструкций с грунтовыми средами изучены в существенно меньшей степени ввиду большого разнообразия свойств реальных грунтов и, соответственно, многообразием и сложностью математических моделей. Наибольшее количество работ по проблеме динамического взаимодействия с грунтовыми средами получено для грунтов, моделируемых различными вариантами линейно-упругих или линейно-вязкоупругих сред.

В работе [27] К. С. Султанова, В. П. Корниенко решена задача о воздействии синусоидальной нагрузки на неподвижную и недеформируемую преграду в вязкоупругой среде.

А. Я. Сагомоян и И. С. Гаевская [28] предложили расширение метода «крупных частиц» для решения нестационарных задач взаимодействия сейсмических и ударных волн с сооружениями, расположенными в грунте, моделируемом пластическим газом.

Взаимодействие пластических волн с тонкостенными конструкциями рассматривалось в работах А. Г. Горшкова, Н. С. Курановой, Р. Г. Якупова [29, 30].

Более сложные модели сред в задачах взаимодействия использовались в работах В. Г. Баженова, А. В. Кочеткова, С. В. Крылова, Г. С. Михайлова, В. Р. Фельдгуна [31–33]. Грунт моделировался моделью пластического газа Рахматулина–Сагомояна, моделью С. С. Григоряна или моделью трехкомпонентной нелинейно-упругой среды. Задачи решались в несвязанной постановке.

Из приведенного обзора и анализа публикаций, посвященных исследуемой проблеме, следует: недостаточно изучены нелинейные задачи

динамического деформирования гладких и подкрепленных оболочек с одновременным учетом различных нелинейных эффектов геометрического и физического характера; наиболее изученными являются линейные задачи аэрогидроупругости. Мало изучены процессы взаимодействия элементов конструкций с грунтовыми средами с учетом реальных нелинейных свойств конструкций и грунтов и связанностью полей динамических величин.

В настоящей работе исследуется расположенная в грунтовом массиве двухслойная сферическая оболочка, слои которой выполнены из различных материалов, при внутреннем взрыве сферического заряда химического взрывчатого вещества (ВВ).

Уравнения движения продуктов детонации, оболочки и грунта в переменных Лагранжа для сферической системы координат имеют вид

$$\rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial r} \right) = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{2(\sigma_r - \sigma_\theta)}{r}, U = \frac{\partial r}{\partial t}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r\rho U)}{\partial r} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + P \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} - \bar{V} (S_r \dot{\epsilon}_r + 2S_\theta \dot{\epsilon}_\theta) = 0; \quad (3)$$

$$\sigma_i = S_i - P, \quad (i = r, \theta); \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon}_r = \frac{\partial U}{\partial r}, \quad \dot{\epsilon}_\theta = \frac{U}{r}, \quad \dot{\epsilon}_z = 0, \quad (5)$$

где ρ – текущая плотность; U – массовая скорость; t – время; P – среднее гидростатическое давление; σ_i, S_i – компоненты тензора и девиатора тензора напряжений; $\dot{\epsilon}_i$ – компоненты тензора скоростей деформаций; $i = r, \theta, z$ – координаты; $\bar{V} = V/V_0$, V , V_0 – относительный, текущий и начальный удельные объемы; E – удельная внутренняя энергия. Точки над величинами обозначают операцию дифференцирования. Для продуктов детонации $S_i = 0$.

Уравнением состояния продуктов детонации служит уравнение [34]

$$P = A\rho^n + B\rho^{\gamma+1}, \quad (6)$$

где A, n, B, γ – экспериментальные коэффициенты.

Поведение оболочки описывается идеальной упругопластической средой с условием текучести Мизеса [35]:

$$P = (\gamma_m - 1)\rho E + C_0^2(\rho - \rho_0); \quad (7)$$

$$\frac{\partial S'_i}{\partial t} = 2\mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{3\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} \right), \quad (i = r, \theta, z), \quad (8)$$

$$S_i = S'_i, \text{ если } (S'_r)^2 + (S'_\theta)^2 + (S'_z)^2 \leq 2/3Y^2; \quad (9)$$

$$S_i = \sqrt{2/3S'_iY\sqrt{(S'_r)^2 + (S'_\theta)^2 + (S'_z)^2}}, \text{ в противном случае.}$$

Здесь использованы следующие обозначения: ρ_0 – начальная плотность, C_0 – скорость звука, Y – предел текучести, μ – модуль сдвига оболочки, γ_m – константа.

Грунт моделируется твердой пористой многокомпонентной вязкопластической средой [36–37]:

$$\dot{\varepsilon} = \varphi(P, \varepsilon)\dot{P} - \frac{\alpha_1 \lambda(P, \varepsilon)}{\eta(P, \varepsilon)} \psi(P, \varepsilon) \quad (10)$$

с переменным коэффициентом объемной вязкости

$$\eta(\varepsilon) = \eta_D \left(\frac{\kappa - \rho_0 c_S^2}{\kappa - \rho_0 c_S^2} \right)^{-m}, \quad m > 1, \quad (11)$$

где c_S – скорость звука при статическом нагружении; κ, k – константы.

Функции, входящие в уравнения (10)–(11), определяются согласно [37].

Начальные условия задачи нулевые.

Граничными условиями являются:

1) условие “непротекания” в центре заряда: скорость $U = 0$ при $r = 0$;
 2) условие непрерывности напряжений σ_r и скорости U на подвижных контактах продукты детонации–оболочка, между слоями оболочки и между оболочкой и грунтовым массивом;

3) условие отслаивания: если на поверхности контакта напряжение σ_r ни разу не превысило некоторого критического напряжения отслаивания $\sigma_{кр}$, то считаем, что слои абсолютно жестко скреплены между собой и выполняются условия 2; если в какой-либо точке поверхности контакта напряжение σ_r превысило $\sigma_{кр}$, происходит отслаивание, и в этой точке записывается условие на свободной поверхности $\sigma_r = 0$;

4) условие “откола”: если в какой-либо точке грунта давление становится $P \leq P'$, где P' – давление, соответствующее прочности грунта на отрыв, то полагаем, что $P = P' = 0$.

При решении поставленной задачи исходные дифференциальные уравнения аппроксимировались конечно-разностными уравнениями с использованием разностной схемы второго порядка точности типа “крест” [38]. Условием устойчивости данной схемы служит условие типа Куранта.

В качестве ВВ использовался заряд тротила радиусом $r_0 = 0,1$ м. Рассматривался глинистый грунт.

Слой оболочки были выполнены из пластика и меди. Характеристики пластика: $\rho_0 = 500$ кг/м³; $C_0 = 5300$ м/с; $\gamma_m = 2,18$; $\mu = 2 \cdot 10^9$ Па; $Y = 0,03 \cdot 10^9$ Па;

характеристики меди: $\rho_0 = 8930 \text{ кг/м}^3$; $C_0 = 3930 \text{ м/с}$; $\gamma_m = 2,69$; $\mu = 39 \cdot 10^9 \text{ Па}$; $Y = 1,8 \cdot 10^9 \text{ Па}$. Откольная прочность стыка $\sigma_{кр} = 10 \text{ МПа}$.

Геометрические параметры оболочки следующие: внутренний радиус оболочки равен радиусу заряда r_0 , внутренний радиус второго слоя $r_1 = 5,47 r_0$, внешний радиус — $r_2 = 6,47 r_0$.

На рис. 1 показано динамическое поведение двухслойной оболочки во времени. При этом цифрами 1, 2, 3 обозначены ПД, первый и второй слои оболочки соответственно; 5, 6 — внутренний и внешний радиусы второго слоя; 4 — зазор между слоями оболочки, 7 — грунт, 8 — зазор между внешним радиусом оболочки и грунтом. На рисунке можно проследить следующие процессы. Расширение газовой полости носит колебательный характер, причем эти колебания затухают со временем, что является следствием наложения проходящих и отраженных волн. Динамика оболочки тоже носит колебательный характер, причем первый, менее прочный слой деформируется более значительно, чем второй. С течением времени слои оболочки расслаиваются, между ними возникает зазор, развивающийся со временем, двухслойная сферическая оболочка разрушается. Между оболочкой и грунтом также наблюдается развитие зазора, однако его амплитудные характеристики оказываются значительно меньшими и отстающими во времени, что соответствует диссипации энергии волны при выходе ее в грунтовый массив.

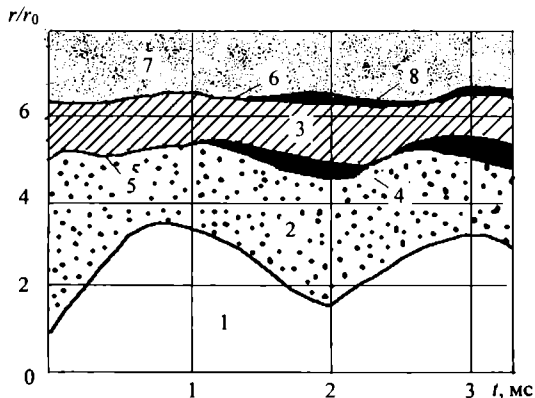


Рис. 1

На рис. 2 приведено распределение нормальных радиальных напряжений по радиусу двухслойной оболочки. Нумерация кривых соответствует различным моментам времени: 1 — $t = 1,2$ мкс, 2 — $t = 2,3$ мкс, 3 — $t = 3,2$ мкс. Вертикальная штриховая линия соответствует разделу слоев оболочки. Анализ полученных численных результатов показывает, что отслаивание увеличивает максимальное значение сжимающих напряжений, причем в результате соударения слоев возникают напряжения с более крутыми фронтами. Следует

отметить, что время, в которое происходит рост амплитуды волн, соответствует времени роста зазора. Отсюда следует, что разрушение одних участков конструкции приводит к усилению волн, что, в свою очередь, ведет к разрушению других участков.

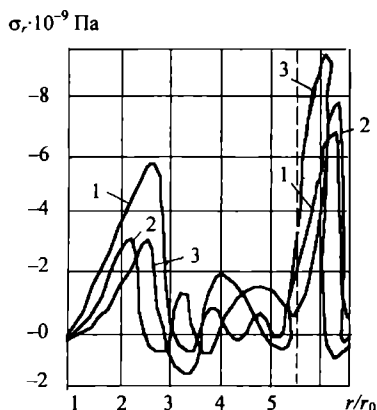


Рис. 2

На рис. 3 представлены зависимости контактного давления грунта на оболочку без учета отслаивания (кривая 1) и с учетом отслаивания (кривая 2) от времени.

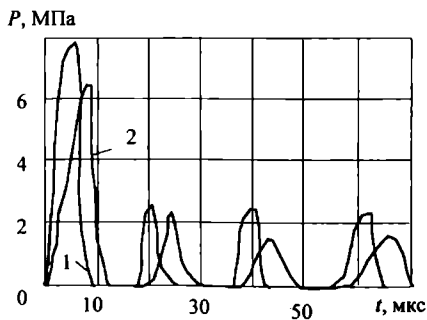


Рис. 3

Из рисунка видно, что поведение давления на внешнюю поверхность оболочки носит аperiodический затухающий во времени колебательный характер, обусловленный диссипацией энергии, идущей на пластические деформации конструкции. В грунте давление изменяется пикообразно, причем имеются участки нулевого давления, соответствующие откольным явлениям грунта. При учете отслаивания амплитуда давления уменьшается, поскольку при разрушении конструкции увеличиваются диссипативные потери.

Выводы

1. Решена задача о действии взрыва сферического заряда взрывчатого вещества на двухслойную сферическую оболочку, размещенную в грунтовом массиве, с учетом связанности полей динамических величин и современных модельных представлений взаимодействующих сред.

2. Проведено численное исследование напряженно-деформированного состояния слоистой оболочки и грунта, на основе которого установлено, что учет отслаивания слоев оболочки приводит к ее разрушению с одновременным уменьшением пиков давления в грунтовом массиве.

3. Изложенная методика расчета взаимодействия ударных волн со слоистыми конструкциями в грунтовом массиве позволяет детально изучить динамику волновых процессов и разрушение этих сред и может быть использована при проектировании и в процессе эксплуатации конструкций, испытывающих импульсные нагрузки со стороны заполняющих или окружающих их сред.

4. Данные исследования необходимо развивать для изучения динамического поведения слоистых элементов конструкций в грунтовых массивах, в том числе цилиндрических оболочек конечной длины.

1. *Баталов В. А., Иванов А. Г., Иванова Г. Г. и др.* Исследование прочности однослойных и многослойных цилиндрических сосудов при внутреннем динамическом нагружении импульсами различной длительности // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1978. – № 5. – С. 152–158.

2. *Вольмир А. С.* Оболочки в потоке жидкости и газа (задачи гидроупругости) – М.: Наука, 1979. – 320 с.

3. *Гузь А. Н., Кубенко В. Д., Бабаев А. Э.* Гидроупругость систем оболочек. – Киев: Вища школа, 1984. – 206 с.

4. *Бабаев А. Э., Кубенко В. Д., Кристалева В. В.* Переходные процессы в цилиндрической оболочке с жидкостью под действием ударной нагрузки // Прикладная механика. – 1987. – 23, № 1. – С. 30–37.

5. *Кубенко В. Д., Бабаев А. Э., Годенко В. П.* Действие упругой нагрузки на сферическую оболочку, заполненную жидкостью // Прикладная механика. – 1986. – 22, № 9. – С. 33–41.

7. *Бабаев А. Э.* Задачи дифракции нестационарных волн на оболочках, расположенных вблизи плоской границы // Прикладная механика. – 1989. – 25, № 1. – С. 71 – 83.

8. *Годенко В. П.* Действие плоской акустической волны на сферическую оболочку, расположенную вблизи жесткой стенки // Прикладная механика. – 1986. – 22, № 9. – С. 41–48.

9. *Кубенко В. Д., Бабаев А. Э., Годенко В. П.* Взаимодействие нестационарной акустической волны давления с жесткой сферой, расположенной вблизи свободной поверхности // Гидромеханика. – 1988. – Вып. 57. – С. 10–15.

10. *Безина В. В., Горшков А. Г.* Действие ударных волн на упругие оболочки // Расчет на прочность и оптимальное проектирование элементов авиационных конструкций. – М.: Моск. авиац. ин-т. – 1988. – С. 29–35.

11. *Бабаев А. Э., Лейко А. Г., Савин В. Г.* Измерение звука цилиндрическим пьезовибратором, экранированным металлической оболочкой, при нестационарных режимах работы // Акуст. журнал. – 1988. – 34, № 3. – С. 408–413.

12. *Бабаев А. Э., Савин В. Г., Стадник А. И.* Излучение звука системой пьезокерамических сферических оболочек при электрическом импульсном возбуждении // Прикладная механика. – 1988. – 24, № 10. – С. 34–40.

13. *Бабаев А. Э., Савин В. Г.* Нестационарная гидроупругость системы коаксиальных пьезокерамических цилиндрических оболочек при электрическом возбуждении // Прикладная механика. – 1988. – 24, № 11. – С. 39–46.

14. *Баженов В. Г., Батанин М. А., Ломунов В. Г. и др.* Уругопластическое деформирование ветвящихся оболочек вращения при импульсном нагружении // Применение численных методов в строительной механике корабля. – Л.: Судостроение, 1976. – С. 176–180.

15. *Взаимодействие уругопластических тонкостенных элементов конструкций с ударными волнами в идеальных и сжимаемых средах / В. Г. Баженов, А. В. Кочетков, Г. С. Михайлов, А. Г. Угодчиков* // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1979. – № 2. – С. 141–149.

16. *Баженов В. Г., Кочетков А. В., Крылов А. С.* Исследование нелинейных эффектов при взаимодействии оболочечных конструкций с жидкостью и газом // Взаимодействие тел с границами раздела сплошной среды. – Чебоксары: Чуваш. ун-т, 1985. – С. 11–15.

17. *Баталов В. А., Иванов А. Г., Иванова Г. Г. и др.* Исследование прочности однослойных и многослойных цилиндрических сосудов при внутреннем динамическом нагружении импульсами различной длительности // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1978. – № 5. – С. 152–158.

18. *Кочетков А. В., Михайлов С. Г.* Взаимодействие уругопластических цилиндрических оболочек с подводными ударными волнами // Прикладные проблемы прочности и пластичности. – 1978. – Вып. 8. – С. 44–50.

19. *Кармишин А. В., Скурлатов Э. Д., Старцев В. Г. и др.* Нестационарная аэроупругость тонкостенных конструкций. – М.: Машиностроение, 1982. – 240 с.

20. *Галиев Ш. У.* Динамика взаимодействия элементов конструкций с волной давления в жидкости. – Киев: Наук. думка, 1977. – 172 с.

21. *Галиев Ш. У.* Динамика гидроупругопластических систем. – Киев: Наук. думка, 1981. – 275 с.

22. *Галиев Ш. У.* Нелинейные волны в ограниченных сплошных средах. – Киев: Наук. думка, 1988. – 261 с.

23. *Галиев Ш. У., Бабич Ю. Н., Жураховский С. В. и др.* Численное моделирование волновых процессов. – Киев: Наук. думка, 1989. – 200 с.

24. *Луговой П. З., Мукоид В. П.* Реакция цилиндрической оболочки с жидкостью на импульсное торцевое воздействие // Сопротивление материалов и теория сооружений. – 1986. – Вып. 49. – С. 51–54.

25. *Мукоид В. П.* Колебания цилиндрической оболочки при продольном ударе по торцу // Тр. X научн. конф. молод. ученых ин-та механики АН УССР. Киев, 12–14 июня 1984. – Ч. 2 / АН УССР, Ин-т механики. – Киев, 1984. – С. 252–256. (Деп. в ВИНТИ 30.07.84; 5535 – 84 Деп.).
26. *Мукоид В. П., Луговой П. З.* Численное исследование задачи о распространении интенсивной гидроударной волны внутри упругой цилиндрической оболочки // Прикладная механика. – 1986. – 22, № 5. – С. 31–40.
27. *Султанов К. С., Корниенко В. П.* Взаимодействие продольных волн с преградой в вязкоупругой среде // Изв. АН УзССР. Сер. техн. наук. – 1980. – № 5. – С. 52–56.
28. *Сагомонян А. Я., Гаевская И. С.* Расчет взаимодействия ударных волн с преградой в грунте // Динамика оснований, фундаментов и подземных сооружений. – Материалы 5-й Всесоюз. конф., Ташкент, 8–10 декабря, 1981. – Т. 2.: Ташкент. – 1981. – С. 135–137.
29. *Якупов Р. Г.* Пластическое деформирование пологой сферической оболочки при взрывном нагружении // Проблемы прочности. – 1979. – № 2. – С. 25–29.
30. *Якупов Р. Г.* Взрывное нагружение цилиндрической оболочки и определение безопасных расстояний взрыва // Нелинейные проблемы аэрогидроупругости. Тр. семинара по теории оболочек. – 1979. – Вып. 11. – С. 147–157.
31. *Кочетков А. В., Крылов С. В., Фельдгун В. Р.* Нестационарное взаимодействие тонкостенных конструкций с ударными волнами в грунтовых средах // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы реш. задач упруг. и пластич.: Всес. межвуз. сб. – Горький: Горьков. ун-т. – 1985. – С. 60–65.
32. *Баженов В. Г., Кочетков А. В., Фельдгун В. Р.* Деформирование цилиндрической оболочки в мягкой грунтовой среде под действием внутреннего импульсного нагружения // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения.: Всес. межвуз. сб. – Горький: Горьков. ун-т. – 1989. – С. 87–95.
33. *Кочетков А. В., Фельдгун В. Р.* Дифракция ударных волн на оболочках вращения в водонасыщенных грунтовых средах // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Числ. модел. физ.-мат. процессов.: Всесоюз. межвуз. сб. – Горький: Горьков. ун-т. – 1990. – С. 67–73.
34. *Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П. и др.* Физика взрыва. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
35. *Одинцов В. А., Чудов Л. А.* Расширение и разрушение оболочек под действием продуктов детонации // Проблемы динамики упруго-пластических сред. – М.: Мир, 1975. – С. 85–154.
36. *Ляхов Г. М.* Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах. – М.: Наука, 1982. – 286 с.
37. *Ремез Н. С.* Особливості деформування твердого багатого компонентного в'язкопластичного середовища зі змінним коефіцієнтом в'язкості при динамічних навантаженнях // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Гірництво": Збірник наукових праць. – Київ. – 2000. – Вип. 3. – С. 34–39.
38. *Уилкинс М. Л.* Расчет упруго-пластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир, 1967. – С. 212–263.