

НОВАЯ НАУКА

Международный центр
научного партнерства



NEW SCIENCE

International Center
for Scientific Partnership

СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАК ФАКТОР НАЦИОНАЛЬНОГО РОСТА И РАЗВИТИЯ

Сборник статей II Международной
научно-практической конференции,
состоявшейся 12 февраля 2026 г.
в г. Петрозаводске

г. Петрозаводск
Российская Федерация
МЦНП «НОВАЯ НАУКА»
2026

УДК 001.12
ББК 70
С56

Ответственные редакторы:
Ивановская И.И., Кузьмина Л.А.

С56 Современные исследования как фактор национального роста и развития: сборник статей II Международной научно-практической конференции (12 февраля 2026 г.). — Петрозаводск : МЦНП «НОВАЯ НАУКА», 2026. — 172 с. : ил., табл.

ISBN 978-5-00276-006-0

Настоящий сборник составлен по материалам II Международной научно-практической конференции **СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАК ФАКТОР НАЦИОНАЛЬНОГО РОСТА И РАЗВИТИЯ**, состоявшейся 12 февраля 2026 года в г. Петрозаводске (Россия). В сборнике рассматривается круг актуальных вопросов, стоящих перед современными исследователями. Целями проведения конференции являлись обсуждение практических вопросов современной науки, развитие методов и средств получения научных данных, обсуждение результатов исследований, полученных специалистами в охватываемых областях, обмен опытом. Сборник может быть полезен научным работникам, преподавателям, слушателям вузов с целью использования в научной работе и учебной деятельности.

Авторы публикуемых статей несут ответственность за содержание своих работ, точность цитат, легитимность использования иллюстраций, приведенных цифр, фактов, названий, персональных данных и иной информации, а также за соблюдение законодательства Российской Федерации и сам факт публикации.

Полные тексты статей в открытом доступе размещены в Научной электронной библиотеке Elibrary.ru в соответствии с Договором № 467-03/2018К от 19.03.2018 г.

УДК 001.12
ББК 70

ISBN 978-5-00276-006-0

© Коллектив авторов, текст, иллюстрации, 2026
© МЦНП «НОВАЯ НАУКА» (ИП Ивановская И.И.), оформление, 2026

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАШЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ТРЁХСЛОЙНОЙ КОМПОЗИТНОЙ СИСТЕМОЙ

Шишулин Александр Владимирович

к.х.н., доцент

Янишевский Леонид Станиславович

Стовпыра Тимофей Григорьевич

Васильева Анастасия Михайловна

студенты

Научный руководитель: **Шишулин Александр Владимирович**

к.х.н., доцент

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный
технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Аннотация: Предложена математическая модель трехслойной структуры для диссипации энергии ударной волны. Система включает внешний и внутренний стальные слои и центральный композитный слой на основе пористого полиэтилена с порами, заполненными олигомерной фракцией полибутадиена. Модель описывает взаимодействие перпендикулярно распространяющейся ударной волны с нелинейными и диссипативными свойствами многослойного композита. Установлены соотношения, связывающие распространение ударного фронта перпендикулярно слоям с нелинейными и диссипативными свойствами композита.

Ключевые слова: композиционный материал, ударное нагружение, ударная адиабата, закон Дарси, LS-DYNA.

MATHEMATICAL MODELING OF SHOCK WAVE ATTENUATION BY A THREE-LAYER COMPOSITE SYSTEM

Shishulin Alexandr Vladimirovich

Yanishovsky Leonid Stanislavovich

Stovpyra Timofey Grigoryevich

Vasilyeva Anastasia Mikhailovna

Scientific adviser: **Shishulin Alexandr Vladimirovich**

Abstract: A mathematical model of a three-layer structure for dissipating shock wave energy is proposed. The system comprises outer and inner steel layers and a central composite layer based on porous polyethylene filled with a polybutadiene oligomer fraction. The model describes the interaction of a perpendicularly propagating shock wave with the nonlinear and dissipative properties of the multilayer composite. Relationships linking the propagation of the shock front perpendicular to the layers with the nonlinear and dissipative properties of the composite are established.

Key words: composite material, shock loading, shock adiabat, Darcy's law, LS-DYNA.

Рассматривается одномерная задача о распространении ударной волны вдоль оси x через плоскопараллельную трёхслойную структуру. Падающий импульс задаётся на внешней грани первого слоя. Послойная структура системы имеет следующий вид:

1) *слой 1 (внешний)*: сталь, толщина L_1 , характеризуется плотностью ρ и скоростью звука c ;

2) *слой 2 (центральный)*: композитный материал на основе твердого полиэтилена с равномерно распределёнными сферическими порами (объёмная доля пористости φ , средний радиус пор r_p , полностью заполненными жидкой олигомерной фракцией полибутадиена. Толщина слоя L_2 ;

3) *слой 3 (внутренний)*: сталь, аналогичная первому слою, толщина L_3 .

Задачей модели является количественное описание механизмов ослабления ударного импульса при его прохождении через центральный композитный слой.

1. Модель ударного нагружения в металлических слоях. Динамика в стальных слоях (1 и 3) описывается системой уравнений сохранения массы, импульса и энергии для сжимаемой сплошной среды [1]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + p)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial(u(E + p))}{\partial x} = 0,$$

где u – скорость частиц среды; p – гидростатическое давление; $E = \rho e + 0.5 \rho u^2$ – полная объёмная плотность энергии; e – удельная внутренняя энергия. Для замыкания системы используется уравнение состояния Ми-Грюнайзена, учитывающее ударную сжимаемость:

$$p(\rho, e) = p_{ref}(\rho) + \rho \Gamma(\rho) (e - e_{ref}(\rho)), \quad \eta = \frac{\rho}{\rho_0}, \quad \Gamma(\rho) = \Gamma_0 \frac{\rho_0}{\rho},$$

где ρ_0 и ρ – текущая и начальная плотности; c_0 – скорость звука при нулевом давлении; $\Gamma(\rho)$ и Γ_0 – параметры Грюнайзена, текущий и при начальной плотности; η – степень сжатия; s – безразмерный параметр, связывающий скорость ударной волны D и скорость частиц u : $D = c_0 + su$. $p_{ref}(\rho)$ и $e_{ref}(\rho)$ – референсное давление и референсная удельная внутренняя энергия на опорной кривой. В качестве референсной кривой используется ударная адиабата Гюгонию, задаваемая соотношением Рэнкина-Гюгонию [2]:

$$p_{ref}(\rho) = \frac{\rho_0 c_0^2 (\eta - 1)}{|1 - s(\eta - 1)|^2}, \quad e_{ref}(\rho) = \frac{p_{ref}(\rho)}{2\rho} \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right).$$

Слагаемое $p_{ref}(\rho)$ отвечает «холодной» составляющей давления, определяющее поведение при изоэнтропийном сжатии и обусловлено силами межатомного взаимодействия, в свою очередь $\rho \Gamma(\rho) (e - e_{ref}(\rho))$ представляет собой «термическую» составляющую, обусловленную тепловым движением атомов и пропорциональную отклонению энергетической характеристики от референсной кривой. Пластическое поведение стали при высоких скоростях деформации моделируется уравнением Джонсона-Кука [3]:

$$\sigma_y = (A + B \varepsilon_p^n) (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 - T^{*m}),$$

где σ_y – динамический предел текучести; ε^p – накопленная эквивалентная пластическая деформация, $\dot{\varepsilon}^*$ – безразмерная скорость деформации ($\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}_p / \dot{\varepsilon}_0$; $\dot{\varepsilon}_p$ – скорость пластической деформации; $\dot{\varepsilon}_0$ – эталонная скорость деформации), $T^* = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room})$ – гомологическая температура (T , T_{room} , T_{melt} – текущая, комнатная температуры и температура плавления соответственно). A , B , C , m , n – константы модели Джонсона-Кука. Связь полного напряжения σ_x , давления и девиаторной компоненты s_x в одномерном случае: $\sigma_x = -p + s_x$, где $s_x = \frac{2}{3} \sigma_y \text{sign}(\dot{\varepsilon}_p)$.

2. Модель насыщенного пористого композитного слоя. Центральный слой рассматривается как двухфазная среда, состоящая из упругопластического каркаса (полиэтилен) и вязкотекучего олигомера в порах. Рассматривается случай пор, заполненных однофазной олигомерной фракцией полибутадиена (заполнение пор бинарной или многокомпонентной расслаивающейся смесью

подобной [4,5] может привести к реализации ряда дополнительных эффектов).
Используется осреднённый подход Био с модификациями [6]. Осреднённая
плотность композита:

$$\rho_2 = (1-\varphi)\rho_{sol} + \varphi\rho_{fl},$$

где индексы *sol* и *fl* относятся к матрице (полиэтилен) и вязкотекучего
олигомера полибутадиена соответственно; ρ_{sol} и ρ_{fl} – текущие плотности фаз.
Система уравнений для двух фаз включает законы сохранения. Для фазы
полиэтилена:

$$\frac{\partial}{\partial t}((1-\varphi)\rho_{sol}) + \frac{\partial}{\partial x}((1-\varphi)\rho_{sol}u_{sol}) = 0, \quad (1-\varphi)\rho_{sol} \frac{Du_{sol}}{Dt} = \frac{\partial \sigma_s}{\partial x} - F_{int}.$$

Здесь и ниже u_{sol} и u_{fl} – скорости частиц твердой и жидкой фаз
соответственно; σ_s – полное напряжение в твердой фазе; F_{int} – объемная
плотность силы межфазного взаимодействия; $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_{ph} \frac{\partial}{\partial x}$, $ph = sol, fl$ –
субстанциональная (полная) производная, описывающая изменение величины,
движущейся вместе с частицей среды.

Для жидкой фазы:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi\rho_{fl}) + \frac{\partial}{\partial x}(\varphi\rho_{fl}u_{fl}) = 0, \quad \varphi\rho_{fl} \frac{Du_{fl}}{Dt} = -\varphi \frac{\partial p_{fl}}{\partial x} + F_{int}.$$

Межфазная сила взаимодействия (F_{int}) учитывает вязкое сопротивление
(закон Дарси) и присоединённую массу [6]:

$$F_{int} = \frac{\mu_{fl}\varphi^2}{k}(u_{fl} - u_{sol}) + \rho_{fl}C_a\varphi \left(\frac{Du_{fl}}{Dt} - \frac{Du_{sol}}{Dt} \right).$$

Здесь C_a – коэффициент присоединенной массы; μ_{fl} – динамическая
вязкость олигомера. Проницаемость пористой среды k связана с параметрами
пор: $k = \varphi r_p^2 / 4\kappa$, где κ – безразмерный коэффициент формы ($\kappa \approx 4.5$ для сфер,
для описания морфологии пор возможны и другие подходы [7]).

Полное напряжение в твердой фазе σ_{sol} складывается из объёмного и
девиаторного откликов: $\sigma_{sol} = -p_{sol} + \tau_{sol}$. Давление в полиэтиленовой матрице p_{sol}
задаётся полиномиальным уравнением состояния:

$$p_{sol} = A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)\rho_{sol,0}e_{sol}, \quad \mu = \rho_{sol}/\rho_{sol,0} - 1.$$

Здесь A_1, A_2, A_3, B_0, B_1 – константы в полиномиальном уравнении
состояния; $\rho_{sol,0}$ и $\rho_{fl,0}$ – начальные плотности твердой и жидкой фаз; e_{sol} –
удельная внутренняя энергия. Жидкая фаза считается баротропной:

$p_{fl} = \rho_{fl,0} c_{fl}^2 (\rho_{fl} / \rho_{fl,0} - 1)$, где c_{fl} – скорость звука в вязкотекучей фазе. Динамика пористости описывается уравнением:

$$\frac{D\varphi}{Dt} = (1-\varphi) \frac{\partial u_{sol}}{\partial x} - \frac{\varphi}{K_{fl}} \frac{Dp_{fl}}{Dt},$$

учитывающим деформацию каркаса и сжимаемость жидкости. K_{fl} – модуль объемной упругости вязкотекучей фазы.

3. Граничные условия и критерий эффективности. На границах раздела слоёв $x = L_1$ и $x = L_1 + L_2$ постулируется непрерывность скоростей твердой фазы и нормальных напряжений. Для одномерной постановки принимается условие непротекания жидкости через границы: $u_{fl} = u_{sol}$ на границах слоя 2. Падающий ударный импульс задаётся в виде экспоненциально затухающего профиля давления на левой границе слоя 1: $p_{inc}(t) = p_{max} \exp(-t/\theta)$, где $p_{inc}(t)$ – давление на фронте ударной волны; p_{max} – пиковое давление в падающем импульсе; θ – характерное время спада импульса.

```
*MAT_JOHNSON_COOK_TITLE
Armor Steel - Layer 1 & 3
$# mid ro g e pr dtf vp rateop
1 7.850 77.000 210.000 0.300 0.000 0.000 0.000
$# a b n c m tm tr epsilon0
5.000E+08 8.000E+08 0.360000 0.022000 1.030000 1.793E+03
2.930E+02 1.000E+00
$# cp pc failure damage d1-d5 erod
4.770E+02 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.0 0.0
$# d1 d2 d3 d4 d5 epsf
0.040000 3.440000 -2.120000 0.002000 0.610000 0.000000

*EOS_GRUNEISEN_TITLE
Gruneisen EOS for Armor Steel
$# eosid c s1 s2 s3 g0 e0 v0
1 4.569E+03 1.490000 0.000000 0.000000 2.170000 0.000000
0.000000
$# c4 c5 c6 a0 e1 v1
0.460000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000

*MAT_ADD_EROSION_TITLE
Failure Criteria for Steel
$# mid excl mxeps eps1 eps2 eps3 eps4 eps5
1 0.000E+00 1.500E-01 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
0.000E+00 0.000E+00
$# eps6 eps7 eps8 pmin pmax sigp1 sigp2 sigp3
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
0.000E+00 0.000E+00
$# sigp4 sigp5 sigp6 ipit ipert1 ipert2 ifail1 ifail2
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0 0 0 0 0 0

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TITLE
Steel-Composite Interface
$# cid title
1
$# ssid msid sstyp mstyp sboxid mboxid spr mpr
1 2 3 3 3 0 0 0.000 0.000
$# fs fd dc vc vdc penchk bt dt
0.150000 0.150000 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0 0.000 0.000
$# sfs sfm sst mst sfst sfmt fsf vsf
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
0.000E+00 0.000E+00
$# soft sofscl lcidab maxpar sbopt depth bsort frcfreq
0 0.000E+00 0 0.000E+00 0 0.000E+00 0 0
$# penmax thkopt shlthk snlog isym i2d3d sldthk sldstf
0.000E+00 0 0 0 0 0 0 0.000E+00

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TITLE
Composite-Steel Interface
$# cid title
2
$# ssid msid sstyp mstyp sboxid mboxid spr mpr
2 3 3 3 3 0 0 0.000 0.000
$# fs fd dc vc vdc penchk bt dt
0.150000 0.150000 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0 0.000 0.000
$# sfs sfm sst mst sfst sfmt fsf vsf
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
0.000E+00 0.000E+00
$# soft sofscl lcidab maxpar sbopt depth bsort frcfreq
0 0.000E+00 0 0.000E+00 0 0.000E+00 0 0
$# penmax thkopt shlthk snlog isym i2d3d sldthk sldstf
0.000E+00 0 0 0 0 0 0 0.000E+00
```

**Рис. 1. Код LS-DYNA для состояния материала стальных слоев (слева)
и контактных взаимодействий (справа)**

Количественной мерой эффективности системы служит коэффициент гашения K , определяемый как отношение импульса, переданного защищаемому объекту (слою 3), к импульсу падающей волны:

$$K = \int_0^{t_{end}} \sigma_{x,3}(L_1 + L_2, t) dt \Big/ \int_0^{t_0} p_{inc}(t) dt.$$

Здесь t_0 – длительность падающего импульса; t_{end} – время окончания моделирования.

4. Механизмы диссипации энергии. Модель учитывает комплекс механизмов гашения ударной волны в трёхслойной системе:

1) импедансное рассогласование: многократное отражение и преломление волны на границах слоёв с различными волновыми сопротивлениями $Z = \rho D$;

2) вязкая диссипация: необратимое преобразование энергии в тепло за счёт течения жидкости относительно матрицы (слагаемое Дарси $\propto (u_{fl} - u_{sol})^2$);

3) работа по закрытию пор: затраты энергии на объёмное сжатие жидкой фазы в уменьшающихся порах;

4) пластическая и вязкоупругая диссипация в материале полиэтиленовой матрицы и стальных слоях.

```

*MAT_SOIL_AND_FOAM_TITLE
Composite Layer: Porous Polyethylene + Oligomer
$# mid ro k nd pr damp soil depth
2 1.200 0.000E+00 0 0.400000 0.050000 0 0
$# a0 a1 a2 v0 pc pt p0
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
0.000E+00
$# ityp ig ie ic icf ier dens
0 0 0 0 0 0 0

*DEFINE_TABLE_TITLE
Porous Composite Pressure-Volume Strain Curve
$# tid1
1001
$# a1 o1
0.0000000000E+00 0.0000000000E+00
-5.0000000000E-03 5.0000000000E+07
-1.0000000000E-02 1.0000000000E+08
-1.5000000000E-02 1.5000000000E+08
-2.0000000000E-02 2.0000000000E+08
-3.0000000000E-02 2.5000000000E+08
-4.0000000000E-02 3.0000000000E+08
-5.0000000000E-02 3.5000000000E+08
-1.0000000000E-01 4.0000000000E+08

*MAT_VISCOELASTIC_SPRING_DAMPER_TITLE
Fluid Phase in Pores (Oligomer)
$# mid ro k nd pr damp soil depth
3 0.900 2.000E+09 0 0.499000 0.100000 0 0
$# a0 a1 a2 v0 pc pt p0
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
0.000E+00
$# ityp ig ie ic icf ier dens
0 0 0 0 0 0 0

*MAT_COMPOSITE_MIXTURE_TITLE
Two-Phase Composite Model
$# mid ro k nd pr damp soil depth
4 1.200 0.000E+00 0 0.400000 0.100000 0 0
$# nphm nphm nphm nphm nphm nphm flagmf flagms
2 0 0 0 0 0 0 0
$# phi1 phi2 phi3 phi4 phi5 phi6 phi7 phi8
0.700000 0.300000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000
$# imp1 imp2 imp3 imp4 imp5 imp6 imp7 imp8
2 3 0 0 0 0 0 0
$# rho1 rho2 rho3 rho4 rho5 rho6 rho7 rho8
0.950000 0.900000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000

*EOS_TABULATED_COMPACTON_TITLE
Compaction Behavior of Porous Composite
$# eosid g c s1 s2 s3 a0 e0
2 2.000000 2.000E+03 1.350000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000
$# v0
1.000000
$# lcid p0 ec vc alpha
1001 0.000E+00 0.000E+00 0.700000 0.000E+00
    
```

Рис. 2. Код LS-DYNA для состояния материала слоя 2

5. Алгоритмы численного решения. Для численного решения представленной системы уравнений, учитывающей нелинейные ударные процессы в металлах и сложное двухфазное взаимодействие в пористом композите, наиболее предпочтительным является подход на основе методов конечных разностей (МКР) со схемами повышенной точности [8]. В частности, для расчёта распространения ударных волн в стальных слоях (1 и 3) эффективно применение схем типа Годунова, основанных на решении задачи Римана на межъячеечных границах. Данные схемы, такие как TVD (*Total Variation Diminishing*) или WENO (*Weighted Essentially Non-Oscillatory*), обеспечивают монотонность решения без нефизических осцилляций в окрестностях резких фронтов. Для моделирования пластического течения и учёта девиаторных напряжений используется метод расщепления по физическим процессам: на гидродинамическом шаге вычисляются давление и скорость, а затем на шаге коррекции определяются пластические деформации и напряжения согласно модели Джонсона-Кука. Это позволяет корректно описать как волновые, так и диссипативные эффекты в металлах.

```
*LOAD_SEGMENT_SET_TITLE
Shock Wave Pressure - Exponential Decay
$# ssid lcid sf at n1 n2 n3 n4
1 1001 1.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
$# ssid lcid sf at n1 n2 n3 n4
1 1001 1.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
2 1001 1.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
3 1001 1.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
4 1001 1.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000

*DEFINE_CURVE_TITLE
Exponential Shock Wave Pressure
$# lcid sidr sfa sfo offa offo dattyp lcint
1001 0 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0 0
$# a1 o1
0.0000000000E+00 0.0000000000E+00
1.0000000000E-06 1.0000000000E+08
2.0000000000E-06 3.6787944117E+07
5.0000000000E-06 6.7379469991E+06
1.0000000000E-05 4.5399929762E+05
2.0000000000E-05 2.0611536224E+04
5.0000000000E-05 1.2340980409E+01
1.0000000000E-04 1.5229979745E-02

*DEFINE_FUNCTION_TITLE
Pressure Distribution Over Surface
$# fid title
1002
$# function
P(x,y,t) = P0 * exp(-t/theta) * exp(-((x-x0)^2+(y-y0)^2)/(2*sigma^2))
$# C1 C2 C3 C4 C5 C6 C7 C8
1.000E+08 1.000E-06 0.000E+00 0.000E+00 5.000E-03 0.000E+00
0.000E+00 0.000E+00
```

Рис. 3. Код LS-DYNA для пространственно-временного распределения ударной нагрузки

Решение уравнений для двухфазного композитного слоя (2) требует комбинации методов. Уравнения сохранения для каждой фазы удобно дискретизировать с помощью неявной или полунеявной конечно-разностной схемы из-за наличия жёсткого члена межфазного взаимодействия, пропорционального разности скоростей $u_{fl} - u_{sol}$. Это обеспечивает устойчивость расчёта при любых значениях проницаемости k и вязкости μ_{fl} . Динамическое изменение пористости φ отслеживается методом конвективного переноса. Для корректного согласования решений на границах раздела слоёв применяется метод виртуальных ячеек или специальные граничные условия Римана, обеспечивающие выполнение условий непрерывности скорости и напряжения. Валидация и калибровка полной модели проводятся путём сравнения с решениями упрощённых задач, полученными методом характеристик, который, хотя и неприменим для всей системы из-за нелинейности и многокомпонентности, остаётся незаменимым инструментом для анализа локальных волновых процессов и проверки граничных условий.

На рис. 1-3 представлен демонстрационный код LS-DYNA для приближенных инженерных оценок, для экономии места приведенный отдельными блоками. Код включает блоки для состояния стальных слоев 1 и 3, слоя 2, контактных взаимодействий, пространственно-временного распределения ударной нагрузки. Для более точных оценок для течения жидкости относительно матрицы с полностью раздельным рассмотрением состояния фаз без гомогенизирующих приближений возможны реализация пользовательского материала (UMAT) с полными уравнениями двухфазной среды, использование комбинированного *ALE-Lagrangian* подхода с явным моделированием фаз или переход на специализированный код для пористых сред (например, GEODYN, CTH, или реализуемый в LS-DYNA через пользовательские FORTRAN-подпрограммы).

Список литературы

1. Gurtin M.E., Fried E., Anand L. The Mechanics and Thermodynamics of Continua. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 718 p.
2. Johnson G.R., Cook. W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, 19-21 April 1983. P. 541-547.

3. Ogden R.W. Non-Linear Elastic Deformations. Mineola, New-York: Dover Publications, 1997. 532 p.
4. Shishulin A.V., Fedoseev V.B. Thermal stability and phase composition of stratifying polymer solutions in small-volume droplets. J. Eng. Phys. Thermophys. 2020. V. 93. I. 4. P. 802-809.
5. Shishulin A.V., Shishulina A.V. One more parameter determining the stratification of solutions in small-volume droplets. J. Eng. Phys. Thermophys. 2022. V. 95. I. 6. P. 1374-1382.
6. Allen M.B., Behie G.A., Trangenstein J.A. Multiphase Flow in Porous Media. New-York: Springer, 1988. 306 p.
7. Shishulin A.V., Fedoseev V.B. On some peculiarities of stratification of liquid solutions within pores of fractal shape. J. Mol. Liq. 2019. V. 278. P.363-367.
8. Drikakis D., Rider W. High-Resolution Methods for Incompressible and Low-Speed Flows. Heidelberg: Springer Berlin, 2005. 622 p.

© Шишулин А.В., Янишевский Л.С.,
Стовпыра Т.Г., Васильева А.М., 2026