

В.Ф.Куропатенко

***Модели механики сплошной
среды и их применение для
разработки ядерного оружия и
ядерных устройств мирного
назначения***

Основные научные результаты

апрель 2008 г.

1. Основная задача

Целью всех проводимых автором работ было создание системы моделей и методов для обеспечения высокой точности моделирования динамических процессов в ядерных зарядах и устройствах, применяемых в мирных целях.

Специфика работ определялась тремя факторами:

- 1. Невозможностью провести натурные испытания ядерного заряда в лабораторных условиях.**
- 2. Хроническим отставанием отечественной вычислительной техники по основным параметрам от ЭВМ США.**
- 3. Необходимостью создания конструкций ядерного оружия, не уступающих по своим характеристикам создаваемым в США.**

2. Физические процессы

Задача надежного прогнозирования конечных характеристик ядерного заряда приводит к необходимости максимально полно и точно учитывать все процессы, происходящие при его «работе»:

- Ударные и детонационные волны;
- Тепловые и радиационные нагрузки;
- Упругие и пластические деформации и разрушение первоначально твердых тел;
- Полиморфные фазовые переходы, плавление, испарение, ионизацию;
- Перемешивание.

Контактные границы, разделяющие разные вещества, в области неустойчивости разрушаются и появляется область смеси – *многокомпонентная среда*.

Сплавы и конструкционные материалы с легирующими добавками изначально являются многокомпонентной средой.

3. Модели физических процессов

Все перечисленные выше процессы непрерывно переходят друг в друга и описываются уравнениями механики сплошной среды (МСС) – системой законов сохранения

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \bar{\mathbf{U}} = 0, \quad \rho \frac{\partial \bar{\mathbf{U}}}{\partial t} + \operatorname{grad} P - \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \bar{\mathbf{S}}_i}{\partial x_i} - \bar{\mathbf{F}} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \operatorname{div} ((\rho \varepsilon + P) \bar{\mathbf{U}} - \bar{\mathbf{q}}) - \sum_{i,k=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} (\mathbf{S}_{ik} \mathbf{U}_{ik}) - \bar{\mathbf{Q}} = 0. \quad (2)$$

Уравнения (1), (2) являются общими для любых веществ, рассматриваемых, как сплошная среда.

Конкретный вид функций \mathbf{S} , $\bar{\mathbf{q}}$, $\bar{\mathbf{F}}$, $\bar{\mathbf{Q}}$, характеризующих девиатор тензора напряжений, тепловые потоки, взаимодействие вещества с гравитационным, электромагнитным и др. полями, энерговыделение при химических реакциях и при воздействии проникающих излучений, приводит к появлению частных моделей.

4. Направления работ

Для достижения поставленной цели работы велись по следующим направлениям:

- создание моделей динамических процессов в сплошных средах,
- создание уравнений состояния веществ,
- создание методов расчета ударных волн, волн разрежения, поверхностей фазовых переходов и разрушения,
- построение аналитических решений.

5. Требования к моделированию свойств материалов

При “работе” ядерного заряда давление P , температура T и плотность ρ изменяются в широких пределах

$$0 \leq P \leq 10^2 \text{ ТПа}, \quad 0 < T < 10^3 \text{ КК}, \quad 0 < \rho/\rho_{\text{ок}} < 15 \div 20.$$

В этой области точность уравнений, описывающих свойства веществ, д.б. одинаково высокой.

Уравнение состояния (УРС) $P(\rho_i T)$, $E(\rho_i T)$, $S(\rho_i T)$ и др. должно быть широкодиапазонным, т.е. описывать свойства веществ во всех указанных выше фазовых состояниях и переходы из одной фазы в другую.

Для описания неравновесности фазовых переходов к уравнениям МСС и УРС добавляются кинетические уравнения.

Определяющие уравнения для упругости, пластичности и вязкости связывают компоненты девиатора тензора напряжений с соответствующими деформациями или скоростями их изменения.

6. Основные результаты

В результате проведенных работ созданы:

- метод расчета ударных волн, основанный на оригинальном механизме диссипации энергии
- неоднородный метод расчета нестационарных движений сплошных сред с ударными волнами, волнами разрежения, контактными разрывами и фазовыми переходами, в котором выделяются все разрывы. Метод не имеет мировых аналогов,
- уравнения состояния металлов и горных пород
- уравнения состояния продуктов взрыва плотных ВВ
- модель динамической прочности и откольного разрушения
- модель многокомпонентной многоскоростной неравновесной среды
- аналитические решения для контроля точности созданных методов и моделей.

7. Однородный метод расчета ударных волн

В однородных методах каждый сильный разрыв заменяется непрерывным течением в слое конечной ширины (дистракция). В этом слое растет энтропия.

Известно 4 принципиально разных механизма диссипации энергии.

Год первой публикации	Авторы метода расчета	Страна	Механизм диссипации энергии
1950 г.	Д.Нейман, Р.Рихтмайер [1]	США	псевдовязкость
1954 г.	П.Лакс [2]	США	аппроксимационная вязкость
1959 г.	С.К.Годунов [3]	СССР	распад произв. разрыва
1960 г.	В.Ф.Куропатенко [4]	СССР	уравнения Гюгонио

1. Neumann J., Richtmayer R. A method for the numerical calculation of hydrodynamical shocks // J. Appl. Phys. –1950. – V.21, №3 – pp.232-237.
2. Lax P.D. Weak solution of nonlinear hyperbolic equations and their numerical computations //Conn. Pure and Appl. Math. – 1954. – V.7 – pp.159-193.
3. Годунов С.К. Разностный метод счета разрывных решений уравнений газодинамики //Матем. сб. –1959. –№47(89), вып.3. – С. 271-306.
4. Куропатенко В.Ф. Метод расчета ударных волн //ДАН СССР.– 1960. – В.3, №4. – С. 771-772.

По совокупности свойств метод № 4 (разработанный автором) превосходит остальные.

8. Неоднородный метод

В 1965г. автором был создан и много лет совершенствовался **неоднородный метод расчета нестационарных движений сплошных сред**, в котором выделяются все существенные разрывы. Его применение устранило образование энтропийных следов возле контактных границ и в зонах взаимодействия ударных волн и резко повысило точность расчетов в целом.

Для расчета ударных волн к законам сохранения на разрыве

$$P_1 - P_0 - W(U_1 - U_0) = 0, \quad U_1 - U_0 - W(V_1 - V_0) = 0, \quad (4)$$

$$P_1 U_1 - P_0 U_0 - W(E_1 - E_0) - 0,5W(U_1^2 - U_0^2) = 0 \quad (5)$$

добавляется уравнение вдоль поверхности разрыва

$$\frac{dP_1}{dt} + \frac{a_1^2}{W} \frac{dU_1}{dt} + \frac{a_1^2 - W}{W} \frac{\partial P_1}{\partial m} + \frac{(\alpha - 1)U_1 V_1 a_1^2}{r} = 0,$$

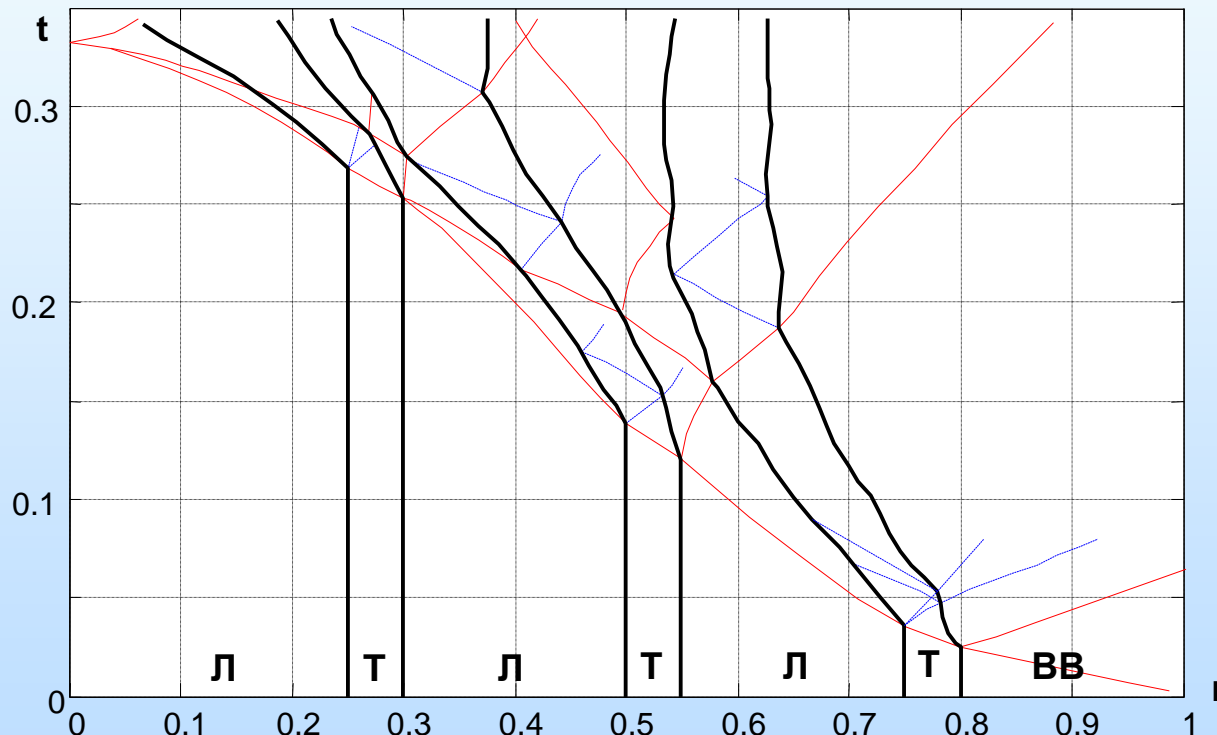
где $\alpha = 1, 2, 3$ – тип симметрии течения.

Это уравнение аппроксимируется разностным уравнением.

9. Неоднородный метод

При возникновении произвольных разрывов рассчитывается их распад.

При расчете слабых разрывов применяются условия на слабых разрывах.



Картина сильных, слабых и контактных разрывов в переменных r , t в сферической многооболочечной конструкции после взрыва наружного слоя ВВ.

10. Уравнение состояния. Холодная энергия.

Удельная внутренняя энергия имеет вид

$$E = E_x(V) + E_T(V, T),$$

где V – удельный объем, T – температура.

$$E_x = E_{\Pi}(V) + E_{\text{НК}}(V) + E_{0e}(V).$$

E_{Π} – энергия потенциального взаимодействия атомов,

$E_{\text{НК}}$ – энергия нулевых колебаний атомов,

E_{0e} – энергия вырожденных электронов.

В отличие от остальных УРС E_{Π} содержит $x_* = V_*/V_{0K} < 1$.

$$E_{\Pi} = \frac{Q_c}{m-n} (n(x_*^m x^{-m} - 1) - m(x_*^n x^{-n} - 1)), \quad \text{где } x = V/V_{0K}$$

Поскольку $E_{\text{НК}}(V_{0K}) > 0$, $E_{0e}(V_{0K}) > 0$, $E_{\Pi}(x_*) = 0$,

то $E_{\Pi}(V_{0K}) = \frac{Q_c}{m-n} (n(x_*^m - 1) - m(x_*^{-n} - 1)) > 0$.

11. Уравнение состояния. Тепловая энергия.

Удельная тепловая энергия

$$E_T(V, T) = E_a(V, T) + E_e(V, T) + E_{\text{изл}}(V, T).$$

Для составляющих $E_T(V, T)$ приняты выражения

$$E_a = \frac{AT^n}{(\theta(V) + T)^{n-1}}, \quad E_e = f(V)T^2 \frac{d\Omega(T)}{dT}, \quad E_{\text{изл}} = \frac{4\sigma T^4}{\rho C}.$$

Оригинальное выражение $E_a(V, T)$ соответствует теплоемкости

$$C_V = \frac{AT^{n-1}(n\theta(V) + T)}{(\theta(V) + T)^n}.$$

Она очень близка к теплоемкости Дебая.

Функции $\theta(V)$, $f(V)$, $\Omega(T)$ подбираются из условий наилучшего описания экспериментальных данных по ударному сжатию, тепловому расширению $V(T)$ и зависимости $C_p(T)$ при $P=10^{-4}$ ГПа .

12. Фазовые переходы

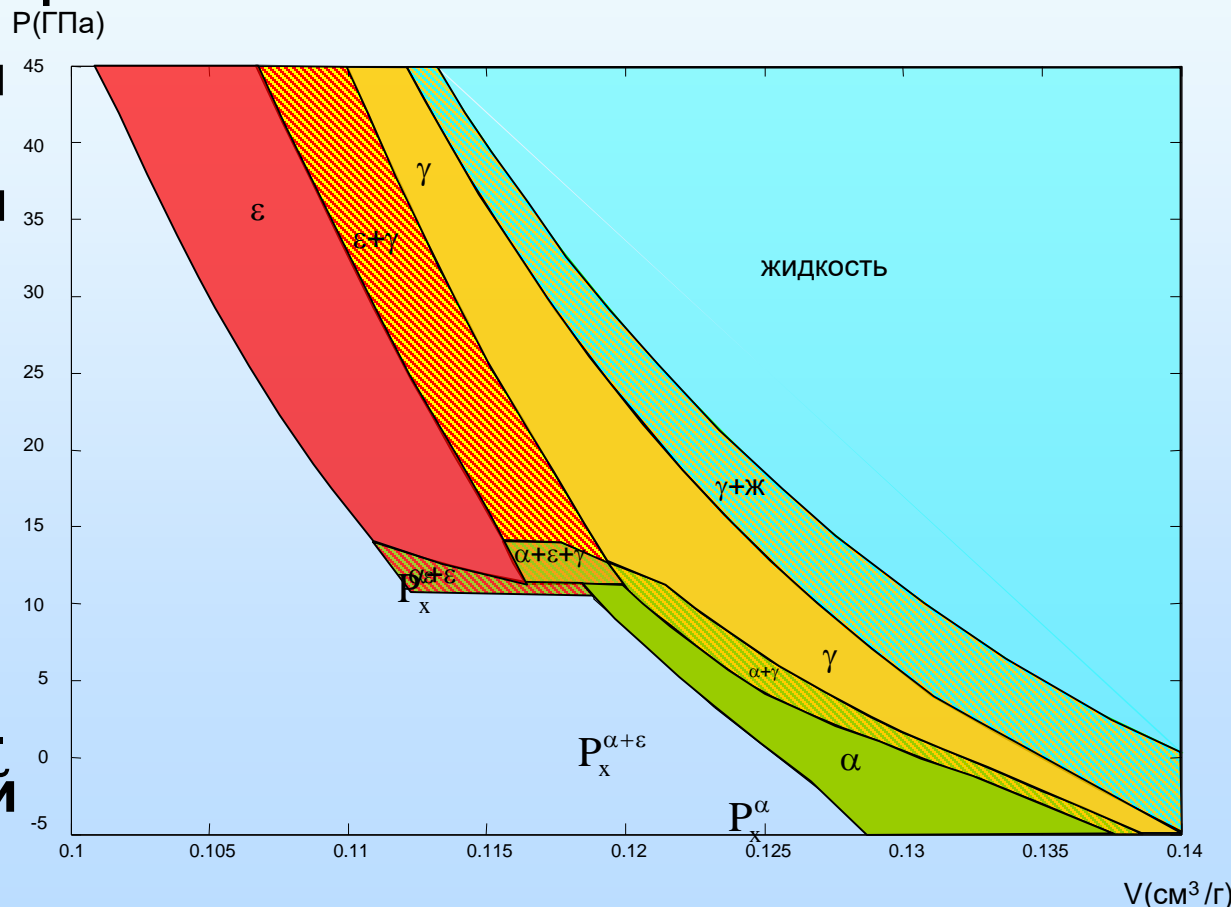
Созданные нами УРС-ы моделируют в равновесном приближении следующие фазовые переходы: полиморфные переходы, плавление, диссоциацию, ионизацию, испарение.

Условия равновесия фаз:

непрерывность P , T и термодинамического потенциала $H = E + PV - TS$.

Границы между фазами:

- в переменных P , T – линии,
- в переменных P , V – области равновесной смеси фаз.



Пример: фазовая диаграмма железа в переменных P , V .

13. УРС продуктов детонации ВВ

УРС ПД имеет вид $P = (\gamma(\rho) - 1)\rho E + J(\rho)$.

Для определения $\gamma(\rho)$ и $J(\rho)$ предложен принципиально новый метод. $D_{ж}(\rho_0)$, $U_{ж}(\rho_0)$, $Q(\rho_0)$ измеряются экспериментально. По ним строится уравнение линии точек Жуге. Затем $\gamma(\rho_0)$ и $J(\rho_0)$ выражаются через $D_{ж}(\rho_0)$, $U_{ж}(\rho_0)$, $Q(\rho_0)$.

После перехода к безразмерным величинам $\gamma(\rho)$ и $J(\rho)$ аппроксимируются более простыми зависимостями

$$\text{при } x > 1 \quad \gamma = \gamma_{\infty}, \quad J = \rho_{0к} D_k^2 A(x - 1)^m,$$

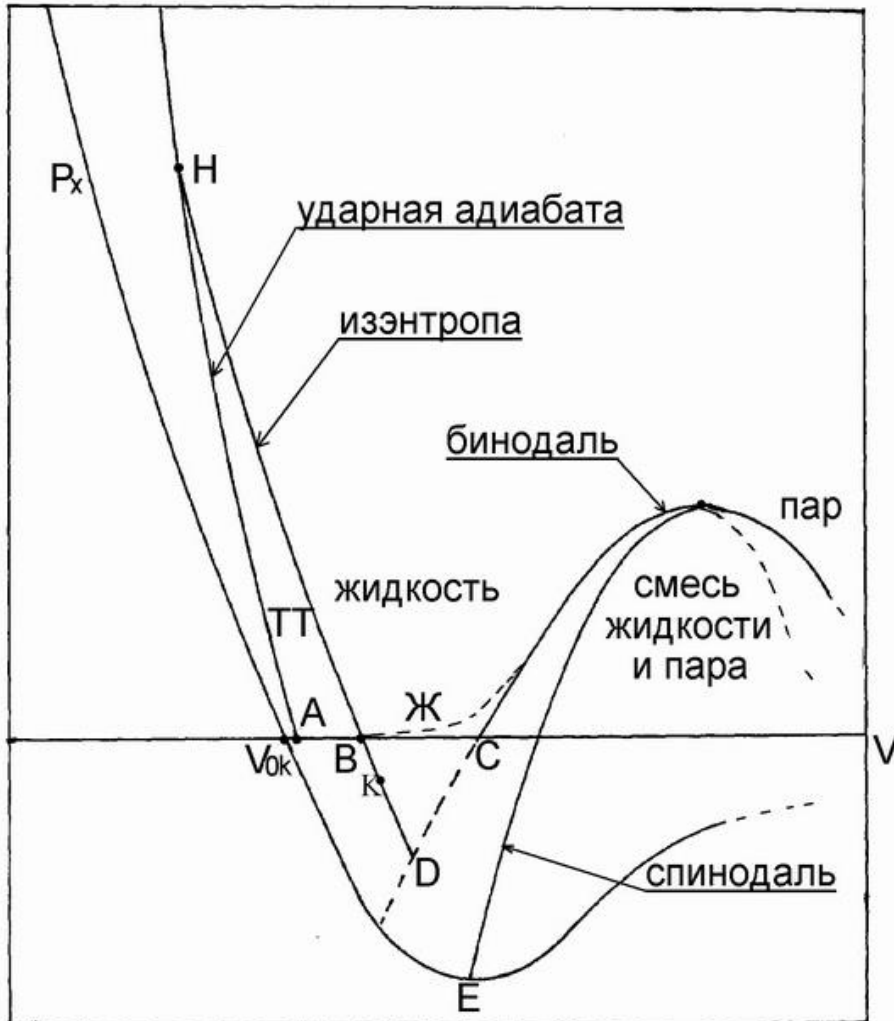
$$\text{при } x \leq 1 \quad \gamma = \gamma_0 + (\gamma_{\infty} - \gamma_0)x(3 - 3x + x^2), \quad J = 0,$$

где $x = \rho / \rho_{0к} \delta_*$. Каждое ВВ характеризуется двумя величинами $\rho_{0к}$ и D_k . Параметры УРС ПД определены для основных ВВ: тротил, тетрил, ТГ50/50, тэн, гексоген, октоген.

Это УРС является много лет основным при моделировании поведения конструкций ядерных зарядов.

14. Модель откольного разрушения

В области отрицательных давлений ($P < 0$) вещество метастабильно. С течением времени в нем растет объемная концентрация микродефектов (α). Скорость роста α зависит от P , α и от расстояния до границы устойчивости.



Когда α достигает критического значения α_k , микропоры и микротрещины сливаются в макротрещину и происходит фрагментация вещества (откол). Связь между α_k и давлением, при котором происходит разрушение вещества, зависит от скорости

разгрузки $\frac{dP}{dt}$. При $\frac{dP}{dt} = -\infty$

разрушение происходит на линии устойчивости, при

малых $\frac{dP}{dt}$ (статическая

разгрузка) значения P_k близки к пределу упругости.

15. Аналитические решения

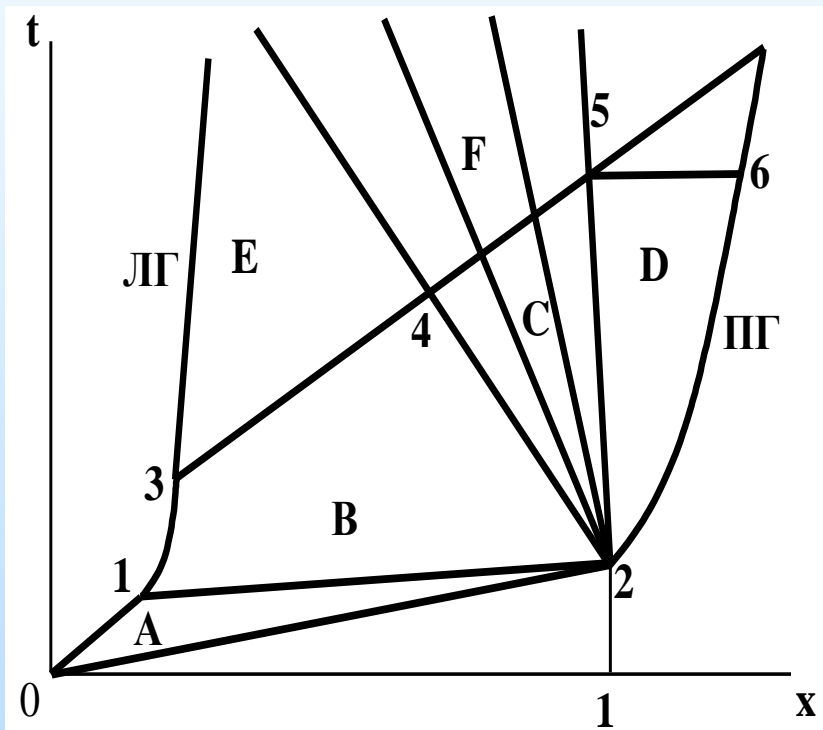
Все аналитические решения строились для контроля точности применяемых методов расчета. Их можно разделить на группы:

- сходящиеся к центру симметрии оболочки из сжимаемого конденсированного вещества,
- захлопывание сферически симметричных полостей в сжимаемом конденсированном веществе,
- взаимодействие волн разрежения, образованных при мгновенном прогреве конденсированного сжимаемого вещества, приводящее к откольному разрушению,
- выход ударной волны на свободную поверхность конденсированного сжимаемого вещества и движение свободной поверхности.

16. Аналитическое решение

Выход УВ на свободную поверхность металла

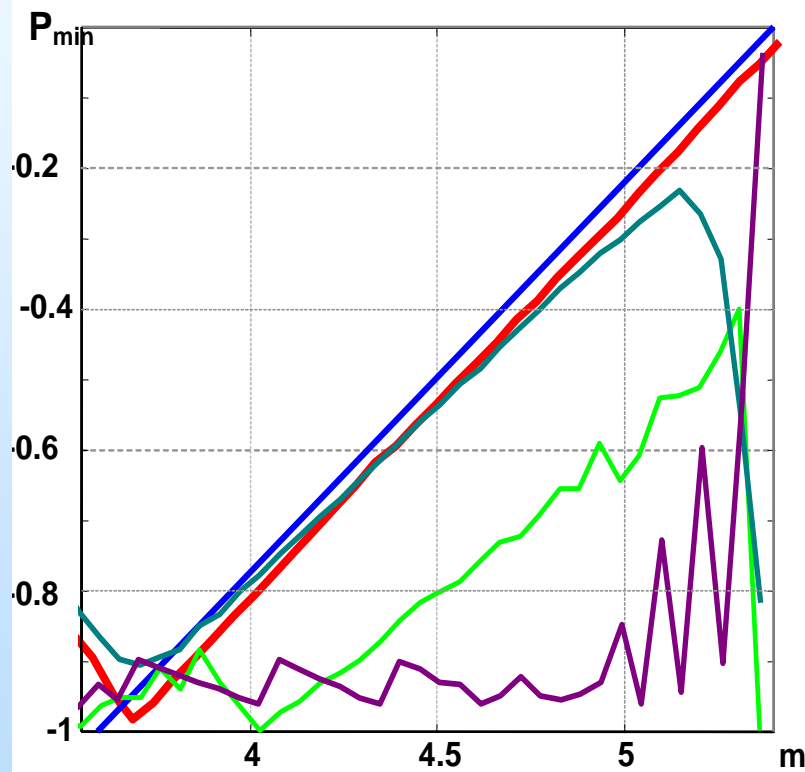
На рис.1 приведены траектории разрывов в задаче о выходе УВ на свободную поверхность 1,2. Откольное разрушение происходит в одной точке 5, где $P=P_{кр}$. На рис. 2 изображена зависимость P на характеристике 2,5 от лагранжевой координаты.



Уравнение состояния:

$$P = (\gamma - 1)\rho E + C_{0k}^2 (\rho - \rho_{0k}),$$

при $\gamma=3$, $\rho_{0k}=1$, $C_{0k}=1$.



- аналитика, — расчет по новой РС,
- расчет по РС Годунова,
- расчет по РС Неймана-Рихтмайера,
- расчет по РС Лакса-Вендрофа.

17. Модель многокомпонентной среды (МКС)

Модель основана на гипотезе многоскоростных взаимодействующих континуумов. Каждый i -й компонент имеет физические P_i , ρ_i , E_i , \bar{U}_i , T_i , S_i и парциальные $\alpha_i P_i$, $\alpha_i \rho_i$, $\eta_i E_i$, $\eta_i \bar{U}_i$ характеристики. Они непрерывны в объеме смеси. Для i -го компонента законы сохранения имеют вид

$$\frac{\partial \alpha_i \rho_i}{\partial t} + \nabla \alpha_i \rho_i \bar{U}_i = 0, \quad (17.1)$$

$$\frac{\partial \alpha_i \rho_i \bar{U}_i}{\partial t} + \nabla \alpha_i P_i + \sum_{k=1}^3 \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_k} (\alpha_i \rho_i \bar{U}_i \mathbf{U}_{ki} + \alpha_i \bar{\mathbf{F}}_{ki}) - \alpha_i \bar{\mathbf{R}}_i = 0, \quad (17.2)$$

$$\frac{\partial \alpha_i \rho_i \varepsilon_i}{\partial t} + \nabla (\alpha_i \bar{U}_i (P_i + \rho_i \varepsilon_i) + \alpha_i \bar{\mathbf{Q}}_i) + \sum_{k=1}^3 \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_k} (\alpha_i \bar{\mathbf{F}}_{ki} \bar{U}_i) - \alpha_i \hat{\mathbf{O}}_i = 0. \quad (17.3)$$

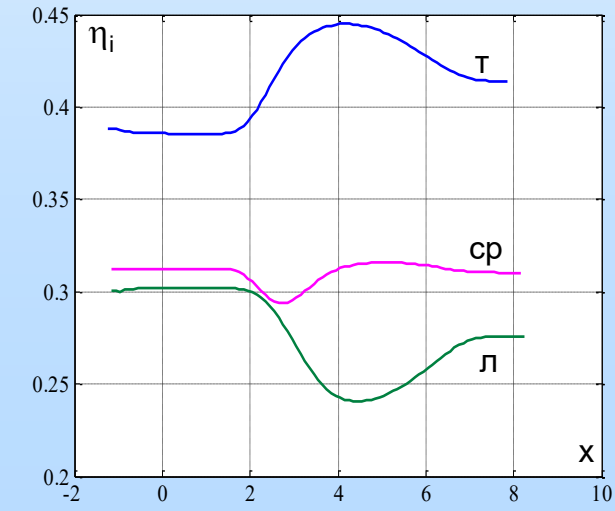
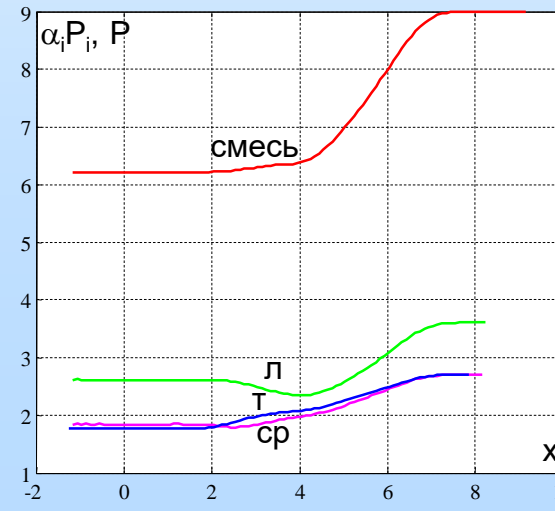
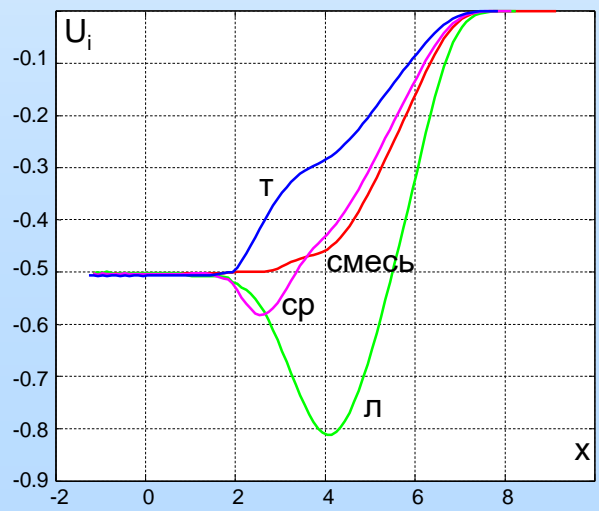
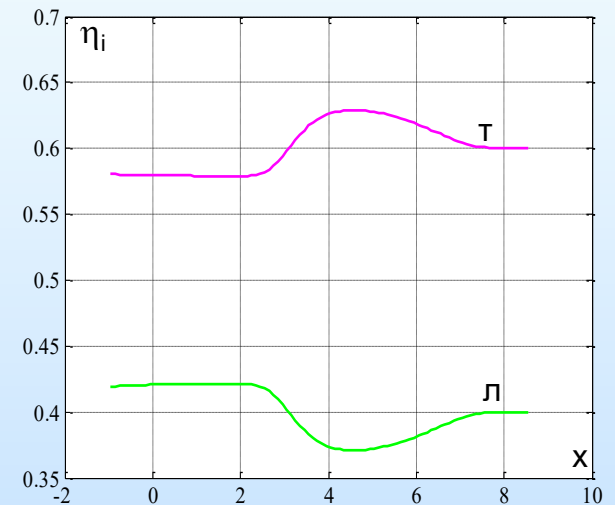
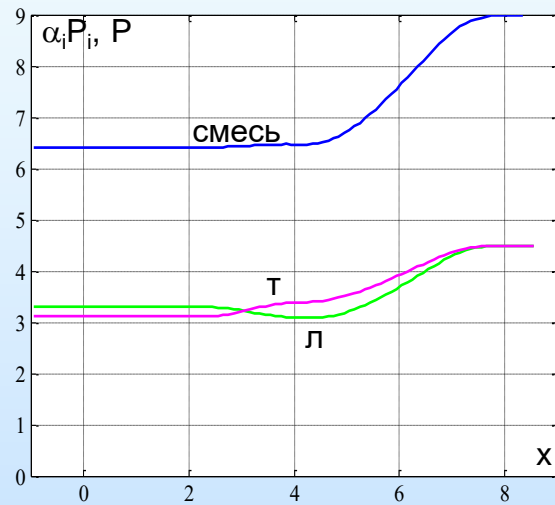
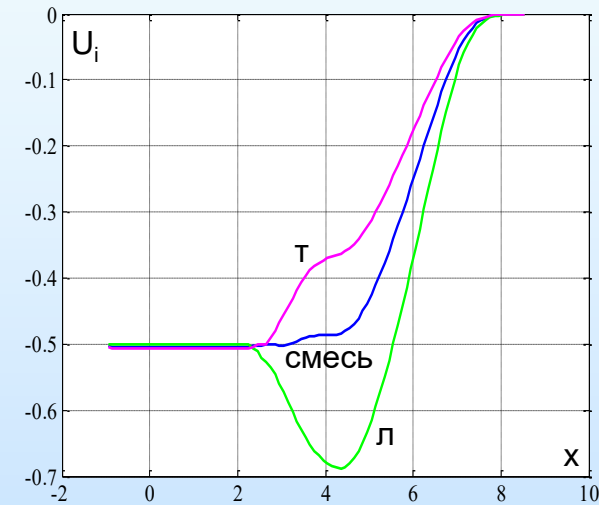
К (17.1)-(17.3) добавляется УРС $P_i = P_i(\rho_i, E_i)$, $T_i = T_i(\rho_i, E_i)$.

Новый вид взаимодействия компонента со смесью определяют

$$\bar{\mathbf{F}}_{ki} = -0,5 \rho_i (\bar{U}_i - \bar{U})(\mathbf{U}_{ki} - \mathbf{U}_k), \quad \bar{\mathbf{Q}}_i = -0,5 (\bar{U}_i - \bar{U})(P_i + \rho_i E_i).$$

18. Волна разрежения в смеси газов

Проведены расчеты волны разгрузки в смеси идеальных газов. Задача 1 – два газа ($\alpha_{01}=\alpha_{02}$), задача 2 – три газа ($\alpha_{01}=\alpha_{02}=\alpha_{03}$). При $t > 0$ $U_{лг} = -0,5$. $\rho_{01}:\rho_{02}:\rho_{03}$ как аргон, криптон, ксенон.



19. Заключение

1. Создана система моделей однородных и многокомпонентных сплошных сред с целью описать поведение материалов и конструкций под действием динамических нагрузок.

2. Созданы методы расчета неустановившихся движений сплошных сред, обеспечившие на протяжении многих лет высокую точность моделирования процессов в ядерных зарядах, в грунтах при подземных взрывах, поведение головных частей ракет под действием проникающих излучений.

3. Созданы уравнения состояния продуктов детонации плотных ВВ, металлов, горных пород и композиционных материалов.

4. Все созданные модели, уравнения состояния и методы расчета широко применяются для разработки и совершенствования оборонной техники.

Высокая прогнозируемость результатов натуральных испытаний позволила сократить их количество.

Высокая точность моделей является основой совершенствования ядерного оружия без натуральных испытаний.

**Спасибо
за
внимание!**

Основные публикации по методам расчета УВ

1. Куропатенко В.Ф. Метод расчета ударных волн // ДАН СССР. – 1960. – В.3, № 4. – с.771-772.
2. Куропатенко В.Ф. Метод построения разностных схем для численного интегрирования уравнений газодинамики // Изв. ВУЗов. Сер. Математика. – 1962. – № 3(28). – С. 75-83.
3. Куропатенко В.Ф. Об одном разностном методе расчета ударных волн // ЖВМ и МФ. – 1963. – Т .3, № 1 – С.201-204.
4. Куропатенко В.Ф. О разностных методах для уравнений гидродинамики // Труды матем. инст. им. В.А.Стеклова. – 1966. – Т .74, ч.1. – С.107-137.
5. Куропатенко В.Ф. Об одной форме псевдовязкости // Изв. СО АН СССР, Сер. Технич. – 1967. – № 13, вып.3. – С.81-82.
6. Куропатенко В.Ф. Локальная консервативность разностных схем для уравнений газодинамики // ЖВМ и МФ. – 1985. – Т .25, № 8 – С.1176-1188.
7. Куропатенко В.Ф., Коваленко Г.В., Кузнецова В.И. и др. Комплекс программ «Волна» и неоднородный разностный метод для расчета неустановившихся движений сжимаемых сплошных сред // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Мат. моделирование физ. процессов. – 1989. – Вып. 2. – С.9-25.
8. Куропатенко В.Ф. Методы расчета ударных волн // Дальневосточный математический журнал. – 2001. – Т .2, № 2 – С.45-59.
9. Kuropatenko V.F. Method of Shock wave Calculation // Computational Science and High Perfomance Computing. Springer-Verlag. Berlin. – 2005. – P.77-93.
10. Куропатенко В.Ф., Makeeva И.Р. Исследование дистракции разрывов в методах расчета ударных волн // Математическое моделирование. – 2006. – Т .18, № 3 – С.120-128.
11. Куропатенко В.Ф. Методы расчета ударных волн // Энциклопедия низкотемпературной плазмы под ред. В.Е.Фортова. Часть 2. – Москва, Янус-К. – 2008. – Серия Б, Т.7.

Основные публикации по УРС

1. Крупников К.К., Куропатенко В.Ф., Сапожников А.Т. Расчет взрывов в средах с полиморфными фазовыми переходами // ДАН СССР. – 1972. – Т.202, № 2. – С.290-291.

2. Куропатенко В.Ф. Математическое моделирование неустановившихся движений сред с равновесными фазовыми переходами // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методы и программы расчета задач мат. физики. – 1979. – Вып. 4(6). – С.3-12.

3. Аврорин Е.Н., Водолога Б.К., Куропатенко В.Ф. и др. Экспериментальное изучение оболочечных эффектов на ударных адиабатах конденсированных веществ // ЖЭТФ. – 1987. – Т .93, Вып. 2(8) – С.613-626.

4. Куропатенко В.Ф. Уравнения состояния продуктов детонации плотных ВВ // ФГВ. – 1989. – № 6. – С. 112-117.

5. Куропатенко В.Ф. Уравнение состояния в математических моделях механики и физики // Математическое моделирование. – 1992. – Т .4, №12. – С.112-136.

6. Куропатенко В.Ф. Широкодиапазонные уравнения состояния // Сб. Моделирование в механике . – Новосибирск. – 1993. – Т. 7(24), №2. – С.104-123.

7. Куропатенко В.Ф. Моделирование отклика веществ на динамическое воздействие // Хим. Физика. – 2002. – Т .21, № 10 – С.46-54.

8. Куропатенко В.Ф. Уравнения состояния компонентов плотной низкотемпературной плазмы // Энциклопедия низкотемпературной плазмы под ред. В.Е.Фортова. Часть 2. – Москва, Янус-К. – 2008. – Серия Б, Т.7.