



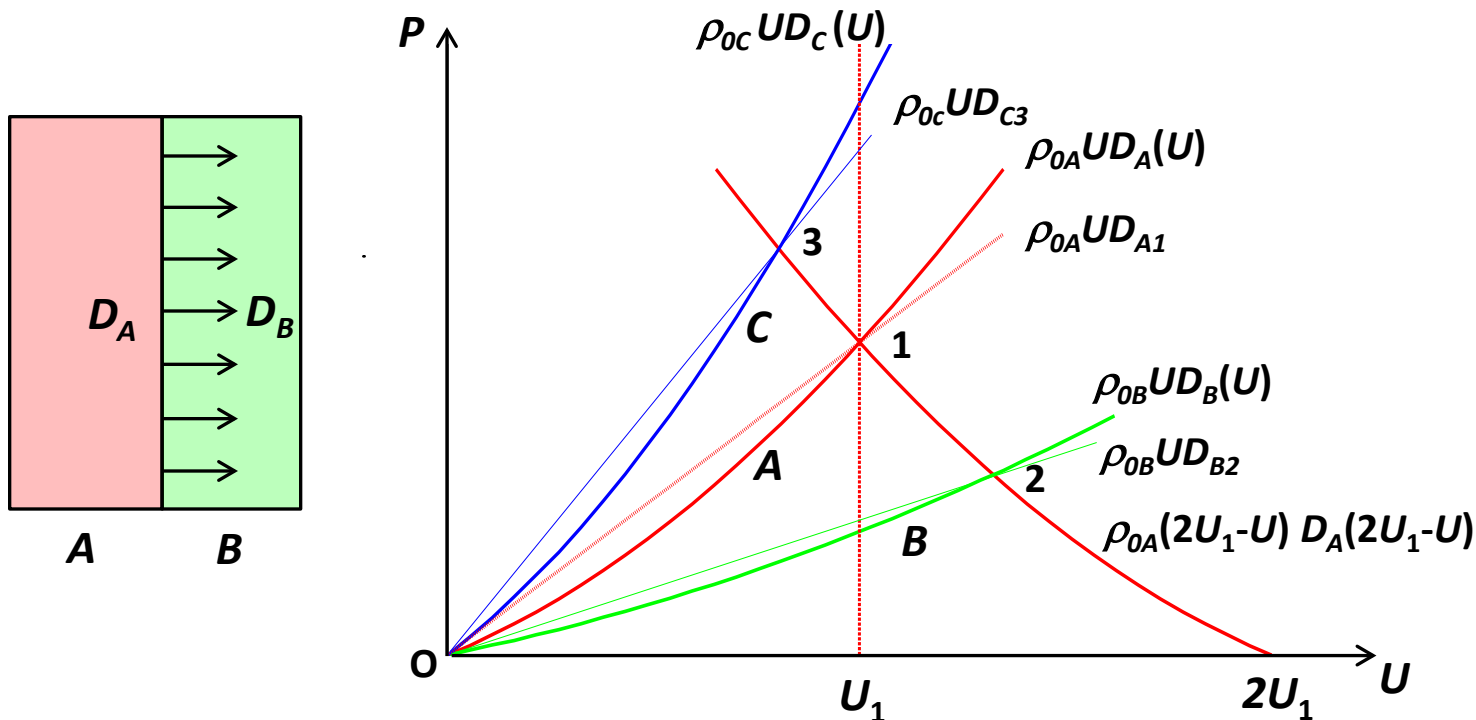
РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

# **Об удвоении массовой скорости при выходе волны на свободную поверхность**

**А.В. Петровцев**

Забабахинские научные чтения,  
г. Снежинск, Челябинской обл.,  
29 мая – 2 июня 2023 года

# Метод отражения



При расчете задачи распада произвольного разрыва часто используется эмпирический закон о близости в  $P-U$  плоскости адиабат разгрузки и адиабат двукратного сжатия к ударной адиабате, отраженной относительно линии  $U=U_1$ , соответствующей по скорости состоянию на фронте проходящей ударной волны. Он соответствует правилу удвоения массовой скорости вещества при выходе ударной волны на свободную поверхность.

# Нарушение «зеркальности»



- Для простых веществ при  $P < 50$  ГПа точность выполнения правила удвоения составляет (1-2)% [1]. При росте амплитуды волны погрешность возрастает вследствие высокого нагрева вещества в сильных ударных волнах. Величина отклонения зависит от свойств вещества.
- Сдвиговая прочность приводит к снижению скорости [2]. В области низких амплитуд волн создаются двухволновые конфигурации. При прохождении через границы веществ происходит взаимодействие прямых и отраженных волн конфигурации, усложняющее анализ расчетных и экспериментальных данных [3]. Для веществ с большой сдвиговой прочностью отклонение от правила удвоения может превышать 5% [4].
- Источником незеркальности и отклонения от правила удвоения скорости могут быть фазовые превращения. Несмотря на обратимость прямых (при ударном нагружении) и обратных (при разгрузке) превращений гистерезис из-за неравновесности превращений может давать большие отличия в скорости.

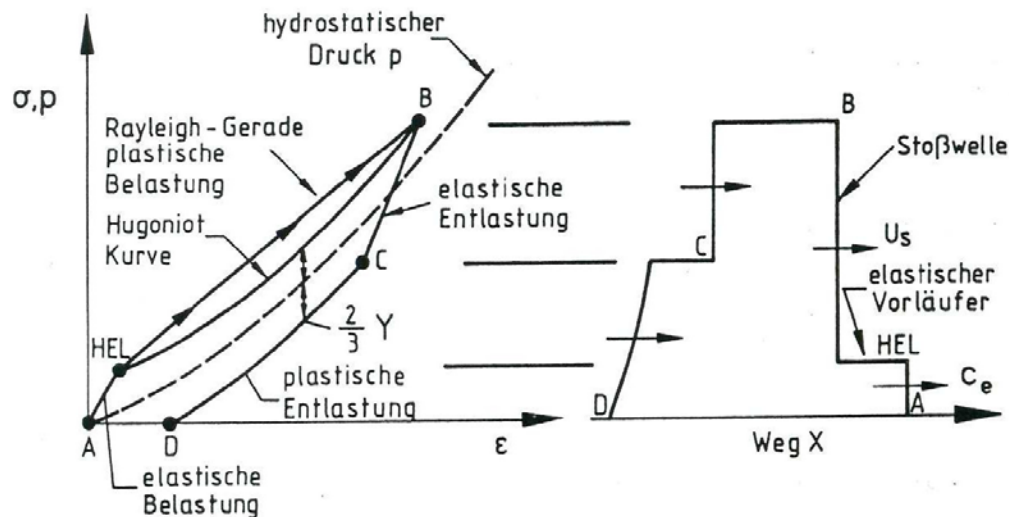
<sup>1</sup> М.В. Жерноклетов. В кн. «Экспериментальные методы и средства в физике экстремальных состояний вещества». М.: РАН, 2021. С.161-205.

<sup>2</sup> G.B. Fowles. J. Appl. Phys. 1961. Vol.32. No. 8. P.1475-1487.

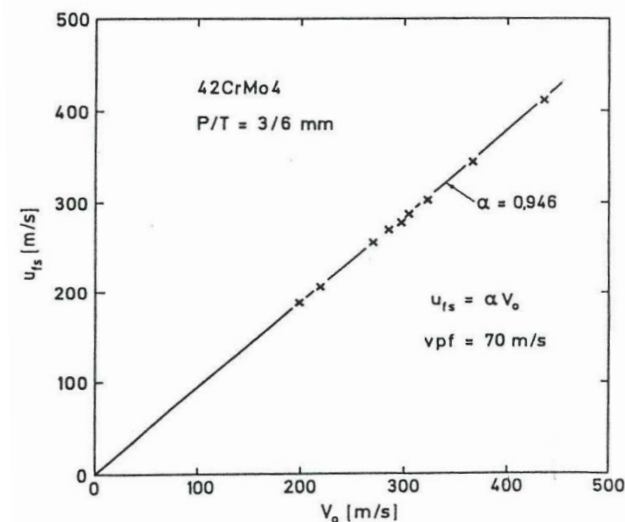
<sup>3</sup> D.E. Grady. In “Metallurg. Appl. of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenom. (EXPLOMET-85)”. Marcel Dekker Inc., New York. 1986. P. 765-780. P.1475-1487.

<sup>4</sup> W. Arnold. Dynamisches Werkstoffverhalten von Armco-Eisen bei Stoßwellenbelastung. Forsch.-Ber. VDI Reihe 5 Nr. 247. Dusseldorf: VDI-Verlag, 1992.

# Влияние сдвиговой прочности



Сталь 42CrMo4: 0.4.%C, 1%Cr, 0.2%Mo, 0.3%Cu

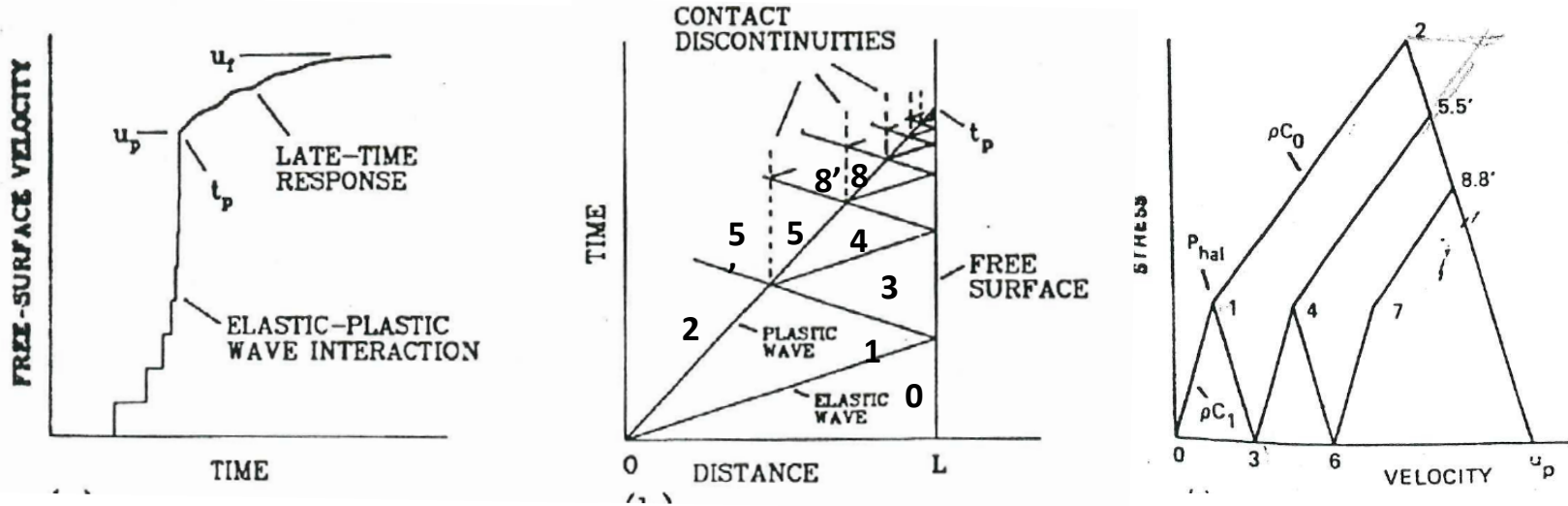


Сдвиговая прочность проявляется на ударных адиабатах и адиабатах разгрузки появлением участков упругой деформации, которые из-за отличия продольной и объемной скоростей звука сильно выделяются. Качественная картина (идеальная УП деформация) [5] показывает, что участок упругой разгрузки превышает участок упругой нагрузки, в результате скорость свободной поверхности в опытах симметричного удара заметно снижается по сравнению со скоростью ударника. В [4] зарегистрировано  $W=1.892U$ .

<sup>2</sup> Fowles G.B. J. Appl. Phys. 1961. Vol.32. No. 8. P.1475-1487.

<sup>4</sup> Arnold W. Dynamisches Werkstoffverhalten von Armco-Eisen bei Stoßwellenbelastung. Forsch.-Ber. VDI Reihe 5 Nr. 247. Dusseldorf: VDI-Verlag, 1992

# Метод определения $U$ по профилям $U_{СП}(t)$



При двухволновой структуре волны необходим учет взаимодействий прямых и отраженных волн. Схема расчетов предложена в [3] при анализе экспериментов с ураном.

$$P_h = P_{hel} + \frac{\rho U_s}{2} \left( u_f - u_e + \frac{C_1 - C_0}{C_1 C_0} \frac{P_{hel}}{\rho} \right), \quad u_p = \left( 1 + \frac{C_0}{C_1} \right) u_h + \frac{C_1 - C_0}{C_1^2} \frac{P_{hel}}{\rho},$$

где

$$u_f = 2u_h - \frac{C_1 - C_0}{C_1 C_0} \frac{P_{hel}}{\rho} = 2u_h - \alpha \cdot 2\Delta u_{el}, \quad 2\Delta u_{hel} = \frac{2P_{hel}}{\rho C_1}.$$

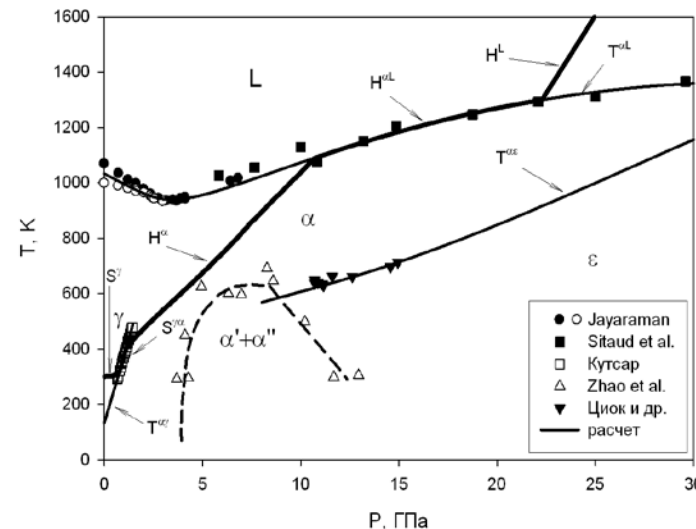
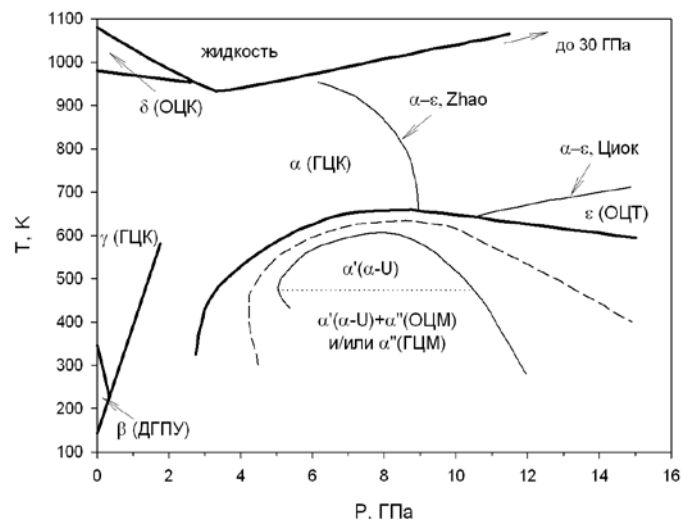
Для урана коэффициент  $\alpha = \frac{C_1 - C_0}{2C_0} \approx 0.2$  и  $u_f = (1.84 - 1.96) u_h$ .

<sup>3</sup> D.E. Grady. In "Metallurg. Appl. of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenom. (EXPLOMET-85)". Marcel Dekker Inc., New York. 1986. P. 765-780. P.1475-1487.

# Фазовые превращения в церии



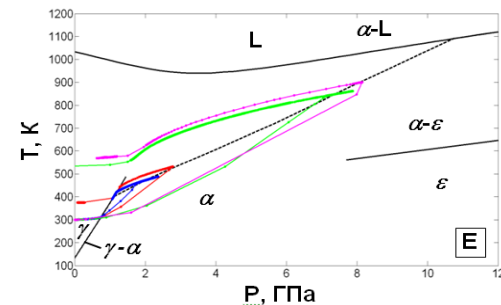
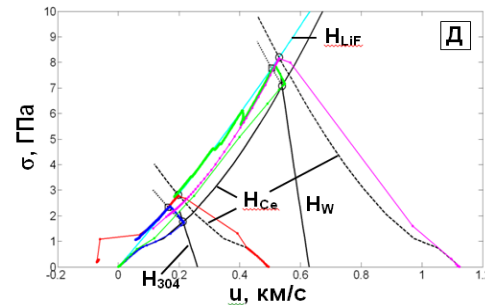
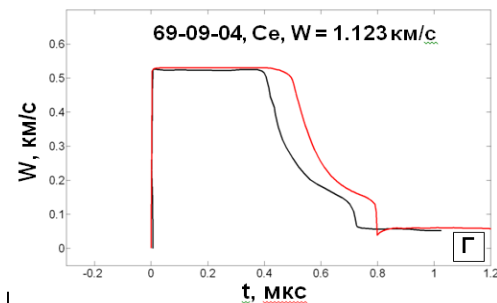
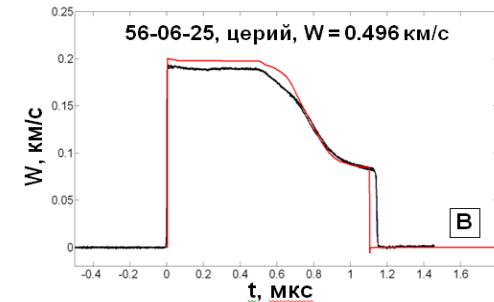
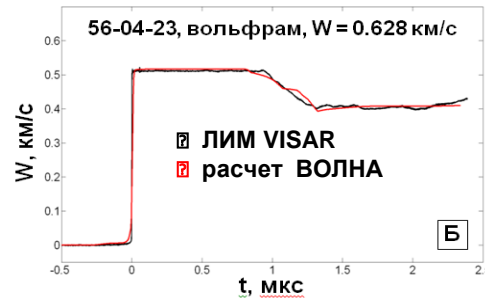
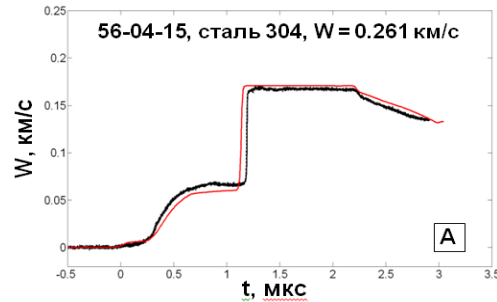
РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



- Церий обладает сложной фазовой диаграммой, на которой присутствуют области большого числа фазовых состояний, проявляется неравновесный метастабильный характер превращений, зависимость от истории изменения состояния
- Особенности: критическая точка на линии  $\gamma$ - $\alpha$  равновесия, аномальность сжимаемости  $\alpha$  фазы, отрицательный наклон линии плавления
- В РФЯЦ-ВНИИТФ под руководством В.М. Елькина построен многофазный УРС<sup>5</sup>, детально описывающий свойств церия. УРС используется в расчетных работах РФЯЦ-ВНИИТФ и ЛАНЛ

<sup>5</sup> Elkin V.M., Mikhaylov V.N., Petrovtsev A.V., Cherne F.J. Phase states of dynamically compressed cerium // Phys. Rev. B. – 2011. – V. 84. – P. 094120.

# Профили волн в церии



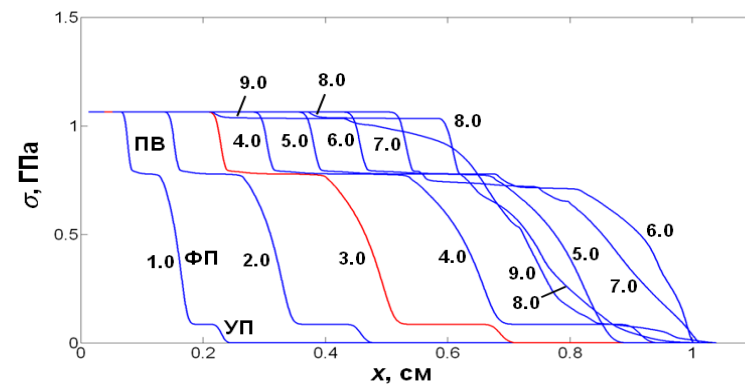
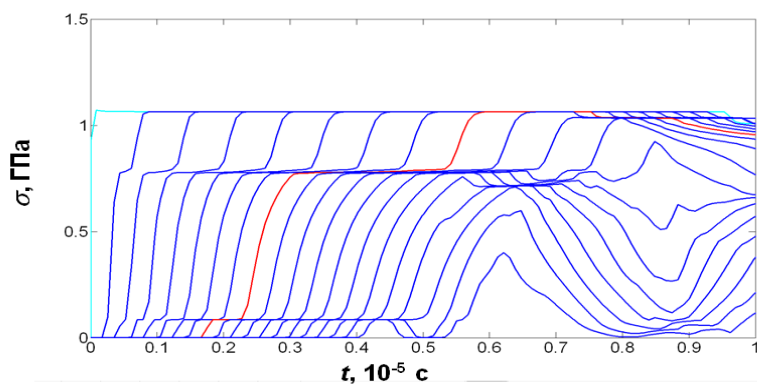
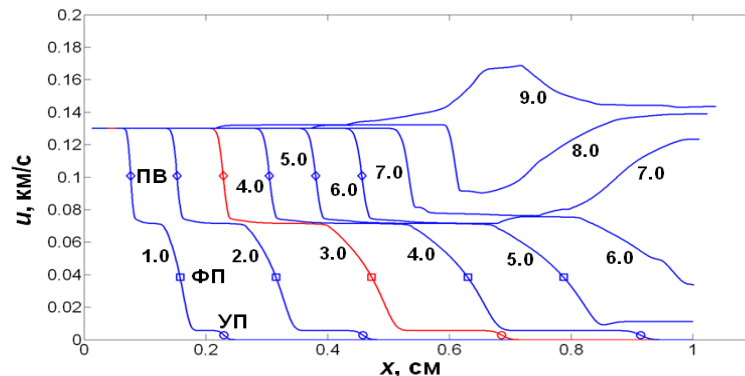
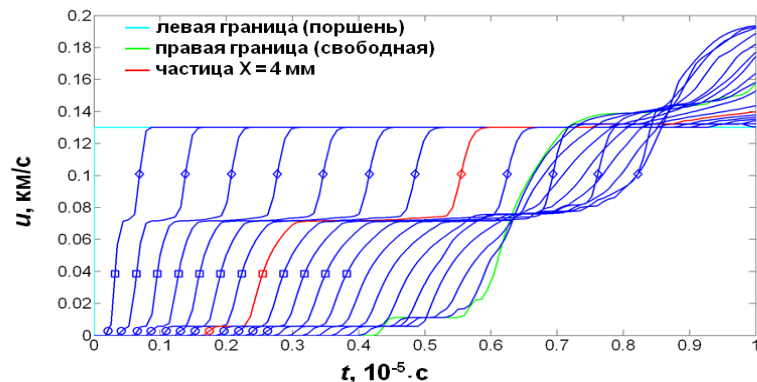
Церий демонстрирует сложную многоволновую структуру профилей волн [6, 7], на которой присутствуют:

- достаточно слабый упругий предвестник,
- фазовый предвестник (в виде волны сжатия),
- пластическая волна, имеющая резкий фронт,
- ударная волна разрежения (даже в области состояний выше критич. точки).

<sup>6</sup> Hixson R.S., Preston D.L. et al. Report on cerium research for FY02. LANL Report. 2002.

<sup>7</sup> Cherne F.J., Jensen B.J. and Elkin V.M. Shock Compression of Condensed Matter – 2009, CP 1195. AIP, 2009. P. 1165-1170.

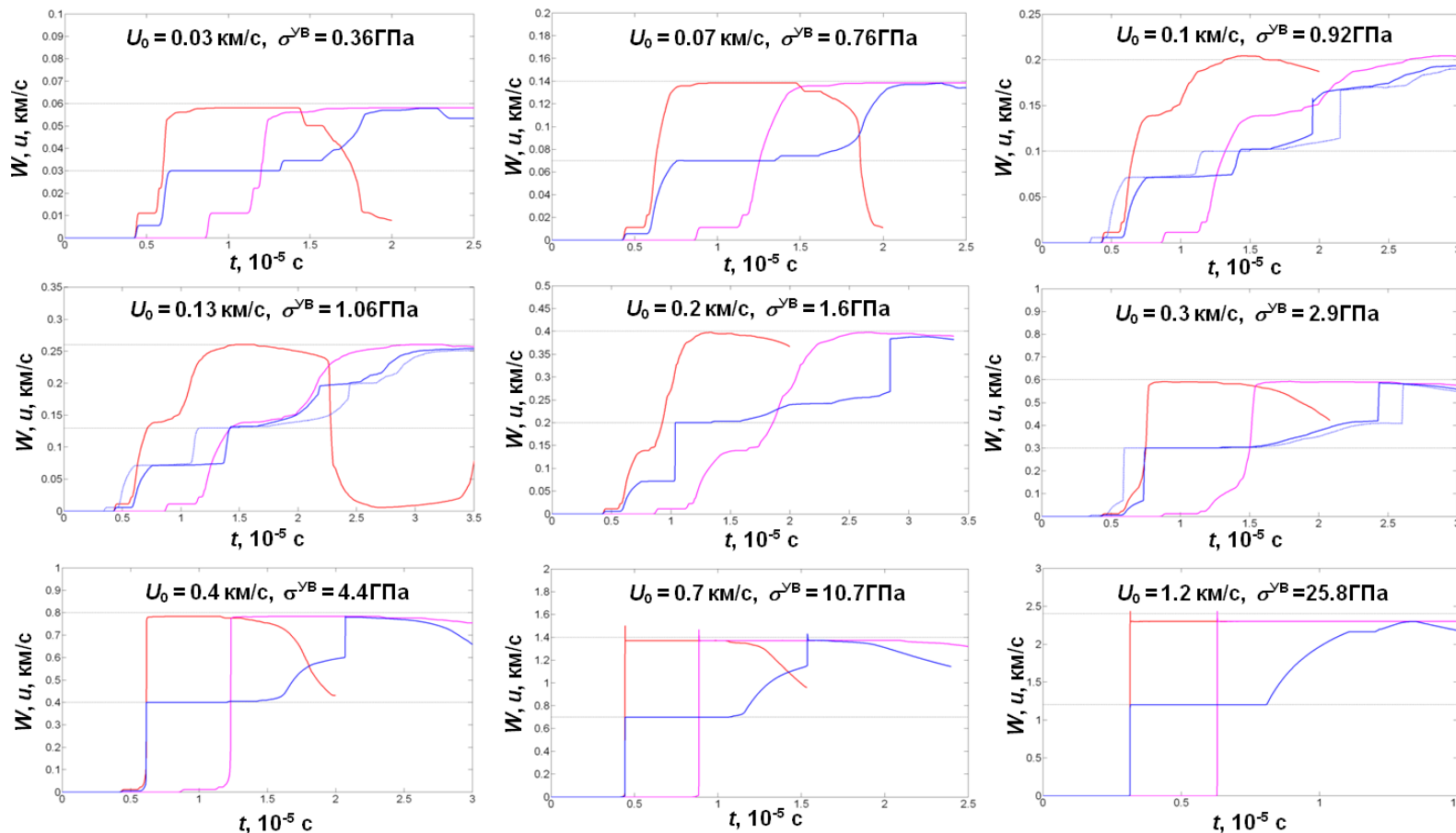
# Отражение волны от свободной поверхности



- Задачи о плоском поршне: в плоской системе из одной области на левой границе задавалась скорость  $U_0 = \text{const}$ , правая граница – свободная ( $P=0$ ).
- Толщина образца  $X_0 = 1$  или 2 см,  $U_0 = 0.03, 0.05, 0.07, 0.1, 0.13, 0.16, 0.18, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 1.0$  и 1.2 км/с.
- Показаны данные на траекториях (слева) и разрезах системы на ряд моментов времени (справа) в задачах с  $U_0 = 0.13$  км/с.

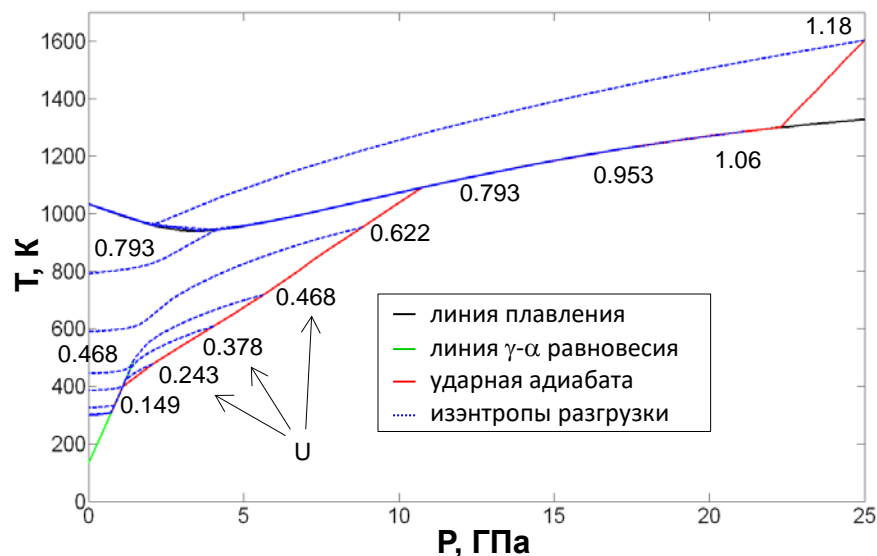
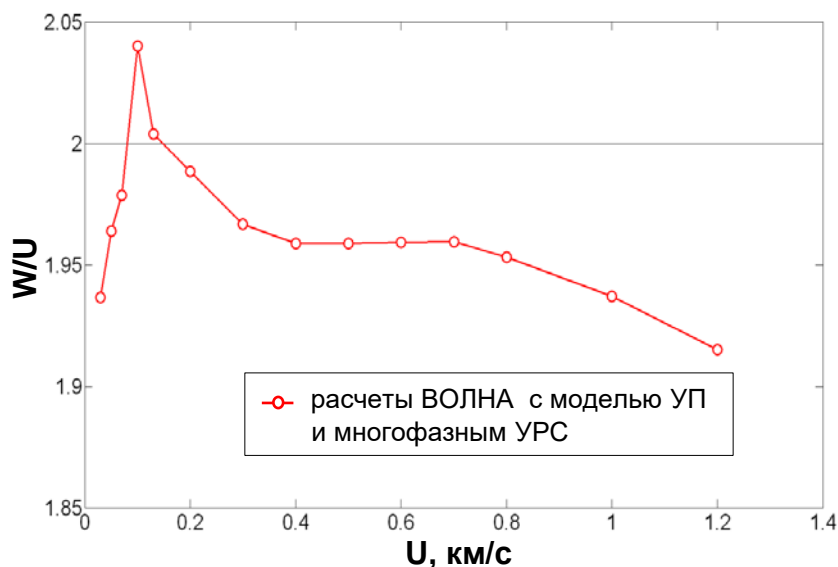


# Сравнение профилей $U(t)$ и $W(t)$



- Сравниваются данные для профилей массовой скорости  $U(t)$  частицы  $X=1\text{см}$  (—) в системе с  $X_0=2\text{см}$  и профилей скорости свободной поверхности  $W(t)$  границы  $X_0=1\text{см}$  (—) для разных условий нагружения на левой границы  $U_0$ . — -  $W(t)$  границы  $X_0=2\text{см}$ .

# Выполнение правила удвоения для церия

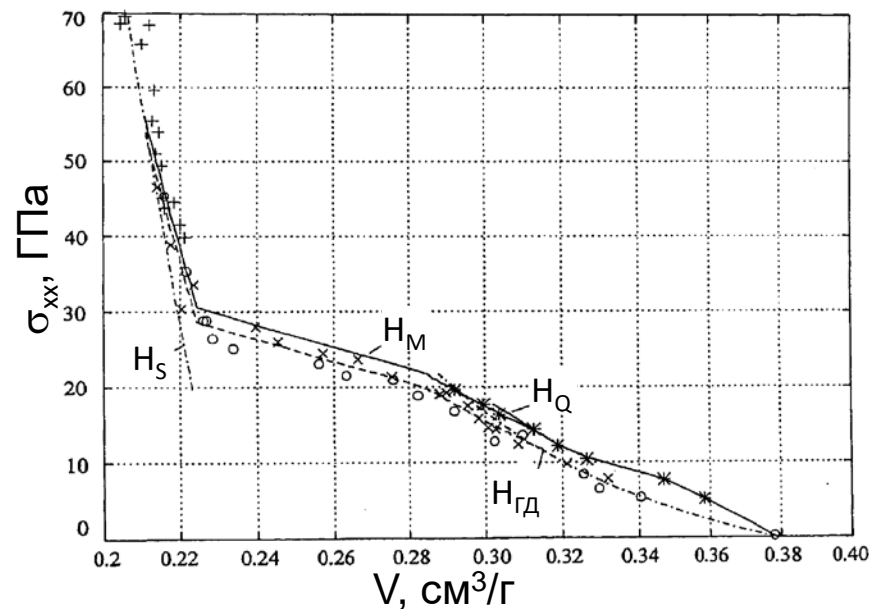
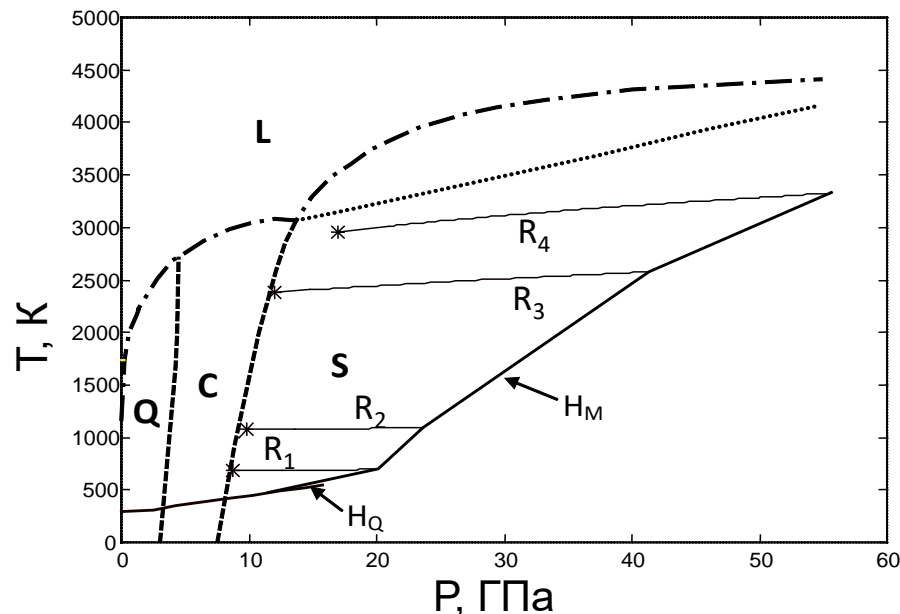


- При низких амплитудах ( $U < 0.1$  км/с)  $W = 1.93U$  - сказывается влияние сдвиговой прочности. С ростом амплитуды волны эффект уменьшается.
- Образование тройной конфигурации в структуре волны снова приводит к отклонению от правила удвоения скорости. Эффект связан с гистерезисом прямого и обратного  $\gamma$ - $\alpha$  превращений
- Величина эффекта возрастает с ростом амплитуды волны из-за увеличения нагрева. При  $U = 0.4 - 0.7$  км/с (разгрузка выше крит. точки до начала плавления) наблюдается стабилизации эффекта,  $W = 1.96U$ .
- С началом плавления отклонение от правила удвоения возрастает. При  $U = 1.2$  км/с ( $P = 25$  ГПа) реализуется соотношение  $W = 1.92U$ .

# Фазовые превращения в кварце



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

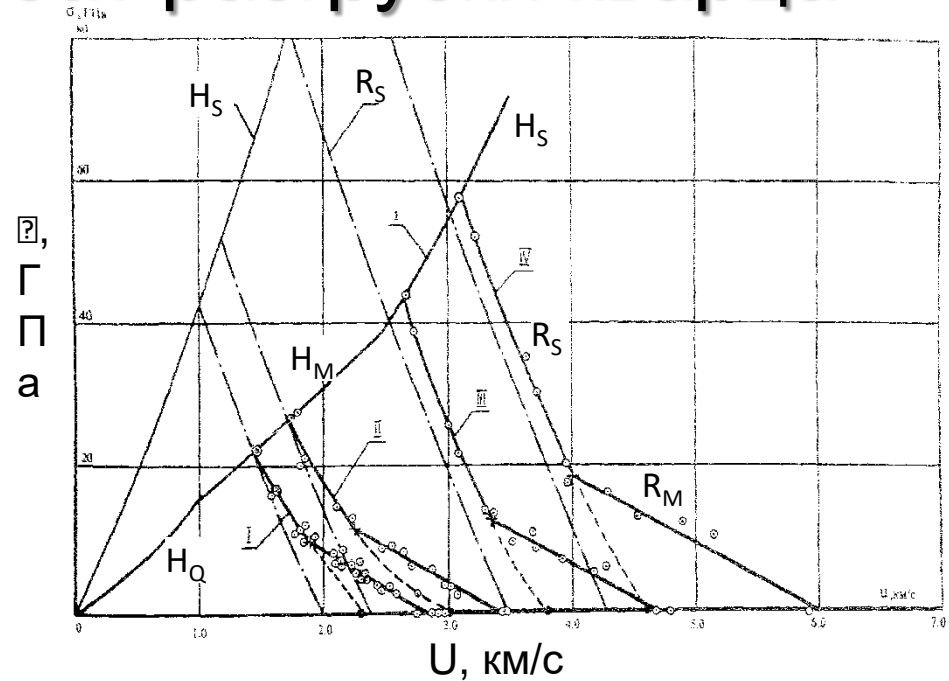
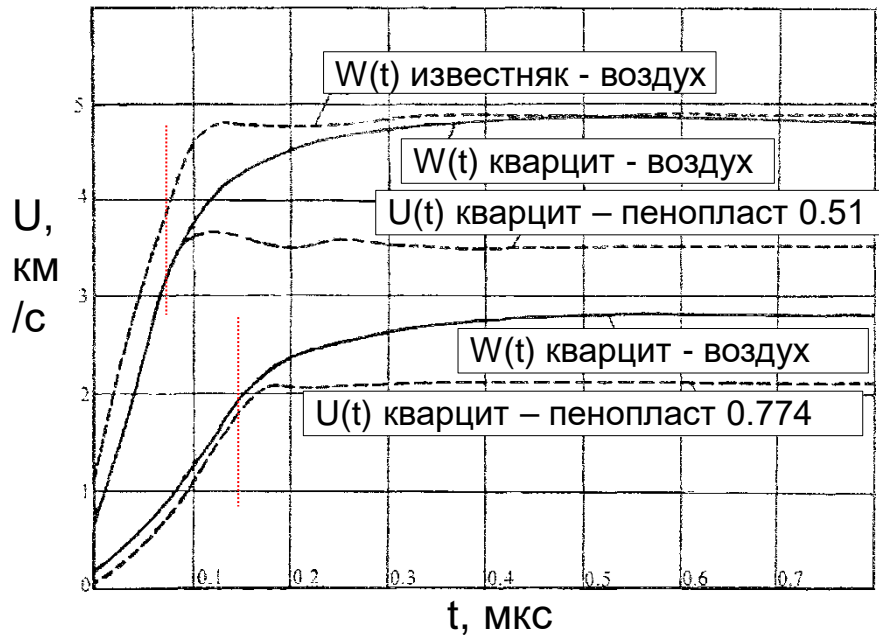


- Кварц – еще один пример материала с большим количеством фазовых превращений. Представлены состояния  $\alpha$  кварца (Q), коэсита (C), стишовита (S).
- В ударных волнах ярко проявляется неравновесность фазовых превращений: переход в коэсит не происходит, на ударной адиабате реализуется протяженная область метастабильной смеси фаз от 10 до 60 ГПа. При разгрузке обратное превращение начинается вблизи линии C-S равновесия. Фазовые переходы в кварце протекают по нескольким механизмам с разными скоростями.
- Построен многофазный УРС [8] и модель фазовых превращений кварца [9].

<sup>8</sup> Dremov V.V., Petrovtsev A.V., Zhugin Yu.N. et al. Equation of state and phase diagram of quartz. *Zababakhine Scientific Talks – 2005*. AIP, 2006. CP 849. P. 380-392.

<sup>9</sup> Коваленко М.Г., Петровцев А.В., Шалковский Д.М. и др. XIV ЗНЧ. 2019, С.135-136.

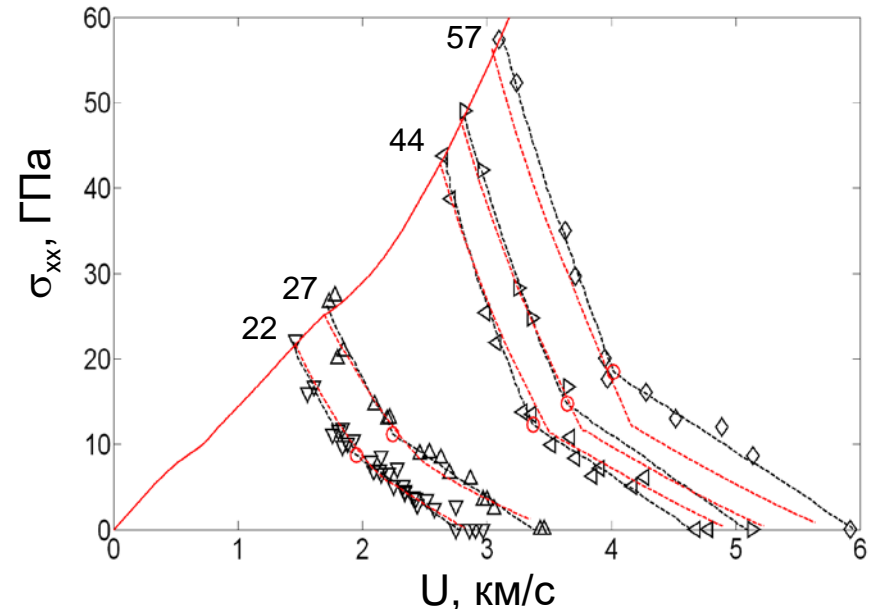
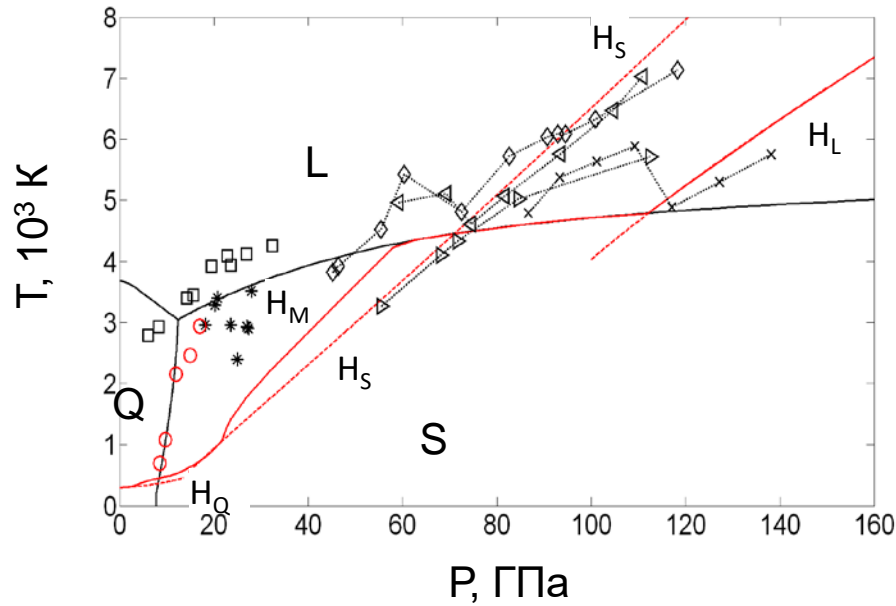
# Исследования адиабат разгрузки кварца



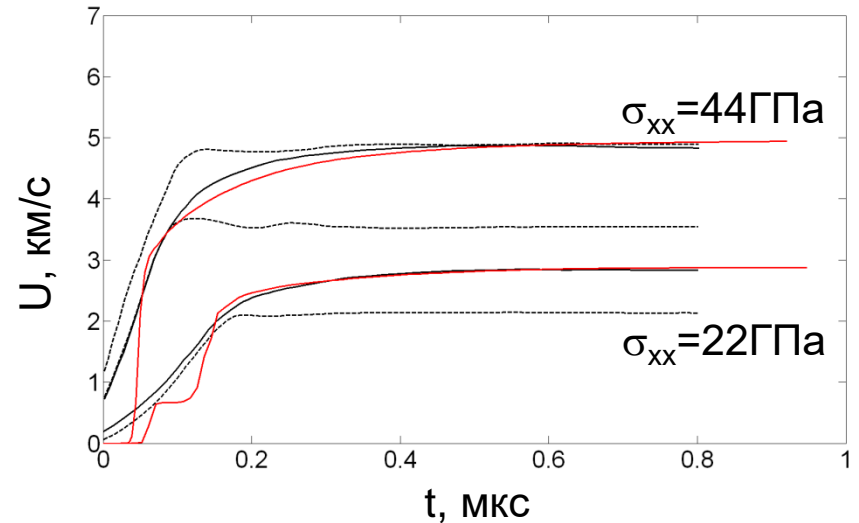
- Ю.Н. Жугиным с сотрудниками [10] с помощью индукционного датчика измерялись параметры состояния ударно-сжатого кварца при его разгрузке в буферные материалы различной жесткости: фторопласт-4, плексиглас, полиэтилен, спирт, пенополистирол и воздух. На профилях скорости  $W(t)$  наблюдается рост, чего нет в случае известняка. На адиабатах разгрузки  $\sigma(U)$  получен резкий излом с переходом от крутой ветви разгрузки к пологой.
- Этот эффект объяснен протеканием при разгрузке обратного S-Q превращения стишовита в кварцевую фазу.

<sup>10</sup> Жугин Ю.Т., Крупников К.К., Абакшин Е.В., Лобачев С.В. и др. Поведение кварца в ударно-волновых процессах: упругий предвестник, адиабатическая разгрузки. Отчет РФЯЦ-ВНИИТФ №ПС 96.6214, 1996.

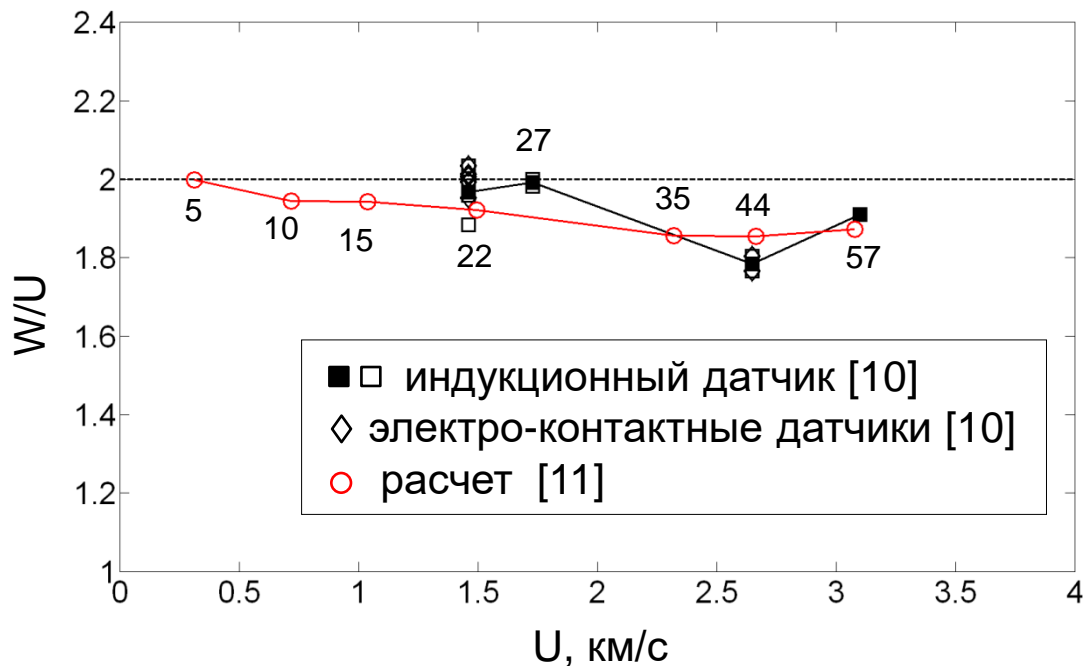
# Моделирование Q-S перехода в кварце



Численное моделирование экспериментов [11] позволило оценить положение точек начала обратного превращения на P-T плоскости, а также характерное время этого превращения, составившее  $\approx 100$  нс.



# Выполнение правила удвоения для кварца



Эксперимент и расчет показывают заметное отклонение скорости свободной поверхности от правила удвоения в области фазового Q-S превращения кварца в стишовит. Отличие возрастает с ростом амплитуды волны и достигает 7.5% ( $W/U=1.86$ ).

В области упругопластической деформации без превращения ( $5 < \sigma_{xx} < 10$  ГПа) отклонение составляет 3% ( $W/U=1.945$ ).

<sup>10</sup> Жугин Ю.Т., Крупников К.К., Абакшин Е.В., Лобачев С.В. и др. Поведение кварца в ударно-волновых процессах: упругий предвестник, адиабатическая разгрузки. Отчет РФЯЦ-ВНИИТФ №ПС 96.6214, 1996.

<sup>11</sup> Коваленко М.Г., Петровцев А.В., Шалковский Д.М. и др. XIV ЗНЧ. 2019, С.135-136.

# Заключение



- Сдвиговая прочность и фазовые превращения приводят к заметному гистерезису цикла нагрузка – разгрузка, в результате чего наблюдаются отличия адиабаты разгрузки от зеркально отраженной относительно вертикальной линии ударной адиабаты и правило удвоения скорости заметно нарушается. Это необходимо учитывать при анализе результатов измерений ударной сжимаемости.
- В докладе рассмотрены два примера веществ, в которых при ударно-волновом нагружении протекают фазовые превращения, при этом свойства участвующих в них фаз сильно отличаются. На основе численного моделирования по программному комплексу ВОЛНА [12] с использованием многофазных УРС этих веществ [5,8] исследована величина отклонения от правила удвоения скорости при выходе ударной волны на свободную поверхность. Получено, что в церии в результате изоморфного  $\gamma$ - $\alpha$  превращения и плавления при высоких нагрузках отклонение достигает 4% ( $W/U=1.92$ ), а в кварце вследствие перехода кварц-стишовит - 7.5% ( $W/U=1.86$ ). В последнем случае отклонение скорости зависит от времени регистрации.

<sup>12</sup> Куропатенко В.Ф., Коваленко Г.В. и др. ВАНТ сер. «Математическое моделирование физических процессов», вып. 2, с.9-25, 1989.

<sup>5</sup> Elkin V.M., Mikhaylov V.N., Petrovtsev A.V., Cherne F.J. Phase states of dynamically compressed cerium // Phys. Rev. B. – 2011. – V. 84. – P. 094120.

<sup>8</sup> Dremov V.V., Petrovtsev A.V., Zhugin Yu.N. et al. Equation of state and phase diagram of quartz. Zababakhine Scientific Talks – 2005. AIP, 2006. CP 849. P. 380-392.



Автор благодарен участникам работ:

В.В. Дремов, Е.Е. Миронова – многофазный УРС кварца

В.М. Елькин, В.Н. Михайлов, В.В. Дремов, Е.Е. Миронова – многофазный УРС  
церия

Д.А. Варфоломеев, М.Н. Якимова, Е. Шаталова – численное моделирование  
волн напряжений в церии

М.Г. Коваленко, Д.М. Шалковский, Д.А. Варфоломеев – численное  
моделирование волн напряжений в кварците

**Спасибо за внимание!**