

**XVII Международная конференция
«ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ»
19 - 23 мая 2025, Снежинск, Россия**

**УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЖИДКОГО
И ГАЗООБРАЗНОГО ЖЕЛЕЗА
ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ
И ТЕМПЕРАТУРАХ**

Боярских К.А., Хищенко К.В.

Цель

- Получить уравнение состояния жидкой и паровой фаз железа на основе простых моделей

Задачи

- Рассмотреть простые термодинамические модели, позволяющие описать металлы в жидком и газообразном агрегатных состояниях
- Получить уравнение состояния жидкой фазы железа
- Получить уравнение состояния жидкого и газообразного железа
- Провести расчеты термодинамических характеристик в области фазового перехода жидкость–пар, сравнить модельные зависимости с экспериментальными данными
- Получить модельные зависимости для описания свойств железа в высокоинтенсивных процессах, сравнить результаты расчетов с данными экспериментов

Модель STEOS2

Здесь и далее введены следующие обозначения: $\sigma = \frac{V_0}{V}$; $\zeta = \frac{V_{0c}}{V}$.

$$F(V, T) = F_c(V) + F_a(V, T) + F_e(V, T) \quad (1)$$

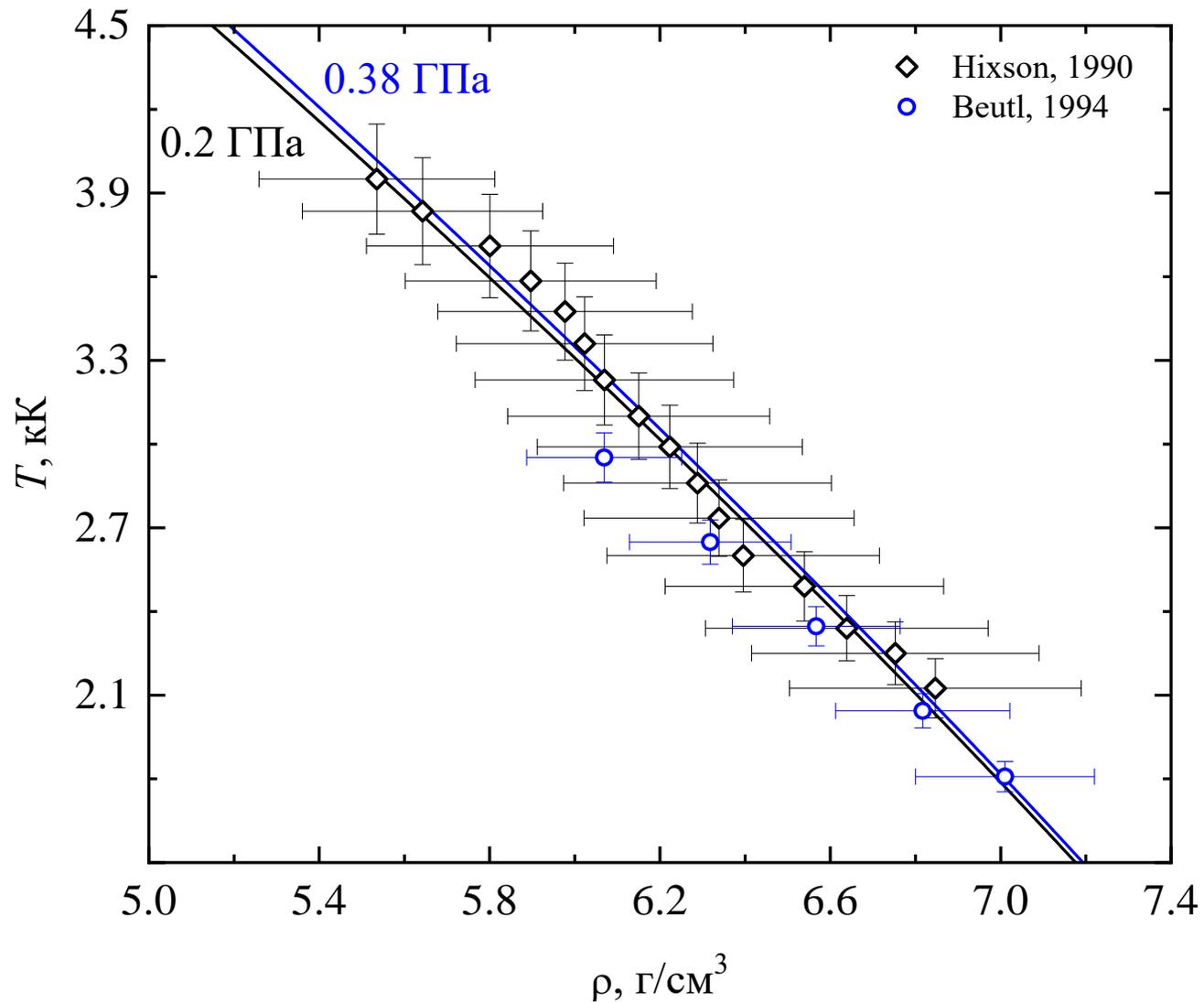
$$F_c(V) = \frac{V_{0c} B_{0c}}{mn} \left(\frac{n\zeta^m - m\zeta^n}{m-n} + 1 \right) \quad (2)$$

$$F_a(V, T) = -\frac{3}{2} RT \ln \frac{T^2}{\theta^2 + T_a \sigma^{2/3} T} \quad (3)$$

$$\theta(V) = \theta_0 \sigma^{2/3} \exp \left[\left(\gamma_0 - \frac{2}{3} \right) \frac{\delta_n + \ln^2 \sigma_m}{\sqrt{\delta_n}} \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{\ln \sigma / \sigma_m}{\sqrt{\delta_n}} \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{\ln \sigma_m}{\sqrt{\delta_n}} \right) \right) \right] \quad (4)$$

$$F_e(V, T) = -\frac{1}{2} \beta_{e0} \sigma^{-\gamma_{e0}} T^2 \quad (5)$$

Свойства жидкого железа при изобарическом нагреве (STEOS2)



Уравнения для расчета параметров ударно-волновых процессов

Для расчета ударных адиабат решается система уравнений, выражающих законы сохранения массы, импульса и энергии:

$$\frac{D}{D-U} = \frac{V_{00}}{V} \quad (6)$$

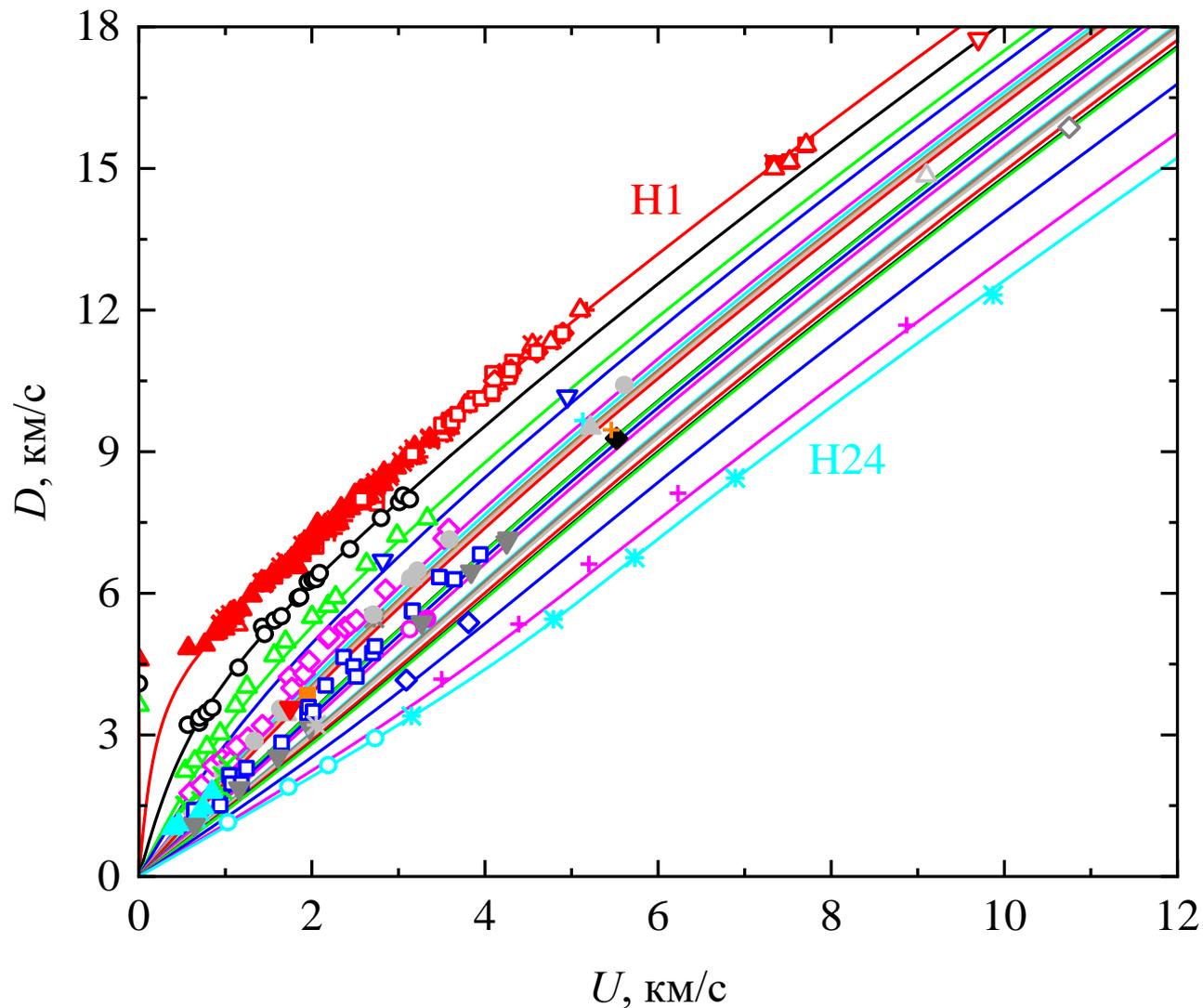
$$P = P_0 + \frac{DU}{V_{00}} \quad (7)$$

$$E - E_0 = \frac{1}{2} (P + P_0)(V_{00} - V) \quad (8)$$

Для расчета массовой скорости в волне разгрузки берется интеграл вдоль изоэнтропы:

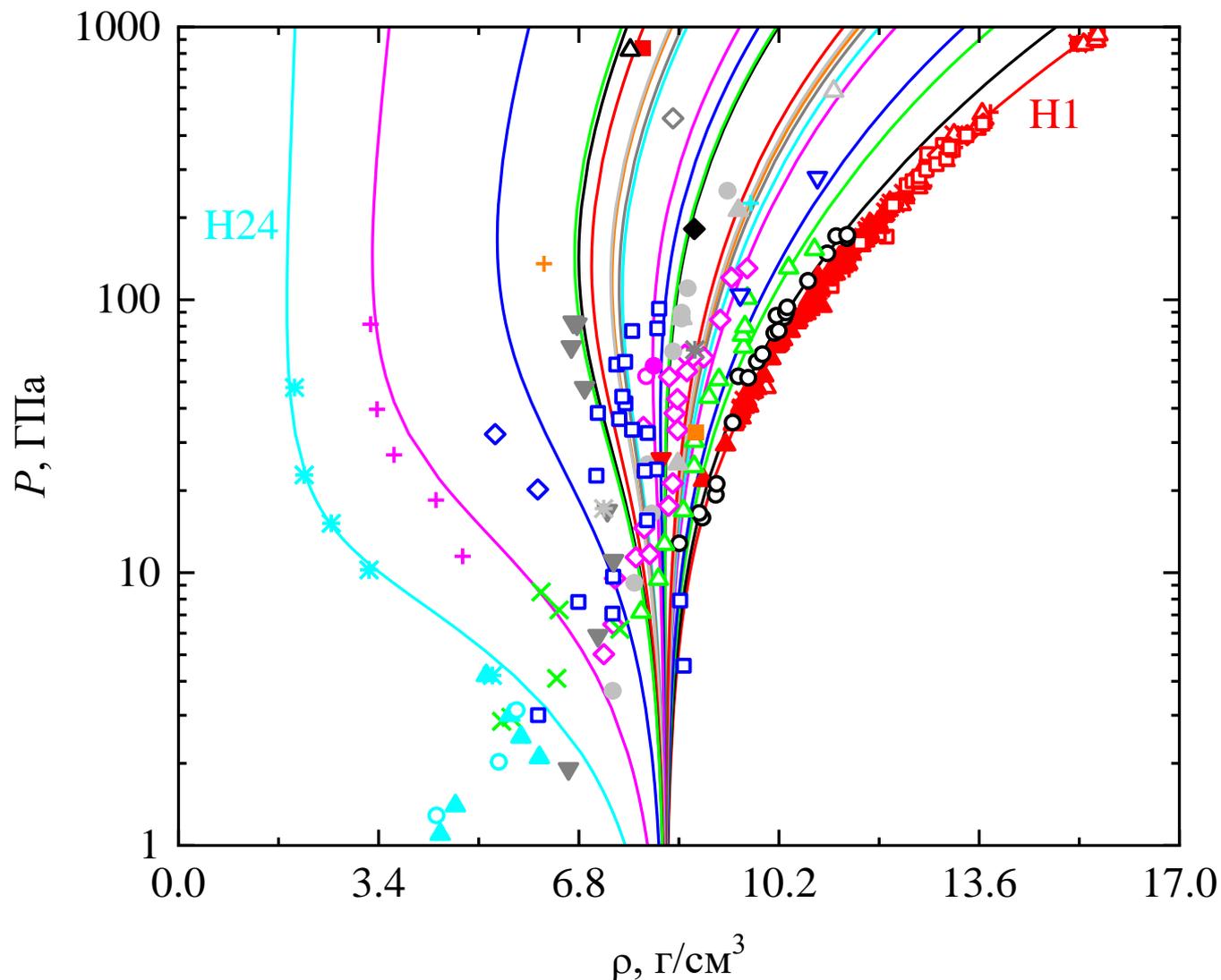
$$U = U_H + \int_{V_H}^V \left[- \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_s \right]^{1/2} dV \quad (9)$$

Ударные адиабаты железа, $D-U$ (STEOS2)



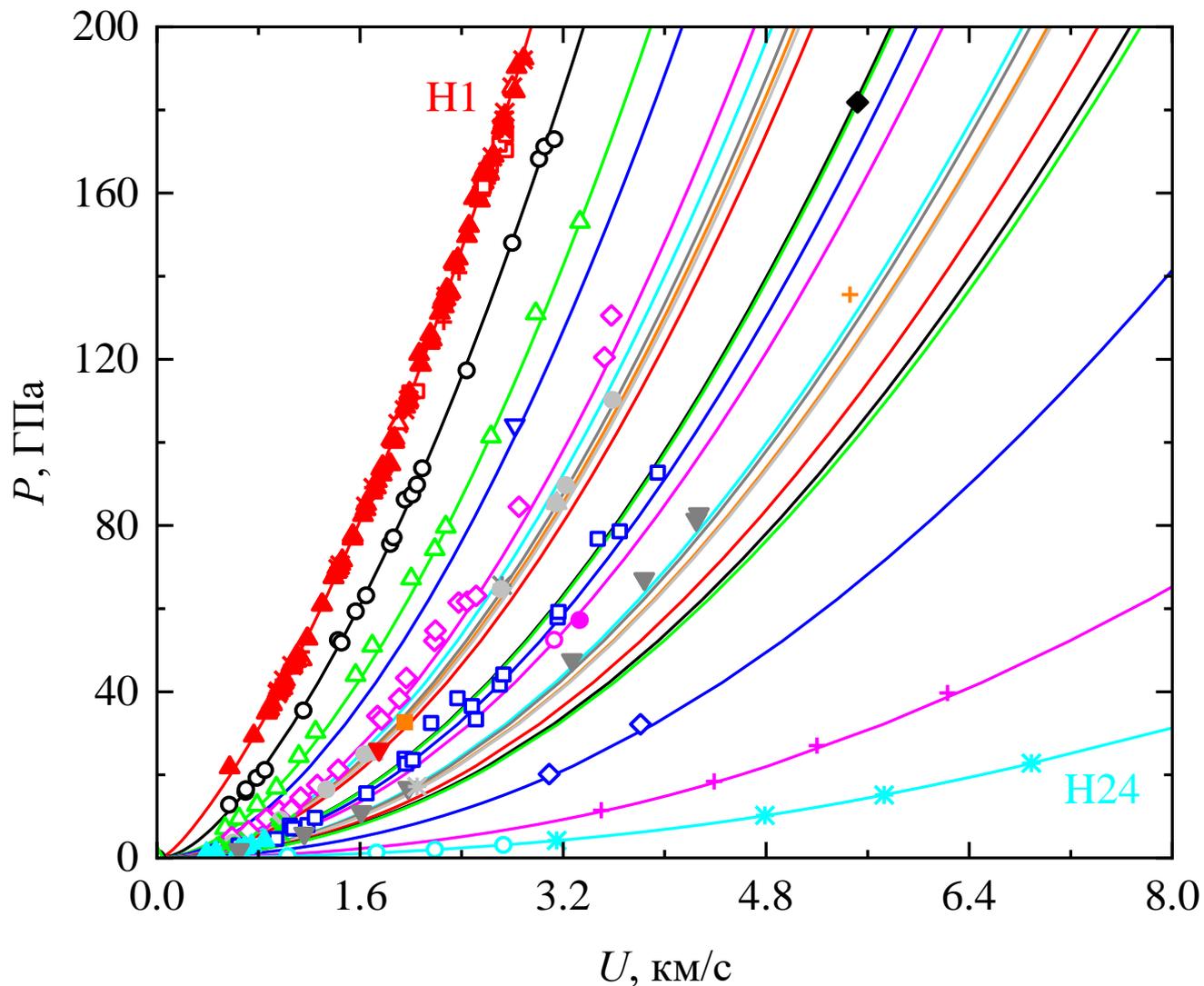
*Ссылки на статьи с экспериментальными данными по ударному сжатию можно найти в базе данных <https://ihed.ras.ru/rusbank/>

Ударные адиабаты железа, P – ρ (STEOS2)



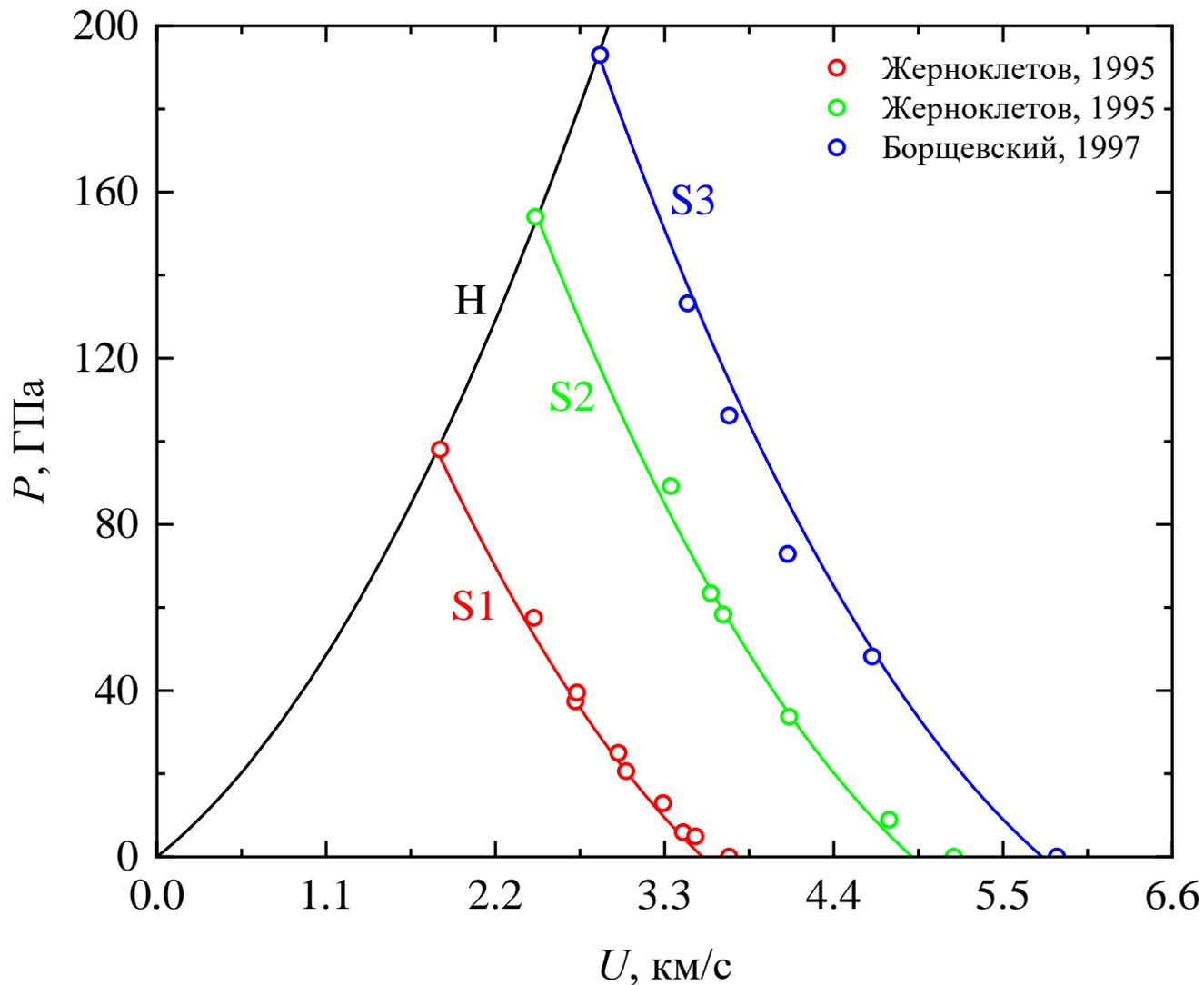
*Ссылки на статьи с экспериментальными данными по ударному сжатию можно найти в базе данных <https://ihed.ras.ru/rusbank/>

Ударные адиабаты железа, $P-U$ (STEOS2)



*Ссылки на статьи с экспериментальными данными по ударному сжатию можно найти в базе данных <https://ihed.ras.ru/rusbank/>

Изоэнтропы разгрузки ударно-сжатых образцов железа (STEOS2)



Модель STEOS3m

$$F(V, T) = F_c(V) + F_a(V, T) + F_e(V, T) \quad (10)$$

$$F_c(V) = V_{0c} B_{0c} \left(\frac{a_m}{m} \zeta^m + \frac{a_n}{n} \zeta^n - \frac{a_m + a_n}{l} \zeta^l \right) + E_s \quad (11)$$

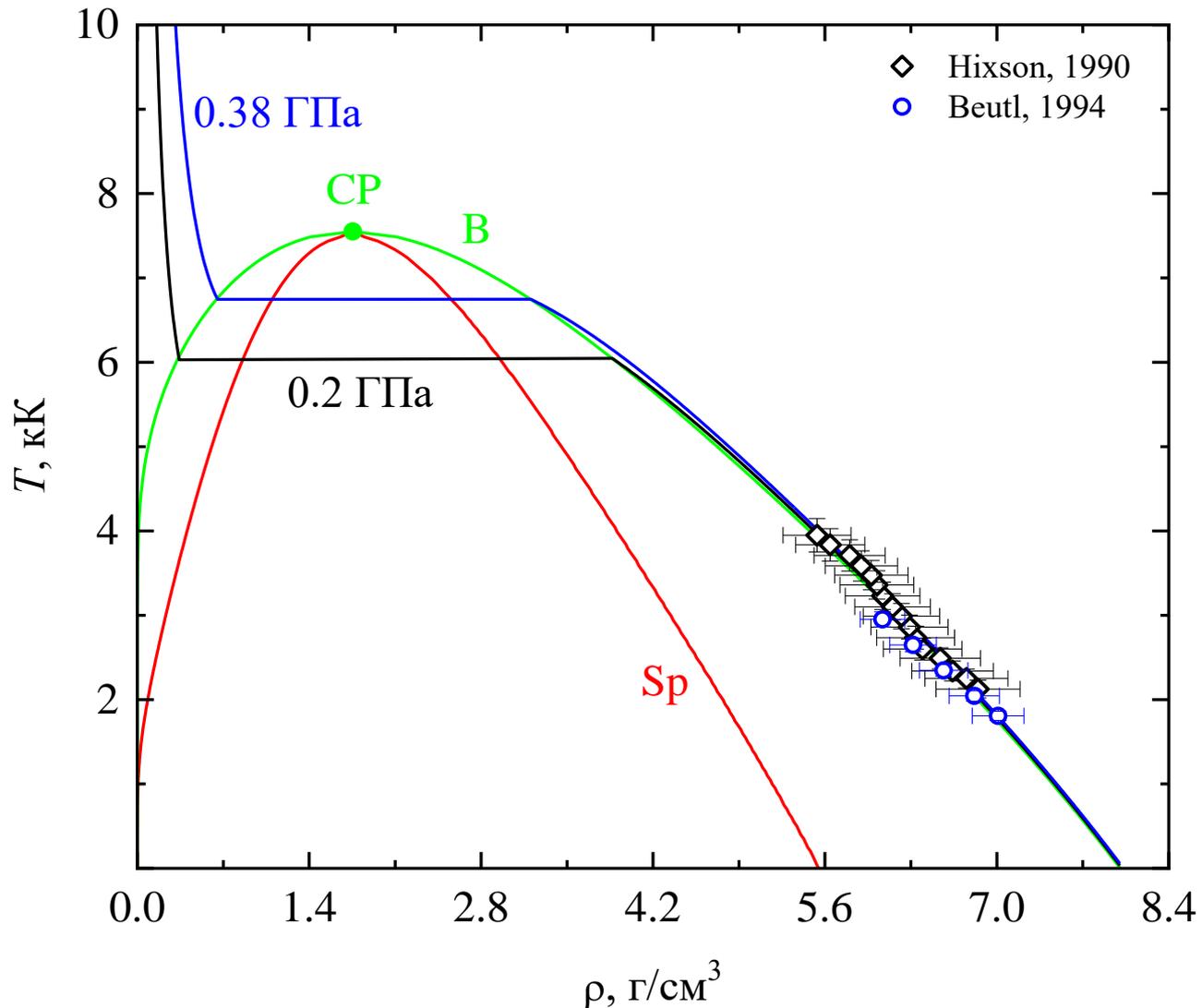
$$F_a(V, T) = -\frac{3}{2} RT \ln \frac{T^2}{\theta^2 + T_a \sigma^{2/3} T} \quad (12)$$

$$\theta(V) = \theta_0 \sigma^{2/3} \exp \left[\left(\gamma_0 - \frac{2}{3} \right) \frac{\delta_n + \ln^2 \sigma_m}{\sqrt{\delta_n}} \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{\ln \sigma / \sigma_m}{\sqrt{\delta_n}} \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{\ln \sigma_m}{\sqrt{\delta_n}} \right) \right) \right] \quad (13)$$

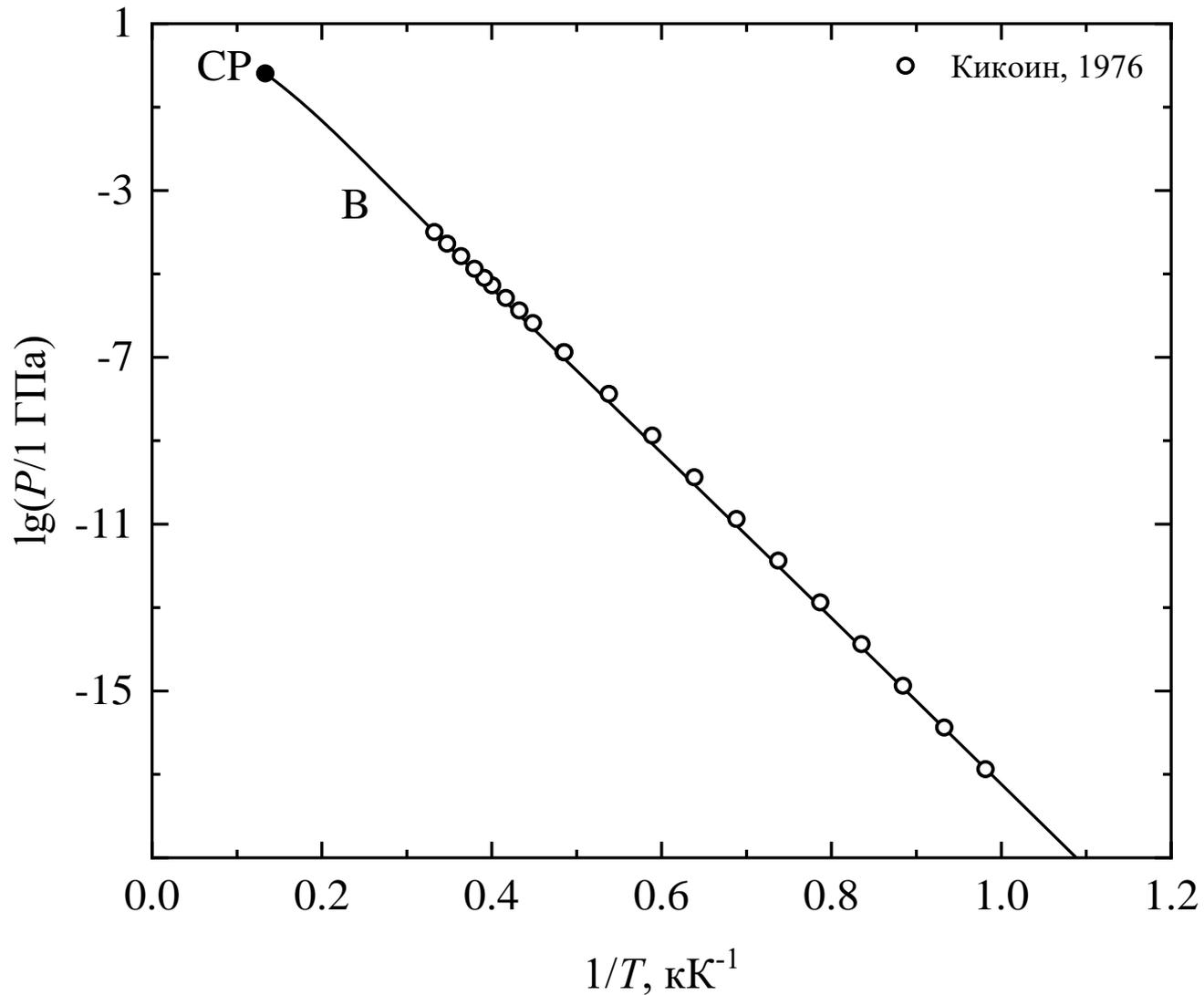
$$F_e(V, T) = -\frac{1}{2} \beta_{e0} (\sigma + \sigma_e)^{-\gamma_{e0} \operatorname{arctg}(\sigma + \sigma_e)} T^2 \quad (14)$$

$$\operatorname{arctg}(\sigma_e) + \frac{\sigma_e \ln(\sigma_e)}{1 + \sigma_e^2} = 0 \quad (15)$$

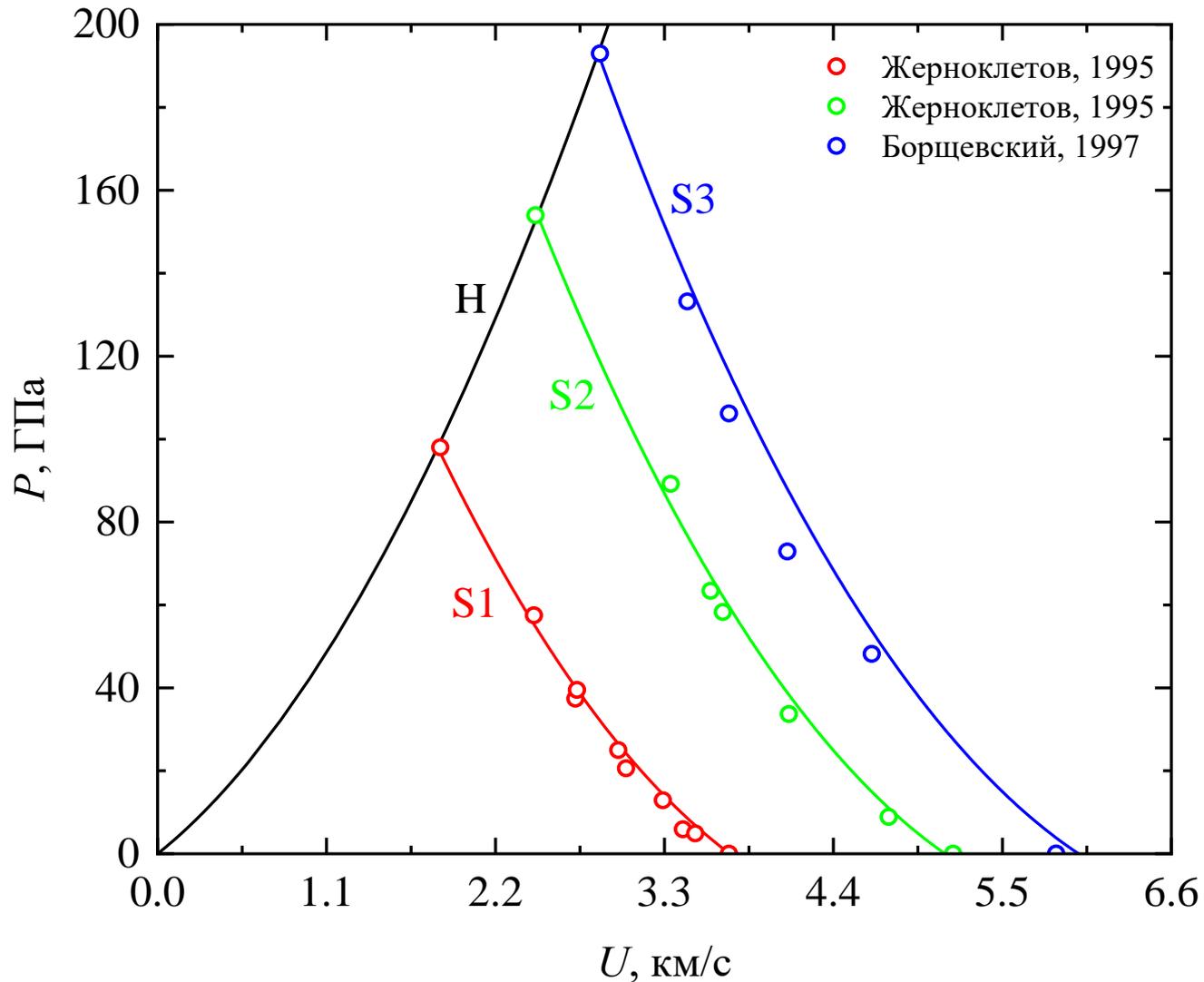
Фазовая диаграмма жидкого и газообразного железа (STEOS3m)



Давление насыщенных паров железа (STEOS3m)



Изоэнтропы разгрузки ударно-сжатых образцов железа (STEOS3m)



Выводы

- Получено уравнение состояния жидкой фазы железа по модели STEOS2
- Получено уравнение состояния железа в жидком и газообразном агрегатных состояниях по модели STEOS3m
- Рассчитаны модельные зависимости термодинамических величин в высокоинтенсивных процессах (при изобарическом нагреве мощным импульсом тока, ударном сжатии и изоэнтропическом расширении), результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными
- Результаты настоящей работы могут быть использованы в гидродинамическом моделировании процессов при высоких давлениях и температурах

Спасибо за внимание