

шарового твэла для случая шести касаний калориметра с соседними. Из анализа этой зависимости следует, что неравномерность температуры на поверхности шарового калориметра является нелинейной (гиперболической) функцией теплопроводности материала оболочки. Однако эта зависимость носит частный характер, и остается непонятным отсутствие величины мощности тепловыделения в ней.

На фиг. 5 представлены зависимости максимальной неравномерности температур на поверхностях оболочек от числа Re для различных значений  $D_0/D_K$ . Полученные результаты могут быть обобщены выражением

$$(t^{\max} - t^{\min})\lambda_M / (\bar{q}_{\text{вн}} R_n) = 25,8(\lambda_M/\lambda_T)^{0,66} [1 - 2,34D_0/D_K + 1,52(D_0/D_K)^2] \text{Re}^{-0,59}$$

с максимальной погрешностью 15%. Здесь  $\bar{q}_{\text{вн}}$  — средняя плотность теплового потока на внутренней поверхности оболочки, Вт/м<sup>2</sup>;  $R_n$  — наружный радиус оболочки, м;  $\lambda_T$  — теплопроводность газа, Вт/(м·К).

Поступила 14 IV 1981

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Субботин В. И., Ибрагимов М. Х., Ушаков П. А. и др. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках. М.: Атомиздат, 1975.
2. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник. М.: Атомиздат, 1968.
3. Исатаев С. И., Жанабаев З. Ж. Теплоотдача шара при струйном обтекании. — ИФЖ, 1968, т. 14, № 4.
4. Богоявленский Р. Г. Гидродинамика и теплообмен в высокотемпературных ядерных реакторах с шаровыми твэлами. М.: Атомиздат, 1978.

УДК 539

### О ВЛИЯНИИ ТИПА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ НА ОПИСАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СЖИМАЕМОСТИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СРЕД

С. В. Бобровский, В. М. Гоголев, В. П. Ложкина

(Ленинград)

Большой класс грунтов можно рассматривать как многокомпонентные смеси. В связи с этим при анализе сильных динамических воздействий на них возникает вопрос о характере термодинамического взаимодействия компонентов. На пути его решения возникают значительные трудности, так как приходится обращаться к моделям неравновесной термодинамики. При решении многих прикладных задач это может привести к неоправданным усложнениям описания состояния среды. Наиболее простыми приближениями в решении этого вопроса являются равновесное и полностью неравновесное приближения. Их можно рассматривать как предельные приближения. Реальное взаимодействие компонентов будет приводить к параметрам, находящимся в промежуточной области термодинамических состояний. В данной работе рассматривается вопрос о степени различия предельных приближений при ударных сжатиях и изэнтропических разгрузках, а также исследуются условия, при которых они дают либо близкие, либо резко отличные механические параметры состояния среды. Решение этих вопросов позволит более обоснованно подойти к использованию того или иного термодинамического приближения в различных прикладных задачах для многокомпонентных грунтов.

**1. Уравнения состояния и основные допущения.** Предложенные в [1—4] уравнения состояния гранита, воды, соли и воздуха позволяют описать термодинамические свойства пористо-водонасыщенных грунтов на силикатной и солевой основе. Рассмотрим равновесное и полностью неравновесное приближения для этих классов многокомпонентных сред. Известно, что в равновесном приближении предполагается равенство давлений и температур во всех компонентах среды. В неравновесном приближении предполагается лишь равенство давлений. Поэтому при сравни-

тельном анализе этих приближений имеет смысл сопоставление лишь «механических параметров» смеси: давления и удельного объема либо массовой скорости и скорости фронта ударной волны и т. п. Сравнительный анализ будем проводить при следующих допущениях.

1. Термодинамические состояния гранита, воды, соли и воздуха описываются уравнениями состояния, приведенными в [1—4].

2. Состояние многокомпонентных сред описывается смесевой формой уравнения состояния

$$(1.1) \quad E = \alpha_1 E_1 + \alpha_2 E_2 + \alpha_3 E_3;$$

$$(1.2) \quad p = p_1 = p_2 = p_3;$$

$$(1.3) \quad v = \alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2 + \alpha_3 v_3;$$

$$(1.4) \quad \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1,$$

где  $E$ ,  $p$ ,  $v$  — удельная энергия, давление и удельный объем смеси; индексы 1—3 относятся соответственно к твердому компоненту, воде и воздуху;  $\alpha_i$  — доля по весу  $i$ -компонента в смеси.

В силу малости  $\alpha_3$  и конечности  $E_3$  можно использовать приближенные равенства

$$(1.5) \quad E \approx \alpha_1 E_1 + \alpha_2 E_2;$$

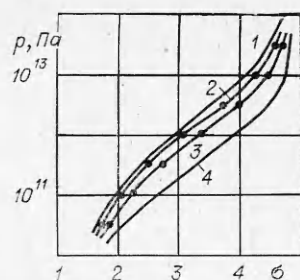
$$(1.6) \quad \alpha_1 + \alpha_2 \approx 1.$$

При описании пористых грунтов иногда вместо параметра  $\alpha_3$  вводят степень пористости  $\Pi = \alpha_3 v_{30}/v_0$ , где индекс 0 относится к исходному состоянию среды, или параметр пористости  $m = v_0/v_{10}$ . Для сухих грунтов ( $\alpha_2 = 0$ ) справедливо соотношение  $\Pi = (m - 1)/m$ .

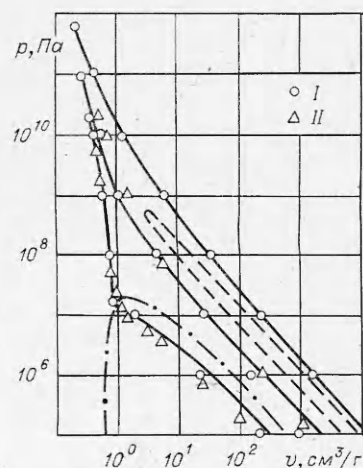
3. В равновесном приближении система (1.1)—(1.4) дополняется условием равенства температур компонентов среды  $T_i = T$ . На основе уравнения состояния воздуха [4] можно показать, что его степень сжатия в этом приближении при давлениях  $\sim 10^9$  Па и выше значительно превышает величину  $\sigma_3 = v_{30}/v_3 = 30$ . Поэтому воздухом при построении ударных адиабат пористых сред в равновесном приближении можно пренебречь, а воздушные поры рассматривать как вакуумные, что упрощает расчеты. В этом случае уравнение энергии будет иметь вид (1.5), а уравнение для удельного объема  $v = \alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2$ .

4. При неравновесном приближении предполагается, что ударная нагрузка и изэнтропическая разгрузка происходят в соответствии с индивидуальными ударными адиабатами и изэнтропами каждого компонента. При этом удельный объем смеси для данного давления определяется в соответствии с (1.3). В этом приближении сжимаемость воздуха является конечной величиной, и ею пренебрегать нельзя.

2. Ударные адиабаты и изэнтропы полностью водонасыщенных грунтов. На основе изложенных выше допущений выполнены расчеты ударных адиабат и изэнтроп для полностью водонасыщенных ( $\alpha_3 =$



Ф и г. 1



Ф и г. 2

= 0) силикатных грунтов в равновесном и неравновесном приближениях. На фиг. 1 представлены ударные адиабаты в плоскости ( $p, \sigma$ ). Сплошными линиями показаны адиабаты для равновесного приближения ( $1 - \alpha_1 = 1$ ;  $2 - \alpha_1 = 0,9$ ;  $3 - \alpha_1 = 0,7$ ;  $4 - \alpha_1 = 0$ ), кружками отмечены данные расчета по неравновесному приближению. Из анализа данных видно, что равновесное и неравновесное приближения количественно близки друг к другу. Наибольшее отличие до 1—2% по степени сжатия наблюдается в зоне максимальных сжатий.

Из фиг. 1 видно, что адиабаты водонасыщенных грунтов располагаются между адиабатами гранита (кривая 1) и воды (кривая 4). По мере возрастания степени водонасыщенности происходит монотонное смещение адиабат от адиабаты гранита к адиабате воды. При этом максимальное сжатие смеси возрастает.

Отметим еще одну особенность. Результаты расчетов адиабат показали, что если при ударном нагружении чистой воды или чистого гранита степень максимального сжатия воды равна 4,83, а для гранита — 4,78, то для их смеси в рамках равновесного приближения происходит существенное перераспределение степеней сжатия отдельных компонентов. Это положение иллюстрируется данными таблицы, в которой, кроме максимальных сжатий  $\sigma$  в последней строке, приведены также давления, соответствующие этим сжатиям. Отмеченная особенность является следствием теплообмена в процессе выравнивания температур между компонентами воды и гранита. В результате этого температура и удельная энергия гранитного компонента возрастают, а у воды падают, что приводит к увеличению сопротивляемости к сжатию у гранита и уменьшению у воды.

На фиг. 2 приведены результаты расчета изэнтроп для  $\alpha_1 = 0,7$  в равновесном (сплошные линии) и неравновесном приближениях (точки I). Представленные на фиг. 2 изэнтропы выходят из точек ударных адиабат, соответствующих давлениям 0,2; 0,92 и  $6,2 \cdot 10^{11}$  Па (кривые 1—3). Здесь же показаны и границы области двухфазных состояний гранита (штриховая линия) и воды (штрихпунктирная линия).

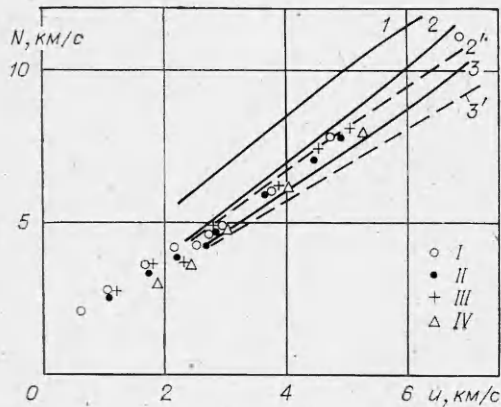
Из анализа приведенных данных следует, что равновесное и неравновесное приближения для области полного испарения гранита дают практически совпадающие изэнтропы. В области конденсированного состояния гранита и полного испарения воды (кривая 2) они начинают расходиться. В области же ниже критической точки воды различие становится значительным. Для кривой 2 различие по удельным объемам доходит до двух раз. Аналогичное различие приближений имеет место в области двухфазных состояний воды.

Для сравнения на фиг. 2 точками II показаны результаты расчета изэнтроп, выполненные в [5] по схеме неравновесного приближения при давлениях на фронте ударной волны 0,2 и  $1 \cdot 10^{11}$  Па при  $\alpha_1 = 0,724$ . Из фиг. 2 видно вполне удовлетворительное согласие данных [5] и настоящей работы.

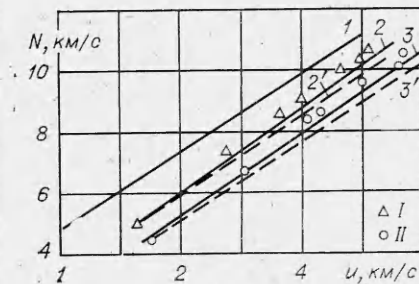
Таким образом, проведенный анализ показывает, что если вода и гранит находятся в одинаковых агрегатных состояниях, то механические параметры на ударных адиабатах и изэнтропах в равновесном и неравновесном приближениях практически совпадают, т. е. с газодинамической точки зрения они равноценны. Если же агрегатные состояния этих компонентов различаются, то указанные приближения приводят к различию в параметрах состояния. Оно особенно велико в области ниже критической точки состояния воды.

**3. Сухие гористые грунты.** Рассмотрим вопрос о влиянии типа приближения на расчетные параметры состояния для неводонасыщенных

$\alpha_1$	1,0	0,9	0,8	0,7	0
$\sigma_{\max}$	4,78	4,80	4,81	4,81	4,83
$\sigma_1$	4,78	4,25	3,85	3,53	—
$\sigma_2$	—	8,69	7,83	7,17	4,83
$p \cdot 10^8, \text{ Па}$	2,30	1,63	1,48	1,35	0,49



Ф и г. 3



Ф и г. 4

( $\alpha_2 = 0$ ) пористых грунтов. Исследование проведем применительно к пористому кварцу и пористой соли. Этот выбор связан с тем, что для них имеются опытные данные по ударной сжимаемости [6, 7], что открывает возможность оценки реальности того или иного приближения. Отметим также, что состояние кварца может быть описано уравнением состояния гранита [1].

Результаты расчета ударных адиабат и экспериментальные данные для пористых кварца и соли в плоскости скорости фронта  $N$  — скорость частиц  $u$  представлены на фиг. 3, 4. Кривые 1 — ударные адиабаты непористого вещества, результаты расчетов по неравновесному приближению представлены сплошными линиями, по равновесному — штриховыми. Кривые 2, 2' и 3, 3' на фиг. 3 рассчитаны для  $\Pi = 0,32$  ( $\rho_0 = 1,75$  г/см<sup>3</sup>) и  $\Pi = 0,56$  ( $\rho_0 = 1,15$  г/см<sup>3</sup>). На фиг. 3 представлены опытные данные [6]: точки I—III соответствуют  $\rho_0 = 1,75; 1,55; 1,35$  и  $1,15$  г/см<sup>3</sup>.

Из приведенных данных видно, что ударные адиабаты в равновесном и неравновесном приближениях значительно отличаются друг от друга. Очевидно, в плоскости ( $p, v$ ) это различие будет еще большим. Различие приближений возрастает с ростом интенсивности волны и с ростом пористости. Это связано, по-видимому, с возрастанием роли теплового компонента в состоянии пористой среды. Поскольку у воздуха она является определяющей, то в состоянии смеси ей принадлежит главная роль. Рассмотрим предельный переход при пористости, стремящейся к единице, который имеет чисто теоретическое значение. Ясно, что в этом случае ударные адиабаты смеси будут стремиться к предельной ударной адиабате воздуха. При этом, начиная с некоторых значений пористости, ударные адиабаты в неравновесном и равновесном приближениях будут сближаться, так как вклад твердого компонента в ударную сжимаемость смеси будет уменьшаться. Однако расчеты показывают, что при изменении пористости в диапазоне, характерном для реальных грунтов, различие между приближениями возрастает с ростом пористости.

Анализ опытных данных показывает, что они имеют разброс и в рамках этого разброса не наблюдается монотонного смещения ударных адиабат с увеличением пористости. Например, точки для  $\rho_0 = 1,35$  лежат выше точек для  $\rho_0 = 1,55$ , но ниже точек для  $\rho_0 = 1,75$ . Лишь точки для  $\rho_0 = 1,15$  регулярно располагаются ниже точек для  $\rho_0 = 1,75$ . Это не дает возможности на базе сравнения расчетных и опытных данных сделать вывод о степени справедливости того или иного приближения. Однако можно отметить, что опытные данные для  $\rho_0 = 1,75$  тяготеют к адиабате равновесного приближения, а данные для  $\rho_0 = 1,15$  — к адиабате неравновесного приближения. Возможно, это есть следствие физических причин. Действительно, в первом случае доля воздуха в порах сравнительно мала, а следовательно, мал и его тепловой вклад в состояние, теплообмен между компонентами не оказывает существенного влия-

ния на ударное сжатие. Во втором случае имеет место обратная ситуация, и роль неравновесности значительна.

Рассмотрим данные, представленные на фиг. 4 для случаев  $\Pi = 0,34$  и  $0,54$  (эксперимент [7]: точки I, II соответственно). В данном случае различие приближений несколько меньше, чем у кварца. Этот факт можно объяснить большей сжимаемостью соли по сравнению с гранитом. Поэтому при одной и той же интенсивности волны относительный вклад в состояние смеси тепловой составляющей соли выше, чем у гранита, т. е. относительное влияние воздушного компонента снижается.

Анализ опытных данных и сравнение с расчетными результатами показывают, что теоретические адиабаты для обоих приближений располагаются в зоне разброса экспериментальных результатов. Это не позволяет оценить степень соответствия того или иного приближения действительному состоянию.

Выше рассмотрены лишь ударные адиабаты. Опираясь на результаты анализа изэнтроп для водонасыщенной смеси (фиг. 2), можно ожидать, что наличие газообразного компонента в ней приведет к различию изэнтроп в равновесном и неравновесном приближениях. Поэтому специальный анализ этого вопроса в данном случае не проводился.

Опираясь на полученные выше результаты, можно также ожидать, что наличие газообразного компонента в пористо-водонасыщенных грунтах приведет к различию ударных адиабат и изэнтроп обоих приближений, характерные черты которого будут аналогичны различию приближений для сухих пористых сред (см. фиг. 3, 4).

Таким образом, проведенный анализ позволяет сделать следующие предварительные заключения. Для смесей конденсированных сред механические параметры на ударных адиабатах и изэнтропах, рассчитанные в равновесном и неравновесном приближениях, близки друг к другу в области одинаковых агрегатных состояний. Наличие газообразной компоненты (воздух или пар какого-либо компонента смеси) приводит к различию рассчитанных в равновесном и неравновесном приближениях указанных параметров, что связано с резким изменением сжимаемости смеси и роли теплового компонента в ее состоянии.

Имеющиеся в настоящее время опытные данные не позволяют дать достаточно надежные оценки степени соответствия данных того или другого типа термодинамического приближения реальным состояниям. Приведенные результаты носят больше качественный, нежели количественный характер ввиду приближенности современных уравнений состояния.

*Поступила 26 VI 1981*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Замышляев Б. В., Гоголев В. М. и др. Скорость откола в твердой среде при действии сильных ударных волн.— ФГВ, 1974, т. 10, вып. 6.
2. Замышляев Б. В., Менжулин М. Г. Интерполяционное уравнение состояния воды и водяного пара.— ПМТФ, 1971, № 3.
3. Бобровский С. В., Гоголев В. М. и др. Интерполяционное уравнение состояния NaCl, учитывающее процессы плавления, диссоциации и полимеризации.— ПМТФ, 1978, № 5.
4. Кузнецов Н. М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М.: Машиностроение, 1965.
5. Буткович Т. Р. Влияние воды в горных породах на эффекты подземных взрывов.— В сб.: Подводные и подземные взрывы. М.: Мир, 1974.
6. Трунин Р. Ф., Подурец М. А., Симаков Г. В. Сжатие пористого кварца сильными ударными волнами.— Физика Земли АН СССР, 1971, № 2.
7. Корнер С. Б., Синицын М. В. и др. Исследование сжимаемости пяти ионных соединений до давлений 5 мбар.— ЖЭТФ, 1964, т. 47, вып. 4.