

Школа Альтшулера живет и развивается

М. В. ЖЕРНОКЛЕТОВ, А. Б. МЕДВЕДЕВ, В. Г. СИМАКОВ

В мае 2017 г. исполняется 70 лет самому «научному», а в недавнем прошлом самому «полигонному» отделу 0304 Института экспериментальной газодинамики и физики взрыва ВНИИЭФ. Первым начальником четвертого отдела газодинамиков был назначен 34-летний кандидат наук Лев Владимирович Альтшулер, незаурядный ученый, получивший мировую известность, главным образом, по публикациям работ, выполненных во ВНИИЭФ. Одна из задач, поставленных перед отделом, заключалась в разработке динамических методов исследований свойств веществ под воздействием сильных ударных волн, получении данных по ударному сжатию и построении на их основе уравнений состояния конструкционных материалов. Льву Владимировичу удалось сформировать творческий коллектив ярких ученых, способных решать совершенно новые глобальные задачи, стоявшие перед институтом. К их числу, прежде всего, относятся С. Б. Кормер, К. К. Крупников, Д. М. Тарасов, Б. Н. Леденев, А. А. Баканова, М. И. Бражник, В. Н. Зубарев, М. Н. Павловский, Р. Ф. Трунин. За короткий срок были разработаны генераторы ударных волн плоской и сферической геометрии, методы и приборное оснащение для газодинамических исследований, внедрены электроконтактная, оптическая, рентгеновская и электромагнитная методики. Получены данные по ударному сжатию многих металлов, при этом потолок давлений для тяжелых металлов достиг 18 Мбар. На основании этих данных построены полуэмпирические уравнения состояния. Уже в 1958–1960 гг. данные по сжатию и уравнениям состояния алюминия, железа, меди, цинка, серебра, кадмия, олова, золота, свинца, висмута были опубликованы в нескольких статьях ЖЭТФ. Изложенные в этих статьях результаты включены в 11 главу известной монографии Я. Б. Зельдовича и Ю. П. Райзера «Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений», которая была впервые издана в 1963 г.

Основные результаты исследований свойств веществ, при высоких давлениях и температурах, выполненных сотрудниками отдела примерно за полтора десятка лет, обобщены в обзоре

Л. В. Альтшулера «Применение ударных волн в физике высоких давлений» в журнале УФН (1965, т. 85, с. 197). Эта статья фактически закрепила приоритет ВНИИЭФ в создании отечественной школы исследований экстремальных состояний вещества динамическими методами. Статья была высоко оценена зарубежными учеными и не потеряла интереса у специалистов и в настоящее время.

Отметим одну характерную черту, присущую как начальникам (Л. В. Альтшулеру, Р. Ф. Трунину, М. В. Жерноклетову), так и большинству сотрудников отдела, касающуюся не только качественного проведения исследований, но и обязательной публикации их результатов, что важно для поддержки престижа ВНИИЭФ в области физики высоких плотностей энергии. Лидерство в отделе по публикациям, безусловно, принадлежало Рюрику Федоровичу Трунину. Достаточно сказать, что им одним и в соавторстве только в престижном журнале УФН опубликовано 7 обзорных научных статей. Сотрудники отдела печатаются в ведущих научных журналах УФН, ЖЭТФ, ФГВ, ПМТФ, трудах отечественных и зарубежных конференций и симпозиумов. К 60-летию отдела по инициативе Р. Ф. Трунина во ВНИИЭФ изданы 4-е тома сборника «Поведение веществ под воздействием сильных ударных волн», в котором представлены практически все статьи (а их более 250), опубликованные сотрудниками отдела в период с 1958 по 2007 г. К 70-летию юбилею отдела подготовлен и издан 5-й том сборника, в который вошли 53 статьи, опубликованные в 2008–2015 гг. Содержание статей, объединенных рамками физики высоких плотностей энергии, свидетельствует о разнообразной направленности работ, в которых участвуют сотрудники отдела. Это – исследование детонационных процессов и параметров уравнений состояния взрывчатых веществ и их продуктов детонации, широкодиапазонные уравнения состояния газов и металлов, исследование фазовых превращений в ударных волнах, ударно-волновое и квазиизэнтропическое сжатие газов, влияние ударно-волновых нагрузок на микроструктуру и механические свойства различных металлов, импульсный рентгенострук-

турный анализ веществ в динамических экспериментах, микроволновая диагностика ударно-волновых и детонационных процессов и др.

А сколько еще материалов о сотрудниках и их вкладе в науку опубликовано в научно-популярных и мемуарных изданиях! Подробно описать, не повторяясь, все достижения отдела за прошедшие 70 лет – задача практически невыполнимая, в том числе учитывая закрытость некоторых работ. Поэтому мы обратим внимание лишь на несколько, с нашей точки зрения, интересных работ, проведенных в последние 5–10 лет.

Исследования свойств материалов на одноступенчатой легкогазовой пушке

В практике газодинамического эксперимента для создания ударных нагрузок широко используются метательные устройства пушечного типа, в которых метаемое тело (снаряд) перемещается в трубе под действием сжатого газа. Такие устройства позволяют создать широкий спектр механических нагрузок.

Сотрудниками отдела 0304 ИФВ создан комплекс для исследования материалов при ударном нагружении, состоящий из легкогазовой пушки (рабочий газ – гелий), методик ПВДФ-датчика динамического давления и радиоинтерферометра, устройства для определения скорости снаряда. Комплекс активно используется в плановых научно-исследовательских работах отдела. Размещен он в одном из помещений СарФТИ НИЯУ МИФИ. На его базе в институте создана учебно-научная лаборатория перспективных методов диагностики экстремальных веществ (руководитель, в прошлом сотрудник отдела 0304, д. ф.-м. н. В. А. Борисенко). В ней проводятся экспериментальные исследования возможности образования локальных электрических пробоев в диэлектриках при воздействии только ударных волн, создан стенд для исследования элементов микроэлектроники на стойкость к перегрузкам.

Комплекс используется также в качестве лабораторного стенда для обучения студентов и аспирантов современным методам экспериментальной газодинамики. Комплекс позволяет проводить исследования материалов при скоростях соударения до 1 км/с с регистрацией профилей свободной поверхности и давления с наносекундным временным разрешением. Общий вид комплекса приведен на рис. 1.

Для обеспечения безопасного и удобного проведения экспериментов разработана система



Рис. 1. Общий вид комплекса

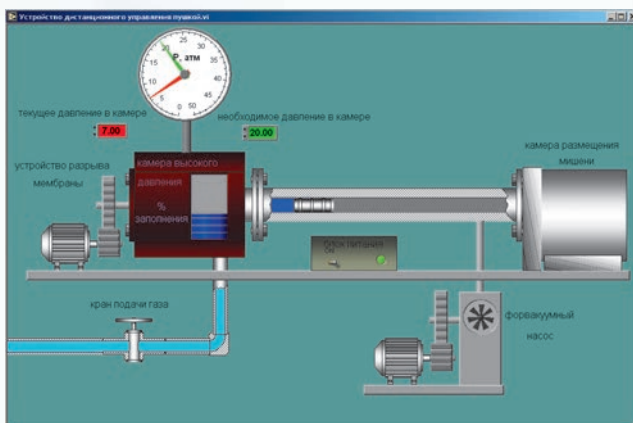


Рис. 2. Окно программы управления пушкой

дистанционного управления устройствами, входящими в состав комплекса. Окно программы управления пушкой приведено на рис. 2.

В составе комплекса используется метод ПВДФ-датчика динамического давления, разработанный в отделе и описанный в работе «ПВДФ-датчик динамического давления» в журнале «Приборы и техника эксперимента» (2008, № 5, с. 113–121).

Датчик изготовлен на основе тонкой пленки (20–30 мкм) сегнетоэлектрического полимера поливинилиденфторида, имеет временное разрешение 5–10 нс, чувствительную зону 4 мм² (рис. 3). Сотрудниками отдела разработана физи-

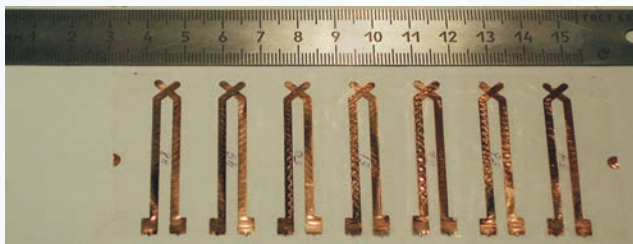


Рис. 3. ПВДФ-датчики давления

ческая модель датчика (ФГВ, 2003, с. 109–115, «ПВДФ-датчик динамического давления: физическая модель и результаты экспериментов»). Датчик используется для исследования фазовых превращений, измерения скоростей звука в ударно-сжатом веществе и решения других газодинамических задач.

ПВДФ-датчик в электрическом отношении является импульсным источником тока. При механическом воздействии на его рабочую зону он генерирует импульс тока, который и несет информацию об амплитудно-временных характеристиках импульса давления.

Особенностью ПВДФ-датчика является то, что его ток пропорционален производной давления по времени. Поэтому на осциллограмме тока (рис. 4, а) четко выражены временные интервалы, соответствующие различным составляющим профиля давления: упругому предвестнику – пластической волне – области постоянного течения – упругой разгрузке – пластической разгрузке – откольному разрушению (рис. 4, б).

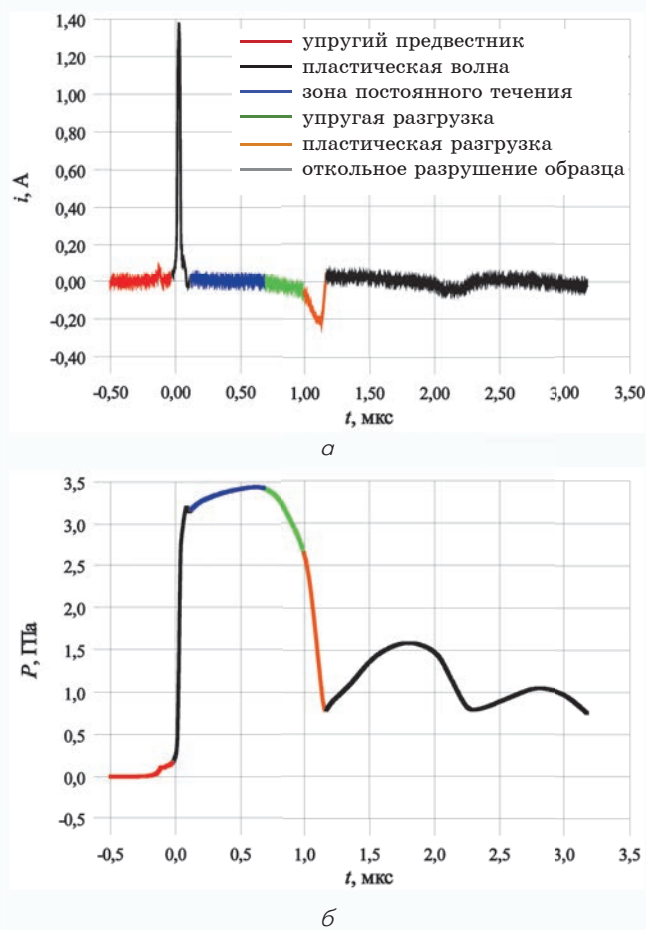


Рис. 4. Зависимости тока от времени (а) и давления от времени (б) в алюминиевой мишени, скорость снаряда 450 м/с

На комплексе проводится широкий спектр экспериментов по исследованию откольного разрушения и последующего компактирования различных конструкционных материалов. Пример расчетного моделирования экспериментов на откол показан на рис. 5.

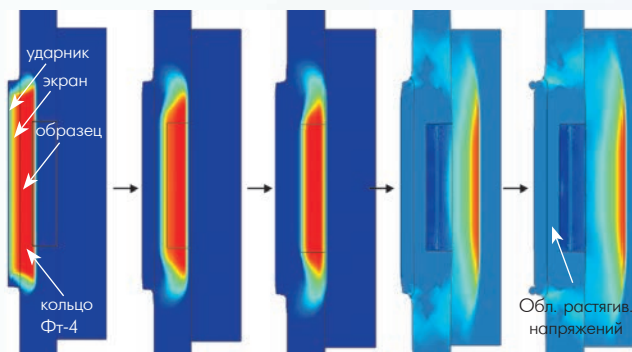


Рис. 5. Результаты двумерного расчета: распространение ударной волны, волн разрежения и образование области растягивающих напряжений

На рис. 6 приведены типичные результаты металлографического анализа образца меди с откольной поврежденностью и образца после компактирования этой поврежденности.

Много экспериментов проводится по исследованию фазовых превращений под действием ударных волн. В рамках сотрудничества с Лос-Аламосской национальной лабораторией выполнены 4 проекта и получены данные по структурам ударных волн и фазовым переходам церия, олова и титана. В церии зарегистрирована, представленная на рис. 7, двухволновая структура, состоящая из головной волны сжатия, за которой следует ударная волна. Выход волны с таким сложным профилем на свободную поверхность образца приводит к образованию ударной волны разрежения и откольным повреждениям. Гладкость откольных фрагментов свидетельствует о том, что в церии действительно формируется ударная волна разрежения.

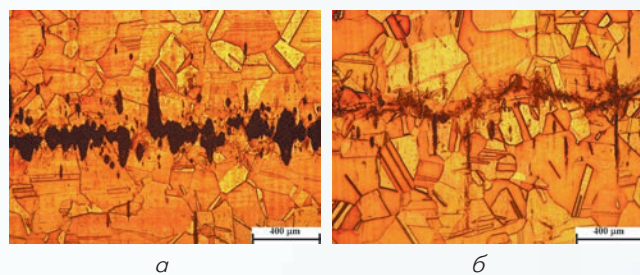


Рис. 6. Результаты металлографического анализа медных образцов: образец-свидетель с отколом (а) и образец после опыта на компактирование (б)

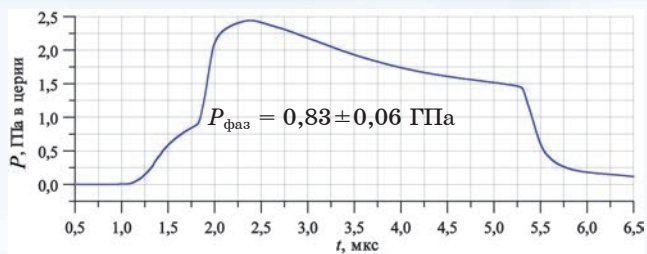


Рис. 7. Зависимость давления от времени в церии

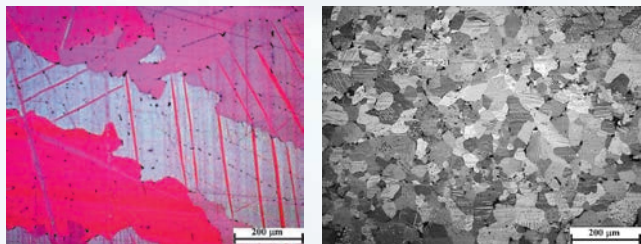


Рис. 8. Структура исходного образца висмута и образца после нагружения до $P = 1,7$ ГПа и $T = 233$ °C

Значительную часть времени сотрудники отдела уделяют поискам решений по расширению функциональных возможностей описанного ударно-волнового комплекса. Из числа последних можно отметить методику по регистрации ударно-волновых фазовых превращений предварительно нагретых до нескольких сотен градусов легкоплавких металлов. Получены первые результаты при исследовании плавления висмута при кратковременном ударно-волновом нагружении давлениями от 1,7 до 2,4 ГПа в капсулах, обеспечивающих сохранность образцов. Измельчение зерен в постопытном образце по сравнению с зернами в исходном состоянии (рис. 8) является следствием плавления висмута в ударной волне с последующей кристаллизацией при разгрузке.

Ударное сжатие силикатов и гипотеза о процессах в мантии Земли

Около 60 лет назад в отделе начались активные исследования ударного сжатия различных минералов и горных пород. Интерес и необходимость подобных исследований диктовались двумя главными причинами: 1) техническими задачами, связанными с применением гидродинамического метода измерения энерговыделения ядерных зарядов при их подземных испытаниях, 2) проблемами внутреннего состава мантии нашей планеты.

Потенциально входящие в состав мантии Земли силикаты, к которым относятся кварц, оливин, энстатит и др., исследованы при давлениях

P до 100 ГПа. Совместный анализ результатов, полученных в отделе, с данными других авторов выявил ряд существенных особенностей, не свойственных большинству других веществ (например, металлам). К их числу относятся взаимные пересечения в P - V координатах (V – объем) ударных адиабат, отвечающих различной начальной плотности образцов, в широком (примерно несколько десятков ГПа) интервале давления, террасовидный ход ударных $P(V)$ -зависимостей (на «террасе» величина $|dP(V)/dV|$ относительно мала) и др. Отличительной чертой ударных адиабат является плавный характер. Изломы, наблюдаемые при фазовом превращении первого рода (со скачком объема), на ударных $P(V)$ -зависимостях отсутствуют. Поскольку ударные нагрузки способствуют аморфизации исходно кристаллических силикатов (а исходно аморфные в нем и остаются), то плавное поведение ударных $P(V)$ -зависимостей можно связать с непрерывным характером уплотнения силикатов (которое протекает более интенсивно на «террасе») в однофазном аморфном состоянии. Возможное объяснение названных особенностей состоит в проявлении веществом отрицательного коэффициента расширения $\beta = (\partial V/\partial T)_P/V$ (T – абсолютная температура). Отрицательная область β является ограниченной, отвечающие ей P , T -параметры по порядку величины соответствуют условиям в верхней мантии (ВМ). За ее пределами ударные $P(V)$ -зависимости не пересекаются друг с другом (как и у большинства других исследованных веществ), что объясняется восстановлением здесь нормального свойства вещества $\beta > 0$.

Плавные ударные адиабаты силикатов свидетельствуют в пользу реализации также плавных распределений по глубине h плотности $\rho(h)$ и скорости звука $C(h)$. Такие зависимости имеют место в ряде моделей Земли (например, А. Буллена, Ванга, В497), построенных на основе данных сейсмологии и некоторых других фактов (т. к. восстановление $\rho(h)$ - и $C(h)$ -распределений не однозначно, то возможно их представление как плавными, так и разрывными функциями). Как пример плавного распределения, на рис. 9 дана $\rho(h)$ -зависимость для модели В497, взятая из книги известного геофизика А. Буллена, который считал эту модель близкой к оптимальной.

Ее особенностью является сильное возрастание плотности на участке 1–2 (при $h \approx 200$ –1000 км, чему отвечает $P \approx 6$ –40 ГПа), которое в предположении однородности вещества мантии можно объяснить свойством $\beta < 0$. В случае $\beta < 0$ и $(dT/dh) > 0$ конвекция отсутствует.

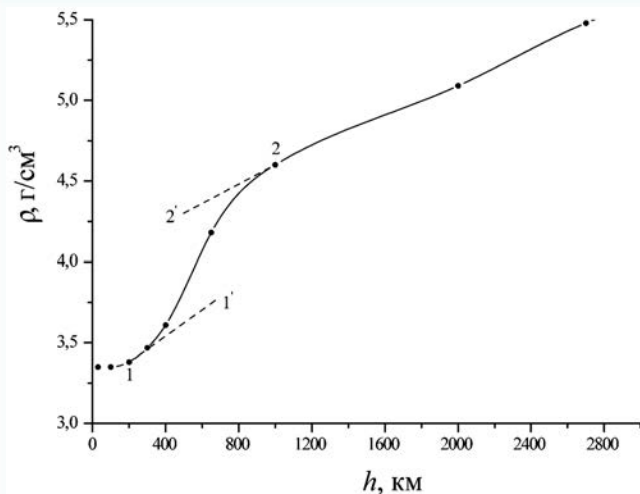


Рис. 9. Зависимость плотности (ρ) от глубины (h) в среде мантии Земли по модели В497

Известно, что на дне океанов и их границах с континентами широко распространены линейные системы островных дуг (ОД) и смежных впадин, расположенных по обе стороны от ОД (иногда опущенной ниже уровня моря). Системы островных дуг делятся на относительно симметричные и ассиметричные. В первом случае впадины приблизительно одинаковы. К симметричным относятся системы, связанные с хребтами Маккуори, Императорским, Соломоновыми островами (рис. 10). В ассиметричном случае между впадинами имеются количественные отличия. Впадина наибольшей глубины называется глубоководным желобом (ГЖ; глубина до ≈ 10 км), наименьшей – задуговой (ее глубина

с учетом осадочного слоя нередко не сильно меньше ГЖ). Типичным примером является Курильская ОД-система. Ширина ОД до ~ 100 км, длина до ~ 1000 км, возраст до ~ 100 млн лет. Для ОД-систем характерны высокие значения теплового потока, магматическая и вулканическая активность и, как правило, повышенная сейсмичность (в отдельных случаях с глубиной землетрясений до ≈ 850 км). Возможно, причина происхождения обоих видов ОД-систем одинакова. На настоящем этапе при формировании рельефа дна океанов, в том числе в районах ОД, определяющими являются вертикальные движения, сопровождающиеся многокилометровым опусканием верхней поверхности коры. При этом ОД тонут, в основном, за счет погружения их обоих склонов. Как говорится в одной из работ «эти склоны еще "вчера" были шельфами, а еще ранее – участками палеостровной суши». В ряде публикаций отмечается, что совместно с процессом уменьшения поднятия ОД идет процесс увеличения площади (ширины) и глубины смежных впадин.

При интерпретации особенностей рельефа поверхности Земли в настоящее время широко используется концепция тепловых мантийных плюмов (больших масс перегретого по отношению к среде вещества), зарождающихся в глубинах мантии, возможно на границе нижней мантии (НМ) с ядром, которые всплывают в ВМ до коры. Для теплового плюма в настоящее время нет устоявшегося определения. Далее под плюмом понимается перегретое по отношению к ис-

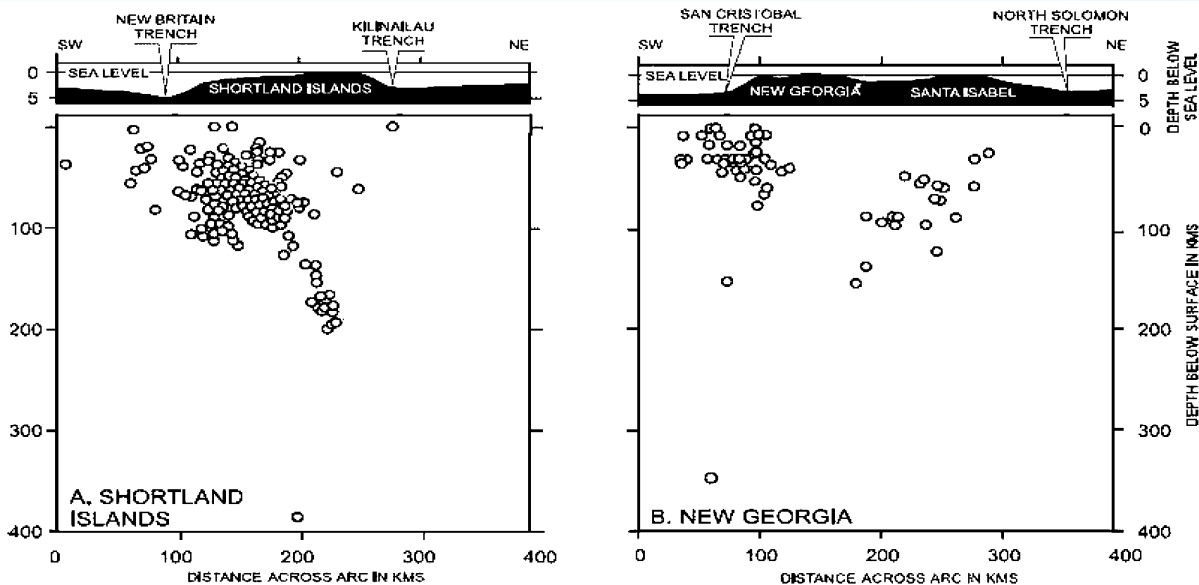


Рис. 10. Рельеф поверхности в двух (А, В) вертикальных сечениях Соломоновой ОД. Кружки – гипоцентры землетрясений

ходной среде однородной мантии вещество близкого к ней состава. При объяснении ОД плюм рассматривается в виде вертикальной пластины (плюм-пластина), характеризуемой высотой H порядка размера ВМ (≈ 1000 км), шириной $2x_0$ и длиной L порядка горизонтальных размеров островной части ОД ($x_0 \ll H, L$). Предполагается, что вещество среды, коры и плюма (в целом) обладает реологическими характеристиками (прочность, вязкость) твердотельного типа (у перегретого плюма они понижены). Эти свойства поддерживают особенности рельефа, обусловленные величиной плавучести вертикальных H -слоев (H -слой плюма и среды, исходной или нагретой от плюма, имеет высоту H , малую толщину dx и длину L).

Обычно считается, что вещество среды и теплового плюма обладает положительным коэффициентом расширения. Тогда плюм всегда легче исходной среды. В этом случае после его всплытия (во время $t = t^0 = 0$) над ним следует ожидать реализации поднятия верхней поверхности коры $\Delta H_2 > 0$ (символом «2» обозначено максимальное начальное значение ΔH), чем можно объяснить формирование островной части ОД-системы (рис. 11, а; рассматривается упрощенная ситуация, когда при $t = t^0 = 0$ плавучесть всех H -слоев плюма одинакова). В последующем ($t > 0$) всплывший плюм-пластина будет остывать. Линейные размеры области существенного изменения температуры (и как следствие плотности, обуславливающей плавучесть) по горизонтали Δx (в направлении x , перпендикулярном пластине) и вертикали Δz определяются величиной $\sim (\chi t)^{0,5}$, где χ – коэффициент температуропроводности. При $t \approx 100$ млн лет значения $\Delta x, \Delta z \sim 100$ км (при ориентировочном для ВМ значении с $\chi \approx 0,01$ см²/с). Если $t \leq 100$ млн лет (время существования ОД), то $\Delta z \ll H$ (~ 1000 км), вследствие чего влияние изменения плотности при вертикальном остывании (в частности, через кору) на исходную плавучесть всех вертикальных H -слоев плюма мало. Плавучесть, однако, существенно изменяется в двух областях шириной Δx при горизонтальном теплообмене плюма-пластины со средой, влияющем на температуру и плотность H -слоев по всей их высоте H . При $\Delta x \sim x_0$ этот процесс изменяет исходную плавучесть всех H -слоев плюма. Горизонтальный теплообмен является также определяющим для изменения плавучести вертикальных H -слоев среды, нагретых от всплывшего плюма в двух областях шириной Δx . При $x_0 \ll H, L$ он будет осуществляться посредством

двух плоских тепловых волн. В них со временем будут изменяться средние (по h от низа до верха плюма) значения температуры $\bar{T}_H(x, t)$ и плотности $\bar{\rho}_H(\bar{T}_H(x, t))$ различных (имеющих координату x в направлении, перпендикулярном пластине) вертикальных H -слоев плюма и среды (они характеризуются одной $\bar{\rho}_H(\bar{T}_H)$ -зависимостью и обладают одинаковым качеством плавучести). В каждой из них можно выделить два участка – волну охлаждения, распространяющуюся к центральной плоскости пластины плюма от ее границы со средой, и волну нагрева исходной среды (рис. 11, а). В волнах охлаждения реализуется постепенное уменьшение (начиная с границ) температуры H -слоев плюма от начальной $\bar{T}_{H,2}$ (характеризующей H -слой плюма в момент $t^0 = 0$) до некоторой текущей $\bar{T}_H(x, t)$. Исходное поднятие ΔH_2 над остывающими H -слоями плюма со временем уменьшается. Волны нагрева будут изменять среднюю температуру H -слоев среды от исходного ($t^0 = 0$) значения $\bar{T}_{H,0}$ («0» – исходная среда) до более высокого значения $\bar{T}_H(x, t)$. Это приводит к поднятию $\Delta H(x, t) > 0$ (разного уровня) в среде (при изостатическом равновесии $\Delta H = (1 - \bar{\rho}_H(\bar{T}_H(x, t)) / \bar{\rho}_H(\bar{T}_{H,0}))H$). Реализуемый в волнах охлаждения и нагрева рельеф $\Delta H(x, t)$ для сравнительно малых моментов времени t^1, t^2 и большого t^3 схематически показан на рис. 11, а. Модельная ОД-система является куполообразной (пока привнесенное плюмом тепло полностью не рассеется). Наклонное положение плюма в ВМ может лишь модифицировать купол. Таким образом, в рассмотренном модельном случае ($\beta > 0, \bar{\beta}_H > 0$) смежные впадины ОД-систем отсутствуют.

Другой случай (рис. 11, б) реализуется при немонотонной $\rho_H(T_H)$ -зависимости, которая подобна $\rho(T)$ -зависимости для воды при $P = 1$ атм, качественно показанной на рис. 12. Немонотонность обусловлена проявлением в интервале $T_{H,0} - T_{H,\text{MAX}}$ свойства $\beta < 0, \beta_H < 0$. Тогда всплыть в исходной среде ВМ до коры и выталкиваться из нее в подкоровом положении ($\Delta H_2 > 0$) может только горячий плюм, характеризуемый $\bar{T}_{H,2} > \bar{T}_{H,1}$. Значение ΔH_2 тем больше, чем лучше (при $H = \text{const}$) выполняется условие $\bar{T}_{H,2} > \bar{T}_{H,1}$. При $t \sim t^1, t^2$ волны охлаждения плюма вызовут постепенное, начиная с границ, уплотнение и проседание его H -слоев (т. к. в это время уменьшение характеризующей их величины $\bar{T}_H(x, t)$ происходит в интервале $\bar{T}_H > \bar{T}_{H,\text{MAX}}$, где $\bar{\beta}_H > 0$). Образование при $t \sim t^1, t^2$ двух, показанных на рис. 11, б, пограничных впадин (впадин стыка) связано с переходом в

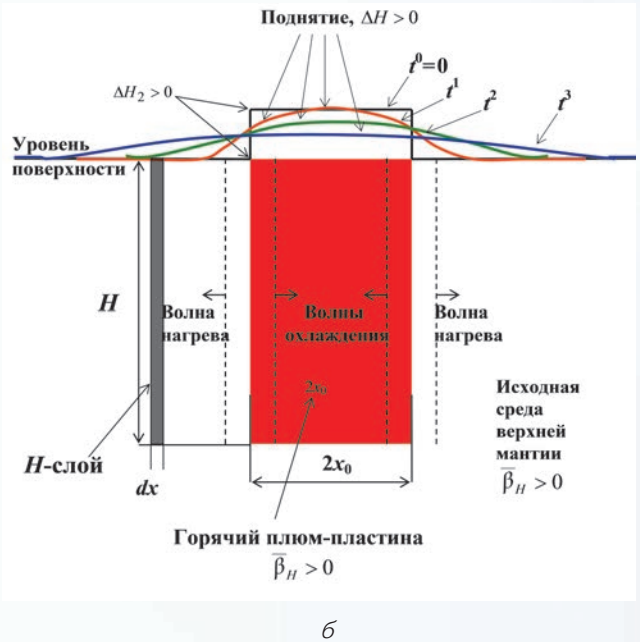
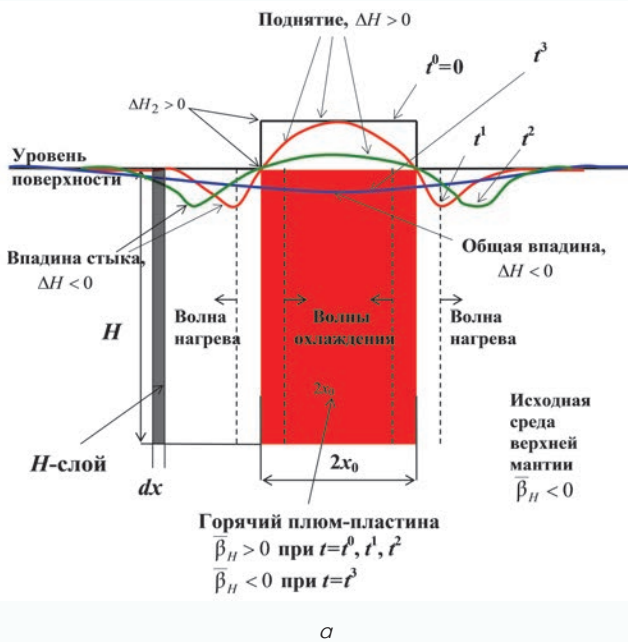


Рис. 11. Схема изменения уровня поверхности со временем в окрестности вертикального плюма-пластины, расположенного в нормальной (а) и аномальной (б) среде ВМ, вследствие горизонтального теплообмена плюма средой

волна нагрева H -слоев среды в теплое плотное состояние $\bar{T}_{H,0} < \bar{T}_H(x, t) < \bar{T}_{H,1}$. Максимум впадины стыка соответствует реализации в перегретом H -слое среды условия $\bar{T}_H(x, t) = \bar{T}_{H,MAX}$ (тогда $\bar{\rho}_H(\bar{T}_H(x, t)) = \bar{\rho}_{H,MAX}$). По мере движения тепловых волн нагрева, впадины стыка все более расширяются. При $t = 1$ млн лет величина $\Delta x \approx 10$ км, при $t = 100$ млн лет – $\Delta x \approx 10$ км. В случае $t \sim t^3$ все H -слои плюма и прогретой им среды перейдут в теплое плотное состояние, вследствие чего образуется показанная (упрощенно) на рис. 11, б общая впадина (вместо об-

щего поднятия на рис. 11, а). Две симметричные линейные модельные впадины стыка (рис. 11, б) можно трактовать как смежные впадины симметричных ОД-систем. Представляется, что для ассиметричных ОД-систем смежные впадины обусловлены той же причиной, но искажены наклонным положением плюма-пластины под ОД. Таким образом, рассмотренная модель позволяет качественно объяснить образование островной дуги и двух смежных с ней впадин, погружение со временем первой и расширение вторых.

Отметим, что если тепловой плюм представляет собой цилиндр высотой H и радиусом x_0 , то над местом его всплытия сначала образуется поднятие, затем, при остывании и переходе плюма в теплое плотное состояние – круглая впадина. Этим можно объяснить образование крупных поверхностных кратеров.

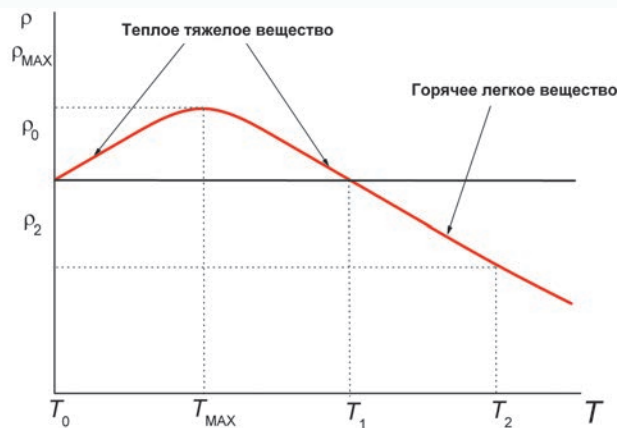


Рис. 12. Качественная зависимость плотности (ρ) от температуры (T) для аномального вещества типа воды. Для воды при атмосферном давлении: $T_0 = 273$ К, $T_{MAX} = 277$ К, $T_1 = 281$ К. T_2, ρ_2 – температура и плотность горячего легкого вещества (относительно T_0, ρ_0)

ЖЕРНОКЛЕТОВ Михаил Васильевич – начальник отдела ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ, доктор физ.-мат. наук, профессор, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники

МЕДВЕДЕВ Александр Борисович – ведущий научный сотрудник ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ, доктор физ.-мат. наук, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники

СИМАКОВ Владимир Геннадьевич – ведущий научный сотрудник ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ, кандидат физ.-мат. наук