

**Национальная академия наук Украины
Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного**

Б.А. ТРОШЕНЬКИН

ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГИЯ

В 2-Х ЧАСТЯХ

ЧАСТЬ II

**ТЕРМОДИНАМИКА ЛИТОСФЕРЫ.
ГЕОТЕРМИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

Харьков
Издательство “ФОРТ”
2004

УДК 523.9+524.6+551.14:550.83+621.311.22:551.23+621.484/.484

ББК 31.55

Т-76

Рецензенты:

А.Л. Шубенко, доктор технических наук, профессор, зав. отделом оптимизации процессов и конструкций турбомашин ИПМаш НАН Украины;

В.П. Шапорев, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой химической техники и промышленной экологии Национального технического университета “ХПИ”.

Рекомендовано к печати ученым советом Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного (протокол № 4 от 9 июля 2003 г.)

Трошенькин Б.А.

Т-76 Возобновляемая энергия. В 2-х частях. — Ч. 2 — Термодинамика литосферы. Геотермические электростанции. — Национальная академия наук Украины. Ин-т пробл. машиностроения им. А.Н. Подгорного. — Х.: Изд-во “Форт”, 2004. — 156 с.

ISBN 966-02-3053-2

ISBN 966-02-3055-9 (Ч. 2)

ISBN 966-8599-04-7

С момента своего появления развитие Солнечной системы и, в частности, Земли происходит в строгом соответствии с законами термодинамики. Эти законы диктуют поведение океанских вод, земной коры и живой природы. В монографии на основе *i*-термодинамики раскрыто влияние океанических и атмосферных течений на скорость вращения Земли, дано объяснение древним наводнениям и оледенениям, установлен химический состав атмосферы в период образования месторождений угля, нефти и газа. Определены места расположения океанических электрических станций, не нарушающих климат на Земле. Обоснованы наиболее эффективные способы извлечения природной энергии. В свою очередь, *μ*-термодинамика открыла возможность оценки скорости формирования земной коры и связанных с ней периодов извержений вулканов и землетрясений. Сейсмические зоны, как правило, соответствуют источникам геотермального тепла. Дан анализ циклов энергоустановок, использующих тепло Земли.

Расчитана на специалистов, занимающихся энергетикой и физикой Земли, а также любителей геофизики, обладающих серьезной подготовкой. Может быть полезна студентам вузов.

УДК 523.9+524.6+551.14:550.83+621.311.22:551.23+621.484/.484

ББК 31.55

ISBN 966-02-3053-2

ISBN 966-02-3055-9 (Ч. 2)

ISBN 966-8599-04-7

© Трошенькин Б.А., 2004

© Издательство “Форт”,
оригинал-макет, 2004

ВВЕДЕНИЕ

Продолжим наше знакомство с удивительным миром природы.

Как нам уже известно, наблюдаемые в атмосфере и океане процессы происходят за счет солнечной энергии. Основную часть поступающей на Землю солнечной радиации воспринимает Мировой океан. Расчеты подтвердили промышленное значение этой энергии, что позволило нам обосновать строительство океанических электростанций (ОЭС). Предложено разместить ОЭС в экваториальной зоне, что, очевидно, не нарушит экологическое равновесие на Земле.

Наша следующая цель — освоить второй по значению источник энергии — тепло земных недр. Для этого необходимо решить примерно те же задачи, что и в первом случае, а именно: определить места размещения источников подземного тепла, доказать их промышленное значение, подобрать электростанции соответствующей мощности и подтвердить экологическую безопасность принятой технологии производства электроэнергии.

Для решения поставленных задач нам желательно знать закономерности генерирования тепла в земных недрах.

В поисках источников тепла опустимся на несколько километров вглубь Земли. Замысловатое распределение породообразующих минералов, открывшееся перед нами, говорит о том, что для его расшифровки нам следует знать отдельные стадии развития Земли.

Очевидно, что первым этапом нашего исследования должно стать изучение закономерностей вращения раскаленного сгустка вещества, из которого в дальнейшем образовалась Земля. Именно первоначальный момент количества движения, полученный Протоземлей в ходе своего возникновения, оказал решающее влияние на расслоение планеты и формирование материков в период ее остывания.

Таким образом, ближайшая наша цель — найти скорость вращения Протоземли и жидкой Земли.

Решая поставленную задачу, мы должны рассмотреть переход вещества Земли из звездного состояния в планетное, а затем из жидкого состояния в кристаллическое.

Итак, занимаясь чисто практическими вопросами, касающимися энергетики, мы вынуждены погрузиться в море космогонических гипотез [1—9]. Но данное обстоятельство не должно нас особенно смущать, поскольку направление нашего исследования мы сверяем с надежным “компасом” — законами преобразования энергии.

Прежде всего, обратимся лишь к тем моделям космических и земных явлений, развитие которых в изолированном состоянии сопровождается ростом энтропии S . В этих системах малому отклонению от состояния равновесия соответствуют отрицательные значения изменения энтропии, т.е.

$$\Delta_i S < 0,$$

последнее обстоятельство связано с тем, что при равновесии энтропия достигает своего максимального значения. Отсюда отрицательные значения $\Delta_i S$ служат критерием устойчивости изолированной системы.

Напомним, что при исследовании спонтанных эффектов методами равновесной i -термодинамики нам пришлось учитывать рост энтропии в реальных циклах введением в расчетные зависимости внутреннего КПД $\eta_{\text{вн}}$ циркуляционных контуров. Причем циркуляция в каждом контуре рассматривалась как локальное явление, не оказывающее динамического воздействия на окружающую среду.

Между тем развитие природных процессов обеспечивается, как правило, кооперативным действием большого числа циркуляционных ячеек, согласовывающих свое движение друг с другом и взаимодействующих с окружающей средой. Возникающие гидродинамические структуры находятся вдали от равновесия. Как известно, устойчивость неравновесных стационарных состояний достигается в том случае, если производная по времени от второй вариации энтропии является положительной величиной, т.е.

$$\frac{d}{d\tau} \frac{\delta^2 S}{2} > 0.$$

Наложенное на системы ограничение выполняется в диапазоне максимальной скорости производства и диссипации энергии. Диссипация, как известно, относится к категории необратимых процессов. Но в отличие от таких физических явлений, как диффузия или теплопроводность, где происходит простое перераспределение энтропии и некоторый ее рост, в “диссипативных” системах энтропия производится. Производство энтропии — это локальная скорость ее возникновения.

Вводя в расчеты величину $\delta^2 S$, мы, тем не менее, все еще остаемся в пределах действия принципов i -термодинамики. Каждому из исследованных нами эффектов (гравитационный, ротационный и компрессионный) соответствует своя гидродинамическая структура, отличающаяся определенным расположением потоков в пространстве и величиной скорости течения. Эти отличия продиктованы характером поступления энергии в оболочки планет извне, от Солнца (за исключением Юпитера, где есть также

поступление из недр). Мощное выделение энергии в ядрах галактик и недрах звезд ведет к наложению гравитационного эффекта на ротационный и компрессионный, что сопровождается возникновением в их внешних оболочках своеобразных газодинамических структур. С особенностями этих структур мы познакомимся, моделируя процессы распределения потоков на экспериментальных стендах.

Как Вы уже обратили внимание, основные закономерности ротационного эффекта, действующего на планетах, нам удалось вскрыть лишь после испытаний сравнительно сложной испарительной установки, с конструкцией которой, впрочем, можно разобраться, привлекая принципы симметрии.

Экспериментальные стенды для моделирования газодинамической обстановки на Солнце также не отличаются особой простотой, но в их конструкции гораздо четче будут проявляться элементы симметрии. Результаты испытаний позволят нам сформулировать топологические ограничения, накладываемые на вновь возникающие в космосе системы после взрыва небесных объектов. Под взрывом здесь подразумевается поведение диссипативных структур в резко выраженном переходном процессе.

Известно, что стационарные процессы отличаются незначительным изменением своих параметров. Но по мере накопления этих изменений создаются условия для бурной перестройки динамических структур. К нестационарным (или переходным) процессам относятся также изученные нами спонтанные эффекты, но у них более плавные, чем при взрыве, переходы систем из одного состояния в другое.

Основное усилие во второй части книги мы направим на исследование именно переходных процессов, поскольку сегодняшний лик Земли в значительной мере сложился под их влиянием. Сведения о переходных процессах являются основой для расчета крутящего момента как Протоземли, так и жидкой Земли.

Нам хотелось бы еще раз подчеркнуть, что располагаемый момент количества движения определил последовательность образования материков и закономерности расслоения вещества Земли.

Далее, при изучении космических объектов мы, безусловно, столкнемся со всем многообразием химических, ядерных и субъядерных реакций, а также с различного рода фазовыми превращениями.

Здесь следует учитывать, что о механизме субатомных реакций, протекающих в недрах наиболее массивных небесных тел при сверхвысоких температурах и давлениях, на данный момент времени мало что известно. Поэтому об их интенсивности мы вынуждены судить лишь по характеру

расположения массы вещества, выброшенного в окружающее пространство при взрыве.

Более определенно можно говорить о превращениях элементов и их соединений на Земле и отчасти на Солнце. В этом случае критерием реальности процессов в закрытых системах при постоянных T и P являются отрицательные значения величины ΔGi . Изобарно-изотерический потенциал ΔGi получил широкое применение благодаря тому, что в нем учитываются изменения как энтальпии, так и энтропии системы. Устойчивость состояния записывается в этом случае в виде выражения

$$\delta^2 Gi > 0.$$

Поскольку удельные значения ΔGi есть не что иное, как химический потенциал, то это означает, что в своих исследованиях мы перемещаемся уже в область действия равновесной μ -термодинамики.

Но нас не в меньшей мере интересуют неравновесные процессы, осложненные химическими реакциями. В этой области физико-химии, называемой кинетикой, пока безраздельно господствуют эмпирические методы исследований, весьма далекие от приемов термодинамики.

Между тем, в большинстве случаев скорость фазовых и химических превращений под землей зависит от изменения химического потенциала конкретной открытой системы. Для доказательства данного положения нам придется использовать результаты испытаний испарителей и реакторов различного типа. Причем предпочтение в последнем случае будет отдаваться реакторам высокого давления. Эти же исследования позволят нам уточнить термодинамические критерии устойчивости рассматриваемых систем.

Наконец, у нас установилась добрая традиция сравнивать процессы, происходящие на Земле, с аналогичными процессами на ближайших планетах. Логика здесь проста: Солнечная система образовалась как единое целое в одном глобальном событии и поэтому законы преобразования энергии должны быть справедливы для любой планеты. Если же энергетическая сторона какого-либо процесса не соблюдается на одной из планет, то это означает, что данный процесс невозможен и на других планетах.

Внесенные ограничения значительно сужают область нашего научного поиска, что дает нам возможность сосредоточить свое внимание на наиболее вероятных природных процессах. В итоге удастся составить физически обоснованный эскиз сегодняшнего строения Земли и выбрать тип реакций, протекающих в ее глубинах. Тем самым открывается путь к решению стоящих перед нами энергетических задач.

Попутно нам предстоит решить ряд экологических проблем, поскольку станции оказываются в зонах наибольшей сейсмической активности Земли.

Несколько обособленно выглядит здесь проблема образования месторождений нефти и газа, затронутая в послесловии. Но поскольку формирование этих месторождений входит составной частью в естественный цикл обсуждаемых природных процессов, то нам пришлось уделить ему некоторое внимание.

Вышедшая в прошлом году первая часть данной книги была благожелательно встречена научной общественностью многих стран. К сожалению, каких-либо замечаний не было, поэтому не оказалось возможным поместить в приложении ко второй части материалы дискуссии.

При проведении многочисленных экспериментов автор сотрудничал со многими специалистами, фамилии которых зафиксированы в совместно опубликованных статьях, авторских свидетельствах и патентах. Автор приносит этим специалистам сердечную благодарность.

Особенно благодарен автор кандидату технических наук В.Б. Трошенькину, составившему разделы 3.3.1—3.3.3 настоящей книги.

Здесь же автор выражает свою признательность рецензентам и редакторам.

ПЕРЕХОД ВЕЩЕСТВА ЗЕМЛИ ИЗ ЗВЕЗДНОГО В ПЛАНЕТНОЕ СОСТОЯНИЕ

Вначале приведем мнения ведущих специалистов в этой области знаний. В.А. Амбарцумян полагал, что при изучении эволюции того или иного объекта важно исходить не из априорных допущений, а из анализа свойств данного объекта, выведенных на основе обобщения данных наблюдений.

Так, наблюдая расширение и распад звездных ассоциаций, В.А. Амбарцумян установил факт разлетания звезд из некоторых центров звездообразования. Отсюда им был сделан вывод о том, что звезды формируются из тел малых размеров и высокой плотности. В частности, дозвездное вещество ядер гигантских галактик производит огромные потоки частиц высоких энергий, способных выбросить значительные массы на большие расстояния. После выброса из ядра масса вещества превращается в конгломераты звезд, межзвездного газа и облаков частиц с высокими энергиями.

Имеется тесная связь между процессом деления первоначального ядра и образованием спиральных рисунков. Здесь уместно привести одно из высказываний В.А. Амбарцумяна: “Факты доказывали, что возникновение туманностей из звезд — довольно распространенное явление. Наоборот, мы не знаем пока ни одного случая, когда из диффузной материи возникал бы плотный объект, хотя такие переходы, допускавшиеся в старых космогонических гипотезах, допускаются и во многих распространенных до сих пор космогонических теориях” [1, 2].

А.Е. Ферсман представлял себе ход эволюции Земли таким образом: “Нам здесь хочется остаться в области фактов и наблюдений. Для понимания истории Земли и ее химии мы не можем очень далеко уходить от современного момента. В ее жизни мы различаем как бы три эпохи: молодой возраст — звездный, в котором ее жизнь была частью жизни Солнца в условиях своеобразных звездных процессов миллионных температур, разреженных газов и явлений излучений. Взрослый возраст ее самостоятельной

жизни — все еще космический, но уже в условиях поисков новых форм равновесия и образования оболочек и ядра. Наконец, наступила ее старость — эпоха геологического развития, единственная ясная для нас и сравнительно короткая эпоха, примерно в два миллиарда лет. Так или иначе, но сейчас Земля есть физико-химическая система, которая пришла к современному состоянию путем длительного звездного, планетарного и геологического процесса” [2].

Приведем еще ряд высказываний по затронутому вопросу. Коксохимические данные, в частности, соответствие химического состава Солнца (за исключением водорода и гелия) химическому составу Земли и метеоритов позволили А.П. Виноградову высказать предположение о том, что тела Солнечной системы образовались из вещества, выброшенного непосредственно Протосолнцем [2, 3]. В какой-то мере гипотеза В.А. Амбарцумяна перекликается с представлениями С. Хокинга, полагающего, что наше Солнце является звездой второго или третьего поколения, образовавшейся из облака вращающегося газа, в котором находились осколки более ранних звезд [4].

В том и другом случае мы наблюдаем разброс вещества и рассеивание энергии в космическом пространстве, что математически выражается в росте конфигурационной и тепловой энтропий. Это дает нам право принять гипотезу В.А. Амбарцумяна за нашу рабочую гипотезу.

Отметим, что со времен И. Канта и П. Лапласа продолжается развитие идеи об образовании Солнечной системы из облака холодной или горячей пыли [5, 6, 26]. Но, несмотря на длительный период своего становления, до сих пор в известных моделях достаточно четко не выяснено происхождение источника энергии, обеспечивающего вращение газопылевого облака. Остается неясным вопрос о мощности этого источника. Тем не менее, отдельные элементы предложенных гипотез [7–9, 15] можно, по-видимому, использовать при описании процесса преобразования сгустков материи, выброшенных из ядра галактик, в звезды и планеты.

В начале нашего исследования поставим себе цель ответить на ряд перечисленных ниже вопросов.

- Какова структура потоков в оболочках ядер галактик и звезд?
- Чем вызваны взрывы небесных тел?
- Почему масса выбрасываемого в космос вещества распределяется в пространстве в виде спиральных ветвей (рукавов) и планетных систем?
- По какой причине происходит фрагментация спиральных рукавов на звезды и планеты?

— Действие каких сил приводит к сосредоточению основной части момента количества движения в выброшенной массе и лишь незначительной — в массе вещества, оставшейся в ядре?

Ответив на поставленные вопросы, можно приступить к следующей части исследования, а именно к расчету момента количества движения Протоземли.

1.1. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ЦИРКУЛЯЦИЯ ПОТОКОВ В ОБОЛОЧКЕ ПРОТОЯДРА ГАЛАКТИКИ И НА СОЛНЦЕ

Определенную ясность в оценке процесса деления материнского небесного тела на части может дать сравнительный анализ последствий сброса оболочек протоядер галактик и протозвезд. Можно не сомневаться в том, что наблюдаемые нами в небе очертания спиральных галактик и характер расположения планет в Солнечной системе отражают в развернутом, но уже дискретном виде ту картину циркуляции потоков, что сложилась в оболочках родительских небесных тел перед их взрывом.

Надо полагать, что зародыши процессов “закрутки” ветвей галактик и планетных систем должны проследиваться в динамических структурах исчезнувших потоков. Расшифровав наследственные признаки, мы сможем оценить величину и направление крутящего момента, полученного Протоземлей в момент ее отделения от Протосолнца.

При исследовании спонтанных эффектов мы уже получили некоторое представление о закономерностях циркуляции потоков в газожидкостных оболочках планет. Как Вы уже знаете, гравитационный эффект обеспечивал вынос энергии в радиальном направлении, ротационный — в меридиональном, а компрессионный — в широтном [10]. Те же процессы, очевидно, происходят в ядрах и звездах, где циркулируют газоплазменные потоки с более высокой и более низкой температурой по отношению к некоторой усредненной температуре основной массы оболочек.

При расчете естественной циркуляции мы должны учитывать различия в процессах, происходящих, например, на Земле и Солнце. Так, испарение нам необходимо заменить на ионизацию, т.е. переход вещества при высоких температурах из газообразного состояния в плазменное, а конденсацию — на реионизацию. В данном случае под этим подразумевается обратный переход вещества при пониженных температурах из плазменного в газообразное состояние.

Проследим, как трансформируются эти эффекты в условиях, царящих в оболочках ядер галактик и звезд.

1.1.1. Предполагаемая структура потоков в оболочке протоядра Галактики

Галактика — сложная звездная система, состоящая из сотни миллиардов звезд, а также пыли и газа. Основная часть звезд и газа и почти вся пыль сосредоточены вблизи главной плоскости Галактики, являющейся плоскостью ее симметрии, и составляет систему Млечного Пути. Значительное число звезд и известная доля газа образуют почти сферическую составляющую вокруг относительно компактного ядра (рис. 1).

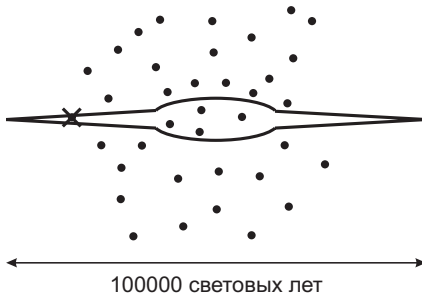


Рис. 1. Схематический вид Галактики сбоку. Показаны тонкий Галактический диск и центральное сгущение (ядро). Крестиком отмечено положение Солнца, а черными кружками изображены шаровые скопления

Ядро Галактики, будучи погружено в сравнительно плотные массы межзвездного вещества, мало доступно оптическим наблюдениям, но радиоастрономические наблюдения указывают на активность ядра, присутствие в нем больших масс вещества и источников энергии.

Для Галактики характерна неравномерность в распределении звезд, газа и пыли. Так, наблюдаются объединения звезд в четко выраженные структурные единицы — звездные скопления и звездные ассоциации, а газа и пыли — в темные и светлые туманности.

Изучение распределения туманностей и особенно звездных ассоциаций выявило спиральную структуру в расположении объектов, образующих Млечный Путь (рис. 2).

Таким образом, наша Галактика относится к классу спиральных галактик, типичным представителем которых является, например, галактика М51 (рис. 3).

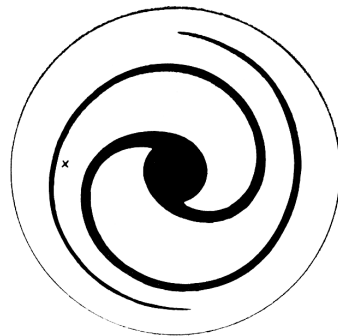


Рис. 2. Схематический вид Галактики сверху. Показана спиральная структура. Положение Солнца отмечено крестиком

Галактика обладает вращением вокруг малой оси симметрии. Законы вращения спиральных галактик во многом совпадают: ядро вращается практически как твердое тело, угловая же скорость внешних частей Галактики по мере удаления от центра сперва очень быстро падает, а затем, после небольшого нарастания, медленно убывает.

Период обращения Галактики на расстоянии от центра Галактики до Солнца близок к 200 млн. лет. Более углубленное представление о галактиках можно получить, например, из работ [5, 11–15].

Наблюдательные данные, касающиеся Галактики, позволяют сделать некоторые предварительные выводы о характере циркуляции потоков в оболочке протоядра.

Так, если мы несколько уменьшим длину спиральных ветвей на рис. 2, то мы получим те самые вращающиеся потоки (“жгуты”), что перебрасывали в оболочке протоядра “холодные” массы вещества с полюсов к экватору. Их отклонение от меридионального направления было вызвано силами Кориолиса.

Отмеченное совпадение формы и направления “жгутов” протоядра и ветвей Галактики само по себе подтверждает гипотезу В.А. Амбарцумяна. Это же обстоятельство говорит о высокой вероятности спиралевидного расположения планет в начальный момент после сброса оболочки Прото-солнца. Далее попытаемся получить полезную информацию, анализируя газодинамику Солнца.

1.1.2. Солнечная газодинамика

Солнце притягивает Землю и посылает ей свое излучение. Благодаря успехам астрофизики нам известно, что при условиях, имеющих место в недрах Солнца, вещество находится в плазменном виде и подчиняется уравнению состояния идеального газа. Сферическая симметрия газовой массы обеспечивается силами тяготения. Мы разберем здесь лишь особенности газодинамических структур, возникающих в оболочке Солнца, а подробности строения и типы реакций, протекающих в его недрах, желающие могут найти в монографиях и справочниках [16–26].



Рис. 3. Спиральная галактика М51 типа Sc с галактикой-спутником

Уникальность Солнца состоит в том, что это ближайшая к нам и единственная звезда, поверхность которой можно подвергнуть детальному анализу. Нынешняя модель газодинамической структуры в оболочке Солнца предполагает разделение потоков на отдельные ячейки, группирующиеся, в свою очередь, в виде ансамблей, схожих по конструкции с пчелиными сотами.

В толстом газовом слое конвективная зона, в свою очередь, разбивается на слои, толщина которых близка к толщине однородной атмосферы (на этом расстоянии плотность изменяется в $e \approx 2,7$ раза). В основании конвективной зоны, где температура и, следовательно, толщина однородной атмосферы велики, образуются большие ячейки, с поперечным размером около половины радиуса звезды. В следующем слое размер ячеек меньше и, наконец, в верхнем слое их размер составляет несколько сотен километров. На поверхности Солнца видны следы всех этих ячеек — мелкие дают гранулы, средние — супергранулы, или хромосферную сетку, самые крупные — гигантские структуры.

Скорость конвективных движений в глубине звезд мала и измеряется десятками м/с. С высотой она растет, достигая особенно высоких значений под фотосферой (1–2 км/с), где излучение, уходящее из верхнего слоя ячеек, увеличивает градиент температуры.

Авторы модели полагают, что при наличии сильного магнитного поля в верхнем или среднем слое конвекция останавливается, поток теплоты уменьшается, на поверхности звезды появляются темные пятна [26]. Если пятна зарождаются не на обращенной к нам стороне Солнца, то обыкновенно наблюдается следующее. Пятна появляются на восточном краю Солнца. Они проходят через солнечный диск в течение 12–14 дней (рис. 4). Затем пятна становятся почти на столько же времени невидимыми.

Их путь — наклонные линии — результат наклона оси Солнца к эклиптике (плоскость орбиты Земли). Эти пути, в основном, параллельны экватору

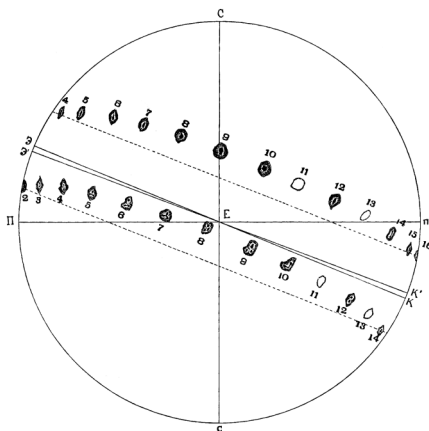


Рис. 4. Траектория двух солнечных пятен, установленная Шейнером со 2 по 16 марта 1627 г. [16]

Солнца и параллельны между собой. Траектории движения пятен изменяют свое направление в течение года вследствие изменения взаимных положений Солнца и Земли.

Благодаря движению по сфере, пятна, с приближением к краю, вместо круглых — если они круглые — становятся овальными, а затем сужаются почти до линии. Явление понятно как следствие перспективы. Очаги пятнообразования расположены в глубоких, недоступных наблюдению слоях Солнца. Скорость вращения очагов пятнообразования не подвергается никаким изменениям в течение 11-летнего цикла, хотя широта пятен систематически меняется от 5° до 35° , поэтому предполагают, что очаги лежат на самом ядре Солнца, вращающемся, как твердое тело. Следовательно, установленное уменьшение угловой скорости по направлению к полюсу — явление поверхностное, относящееся лишь к самым верхним слоям. В низких широтах пятна вращаются с большей, а в высоких — с меньшей скоростью.

Размеры пятен колеблются в широких пределах. В ряде случаев появляются группы мелких пятен, а в других — громадные пятна, в 15–20 раз превышающие диаметр Земли. Смещение линий в спектре пятен из-за эффекта Доплера указывает на движение вещества в пятнах — вытекание на более низких уровнях и втекание на более высоких. Скорость движения достигает 3 км/с. Из анализа спектра пятен и фотосферы также следует, что пятна холоднее фотосферы на 1–2 тыс. градусов. Вследствие этого на ее фоне пятна кажутся темными. Некоторые наблюдатели отмечали появление вихрей в оболочке Солнца [16].



Рис. 5. Фотосфера (фото Я.П. Ганского [16])

Значительное количество исследований посвящено грануляции — тонкой структуре солнечной фотосферы. Зернистая структура поверхности Солнца состоит из системы постоянно возникающих, а затем исчезающих светлых гранул, разделенных узкими темными промежутками (рис. 5). Средний диаметр гранулы ≈ 700 км, а среднее время жизни ≈ 8 минут.

Гранулы ярче межгранульных промежутков на 20–30 %, что соответствует разнице в температуре в среднем на 300 К. Скорость нерегулярных собственных движений гранул — 2–4 км/с. В ряде случаев обнаруживаются колебательные (боковые) движе-

ния со скоростями ~ 30 км/с. Сейчас полагают, что причиной возникновения грануляции являются конвекционные токи, а их появление зависит только от градиента температуры. Атмосфера Солнца состоит главным образом из водорода, последний во внешних слоях ионизирован в очень слабой степени. Но когда масса газа, состоящего из водорода, опускается и попадает в более горячие области, степень ее ионизации возрастает, на что уходит некоторое количество энергии. Расчеты циркуляционных контуров строят на предположении, что в зоне, где происходит ионизация водорода, встречаются поднимающиеся и опускающиеся конвективные токи.

В ряде многолетних наблюдений удалось выяснить, что диаметр Солнца испытывает небольшие колебания. Причем в то время, когда Солнце наиболее активно, его диаметр относительно мал, и наоборот [17].

Количественные характеристики этого явления следующие: каждые 160 минут Солнце расширяется, а затем сжимается. Во время пульсаций радиус светила увеличивается или уменьшается в среднем на 10 км. Солнце как бы “дышит”, при этом синхронно меняется яркость солнечного диска [23, 24].

Вращение Солнца совершается в том же направлении, что и вращение Земли, восточный край движется на нас, а западный от нас уходит. Один оборот относительно Земли точки с гелиографической широтой 17° совершают за 27,275 суток (синодический период). Линейная скорость вращения на экваторе Солнца — 2 км/с.

Солнце как звезда является типичным желтым карликом. Спектральный класс Солнца — G2V. Возраст Солнца — около $5 \cdot 10^9$ лет.

Конвективная модель, с которой мы только что познакомились, не вскрывает причин вращения Солнца. Не лучше обстоит дело с объяснением истоков пульсации гранул и образования пятен на поверхности нашей звезды. Утверждение, что эти явления возникают в результате “запирания” магнитного поля, означает, что в систему вводится некое существо (демон Максвелла), регулирующее наблюдаемый процесс. Известная модель не дает также объяснения “дыханию” Солнца.

Как видим, в газодинамике Солнца слишком много неясных моментов. Нам необходимо разобраться с этими явлениями прежде, чем мы будем двигаться дальше.

Напомним, что в предыдущем нашем исследовании было показано, что вращение любого небесного тела, обладающего газожидкостной или газоплазменной оболочкой, обусловлено обменом энергий с космосом.

Солнце само производит энергию и удаляет ее в космос. На его экваторе происходит постоянное обновление поверхности, как за счет естест-

венной циркуляции, так и в результате вращения. В то же время на полюсах обновление осуществляется главным образом естественной циркуляцией. В соответствии с этим поверхностные слои на полюсах светила должны иметь более низкую температуру, чем на экваторе. Данное обстоятельство приводит к возникновению ротационного эффекта, при котором потоки “горячей” плазмы отправляются с экватора к полюсам, а на их место поступают “холодные” потоки с полюсов. Причем возникаемый над “горячими” потоками момент количества движения передается Солнцу, приводя его во вращение, а от него — “холодным” потокам. Как уже говорилось, темные пятна на Солнце есть не что иное, как выход потоков “холодной” плазмы на поверхность вблизи экватора. Структура потоков на Солнце, по сути дела, близка к той, что мы видим на Юпитере. Если предположить, что газоплазменная среда на полюсах имеет более высокую температуру, как это сделано в работе [21], то, согласно положениям ротационного эффекта, Солнце стало бы вращаться с севера на юг (или с юга на север), а один из меридианов принял бы на себя роль экватора.

Очевидно также, что в зонах прохождения “захоженных” потоков с полюсов к экватору развивается комбинированный процесс. Поднимающиеся из глубин Солнца высокоионизированные потоки плазмы встречаются на своем пути низкоионизированные (“захоженные”) потоки, двигающиеся с полюсов к экватору. В результате их встречи развивается компрессионный эффект. Повышенное давление газовой массы разбивает меридиональные потоки на несколько потоков, выход которых возле экватора мы фиксируем по группам мелких пятен.

Будет естественным допустить, что по тому же принципу компрессионные эффекты могут возникать в ядрах галактик. В таком случае сверхвысокие давления газов, развивающиеся при наиболее мощных взрывах, могут разрушить симметричную конструкцию галактик и привести к образованию звездных “облаков” наподобие Магеллановых.

Нам остается выяснить природу пульсаций гранул и “дыхания” звезд. Этого можно добиться, лишь наложив друг на друга структуры потоков, действующих в их оболочках при различных эффектах.

Но предварительно рассмотрим спонтанные эффекты более подробно.

1.2. ТЕРМОДИНАМИКА РЕГУЛЯРНЫХ ПОТОКОВ

В своем стремлении познать мир мы так или иначе используем свои представления о симметрии и асимметрии геометрических форм окружающих нас предметов и их расположении в пространстве.

Когда-то симметрию называли “гармонией мира”. Поиски гармонии мира привели И. Кеплера к открытию законов движения планет. Затем идеи симметрии пространства и времени, развитые применительно к макромиру, проникли в кристаллографию и химию при описании структур кристаллов и химических соединений. Но особенно значительные успехи достигнуты при создании квантовой картины микромира и, в частности, строения частиц, образующих атом. Оказалось, что законы сохранения энергии, импульса и углового момента являются, по сути дела, следствиями общих принципов симметрии [27–35].

В последнее время столь эффективный метод исследований снова возвратился в свою “*alma mater*” — в макромир, где его плодотворно используют при анализе так называемых “диссипативных” структур. Структуры возникают в открытых системах, удаленных от состояния термодинамического равновесия. Эти образования, как считают авторы работ [36–39], поддерживаются в упорядоченном виде благодаря непрерывной диссипации энергии.

Взяв за основу достигнутый уровень знаний, попытаемся в этом разделе раскрыть принцип формирования течений в оболочках звезд и ядер галактик.

Изученные нами ранее структуры потоков в атмосфере и океане, несомненно, относятся к диссипативным. Для удобства расчета мы полагали, что возникающие в водной и воздушной средах циркуляционные контуры являются закрытыми системами, обменивающимися с окружающей средой лишь теплом. На самом же деле реальные системы нельзя считать подлинно закрытыми. Корреляция между скоростями частиц в потоках как раз и нарушается из-за их взаимодействия с неподвижными слоями воды и воздуха. Очевидно, что мы имеем дело с открытыми системами, поддерживаемыми в виде симметричных образований внешним потоком солнечной энергии. Именно эти гидродинамические структуры в состоянии переправить энергию с экватора Земли к полюсам в гораздо большем масштабе, чем может быть обеспечен обычной теплопроводностью.

Строго говоря, определение этих структур как “диссипативных” отражает лишь одно свойство систем — способность непрерывно рассеивать кинетическую энергию, преобразуя ее в тепловую. Однако мы видим, что природные гидродинамические образования действуют как системы, способные самопроизвольно воссоздавать теряемую кинетическую энергию. Поэтому правильнее было бы называть эти структуры “креационно-диссипативные” (лат. *creatio* — создание, творение; *dissipatio* — рассеяние). Но предлагаемое название имеет слишком общий характер. Нам же хоте-

лось бы оттенить в нем индивидуальные свойства классифицируемых объектов. Поэтому целесообразно сохранить в названии введенный нами ранее вид силового поля, взаимодействующего с тепловым потоком. Итак, в дальнейшем мы будем придерживаться следующей терминологии: “гравитационно-..., ротационно-..., компрессионно-диссипативные” структуры. При таком подходе из названия можно сразу же получить представление о направлении движения циркулируемых потоков и возможной интенсивности предполагаемых процессов.

Отметим некоторое отличие в методах расчета процессов получения кинетической энергии и ее дальнейшего расходования индивидуальными циркуляционными ячейками. Если в первом случае нас, в основном, интересовала интенсивность силового поля, в котором проявляется тот или иной термодинамический эффект, а размеры и форма каналов и контактирующих в них фаз не имели существенного значения, то во втором случае ситуация меняется на противоположную. Здесь уже именно геометрические характеристики гидродинамических структур и соотношение фаз определяют величину энергетических потерь. Происходит это потому, что законы трения неинвариантны относительно изменения пространственного масштаба систем или, иначе говоря, преобразования подобия. Влияние пространственных факторов на диссипацию энергии еще более возрастает при коллективном действии циркуляционных ячеек, к изучению которых мы сейчас приступаем.

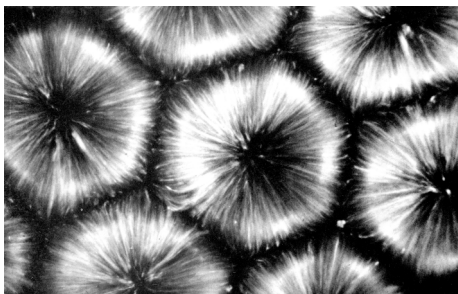
1.2.1. Гравитационно-диссипативные структуры

В качестве аналога гравитационно-диссипативных структур, возникающих в горном озере (рис. 1, часть I), примем так называемые ячейки Бенара [40].

Приводимый на рис. 6 снимок, увеличенный примерно в 25 раз, демонстрирует гексагональную конвективную структуру в слое силиконового масла глубиной 1 мм при равномерном нагреве снизу и воздействии окружающего воздуха сверху. Если верхняя поверхность свободна, то течение создается главным образом неоднородностями поверхностного натяжения, а не плавучестью. Свет, отраженный от алюминиевых хлопьев, демонстрирует подъем жидкости в центре каждой ячейки и ее опускание на краях. Время экспозиции составляет 10 с, тогда как время движения жидкости поперек ячейки от центра к краю равно 2 с. Фото V/G. Velarde, M. Yuste, J. Salan.

Ячейки Бенара, попадая в область течений, принимают удлиненную форму [17].

Внешний вид ячеек свидетельствует о том, что при осуществлении того или иного процесса природа стремится соблюдать свой основной принцип — принцип экономного использования пространства и энергии. Экономия достигается за счет расположения потоков в определенном порядке. Как известно, гексагональная структура обладает двумя видами симметрии — трансляционной (переносной) и поворотной шестого порядка.



*Рис. 6. Конвекция, создаваемая
поверхностным натяжением
(конвекция Бенара)*

Представим себе, что в нашем горном озере резко повысилось количество тепла, поступающего из земных недр. Наблюдая за поведением потоков, мы очень скоро убеждаемся, что одновременно с ростом тепловой нагрузки увеличивается число циркуляционных ячеек. В конце концов, вся водная акватория будет втянута в циркуляцию. Вновь возникающие циркуляционные контуры сравнительно равномерно разместятся в объеме озера, создав гидродинамическую конструкцию, похожую в идеальном варианте на ту, что дана на рис. 6.

При дальнейшем повышении температурного напора согласованное движение отдельных частей потоков нарушается. Возле дна озера образуется слой пара, снижающий интенсивность теплообмена. Система перейдет в пульсационный режим с хаотичным выбросом значительных объемов пара в различных частях озера. Произошедшее нарушение “упорядоченности” означает, что система теряет те виды симметрии, что допускались сложившимися условиями ее взаимодействия с окружающей средой.

Теперь обсудим энергетическую сторону затронутой проблемы.

Как известно, равновесное состояние любой изолированной системы является ее наиболее вероятным состоянием. Устойчивость в этом случае характеризуется тем, что при малом отклонении от него изменение энтропии отрицательно, ибо в условиях равновесия энтропия достигает своего максимального значения. Причем равновесные структуры существуют благодаря консервативным силам, действующим внутри самой системы.

Напомним, что общая тенденция для неравновесных систем — превращение всех видов энергии в тепловую. Это превращение приводит систему к наиболее вероятному состоянию.

Критерий устойчивости сильно неравновесного состояния, сформулированный П. Гленсдорфом и И. Пригожиным, состоит в том, что производная по времени от второй вариации энтропии должна быть положительной. Как видим, неравновесная система становится все более и более устойчивой и упорядоченной при максимальной скорости диссипации кинетической энергии, возникающей, в свою очередь, в результате пространственной передачи внешнего потока тепла.

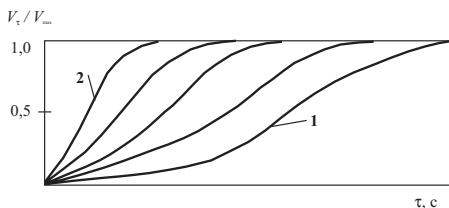
Здесь мы сталкиваемся с весьма необычной интерпретацией второго начала термодинамики: энтропия рассматривается не как мера безостановочного соскальзывания системы к состоянию хаоса, а как прародительница вновь возникающего порядка.

Возвратимся к изложенному нами в первой части книги гравитационному эффекту. Более или менее надежные результаты расчета процесса естественной циркуляции мы получили лишь для испарителя с конкретными геометрическими размерами. Очевидно, что внутренний КПД $h_{\text{ое}}$ индивидуального циркуляционного контура учитывает уровень диссипации энергии в подъемном канале, а общее количество полученной кинетической энергии определяет, по сути дела, ее расход на трение в опускном канале. Так что для анализируемой системы были найдены достаточно точные значения энтропии.

Пространственные характеристики локальных циркуляционных контуров в горном озере явно отличаются от геометрических параметров промышленных аппаратов. Поэтому при расчете сопротивлений каналов течению потоков приходится подбирать свои эмпирические формулы. В связи с трудностями полевых измерений найденные значения энтропии локальных систем оказываются крайне приближенными, но все же эти величины позволяют представить себе физическую картину процесса.

Попытаемся преодолеть возникшие трудности, привлекая принятые методы обобщения опытных данных.

Перейдем к математическому описанию пространственно-временных структур, возникающих в горном озере. Предположим, что над озером нам удалось разместить непроницаемый колпак, позволивший собирать и измерять количество образующегося пара. Обозначим объем пара, выделившийся ко времени τ , символом $V\tau$, а общий объем, полученный к концу процесса, через V_{max} . Далее допустим, что на дне озера периодически изменяется температурный перепад. Проследим за изменением скорости парообразования с помощью графика. Для этого отложим на оси ординат отношение $V\tau/V_{\text{max}}$, а на оси абсцисс время τ . В итоге мы получим семейство S-образных кривых (рис. 7).



1 — температура воды $\approx 40^\circ\text{C}$; 2 — температура воды $\approx 85^\circ\text{C}$.

Рис. 7. Кинетика образования пара при изменении температурного напора на дне горного озера

Каждому температурному напору соответствует определенное число циркуляционных ячеек. При малой разности температур между дном и водой число циркуляционных ячеек невелико. В этом случае вода прогреется лишь в зонах действия циркуляционных контуров. Выход пара над озером при этом незначительный, что соответствует расположению S-образных кривых вблизи оси абсцисс. С увеличением температурного напора весь объем воды в озере прогревается до температуры кипения, число циркуляционных ячеек возрастает до некоторого максимального значения, а S-образные кривые поднимаются к оси ординат.

Все кривые характеризуются точкой перегиба, откуда явствует, что скорость парообразования в начальной стадии процесса возрастает, достигает максимума и с возникновением пульсационного режима в конце процесса падает.

В ряде случаев фазовые превращения рассматривают как химические реакции. Такой подход дает возможность проводить оценку вероятности равновесных процессов по единой методике [41]. При дальнейшем сравнении оказалось, что не только термодинамические соотношения, но и кинетические характеристики процессов можно оценивать по одним и тем же уравнениям.

В нашем случае испарение подчиняется обобщенному уравнению химической кинетики гетерогенных процессов, молекулярно-статистический вывод которого дан Б.В. Ерофеевым [42], а именно

$$\frac{V_\tau}{V_{\max}} = 1 - e^{-k\tau^n}, \quad (I.1)$$

где k — константа скорости процесса парообразования, определяемая сложившимися в озере температурными условиями; n — постоянная, зависящая от свойств пара и жидкости.

Поскольку S -образные кривые представляют, по сути дела, две состыкованные между собой экспоненты, то в точке перелома значения k и n изменяются. Характер изменения этих величин определяют [43, 44] методом двукратного логарифмирования уравнения (I.1).

Уравнение формальной кинетики, приведенное выше, позволяет корректно обобщить экспериментальные данные, но не вскрывает энергетической стороны процесса. Вместе с тем, уравнение (I.1) дает нам возможность трактовать точку перегиба S -образных кривых как достижение креационно-диссипативной структурой своей устойчивости. В этом случае необходимо учитывать члены второго порядка в выражении для отклонения энтропии от ее максимального значения.

Наша система с приближением к точке перегиба становится все более и более устойчивой и упорядоченной. При этом рост диссипации кинетической энергии со временем достигает в ней своего максимального значения. Данное положение легко проверяется, поскольку в нашем распоряжении имеются по аналогии с испарителем характеристики одной из типичных индивидуальных циркуляционных ячеек (хотя и приближенные), а число ячеек можно подсчитать, наблюдая за гладью озера. При этом численно удастся подтвердить, что при отклонении рассматриваемой системы от идеальной симметрии, аналогичной симметрии ячеек Бенара, скорость производства в ней энтропии будет снижаться.

Теперь, анализируя таким же образом ротационно-диссипативные структуры, получим дополнительную полезную для нас информацию.

1.2.2. Ротационно-диссипативные структуры

Создание теории образования вихрей и их взаимодействия между собой является одной из ключевых задач гидромеханики. С историей этого вопроса и деталями многочисленных опытов можно ознакомиться по обстоятельным монографиям [45–47].

Вехами прошлого большой значимости были работы Дж. Тейлора [48] и А.Н. Колмогорова [49], а также материалы ряда конференций [46].

Турбулентность можно описать с помощью иерархии вихрей, или ячеек турбулентности, которые одновременно существуют во многих различных масштабах длин. К настоящему времени разработано несколько моделей процесса, которые, впрочем, продолжают уточняться.

Мы уже знаем, что “холодные” потоки,двигающиеся с полюсов планеты к экватору (“жгуты”), вращаются вокруг своей оси. Поэтому их можно рассматривать как вихри. Например, “Красное пятно” на Юпитере совершает один оборот вокруг своей оси за 6 суток, в то время как сама плане-

та — примерно за 10 часов. Пятно движется вокруг оси планеты несколько медленнее, чем окружающая его южная тропическая зона. Примерно за 30 лет пятно запаздывает на полный оборот планеты.

Определенное представление о системе вихрей, перемещающихся таким же способом по шаровой поверхности, мы можем получить, изучая данные по спиральным галактикам.

Рассмотрим те галактики, у которых наблюдается регулярный спиральный узор. Классификация этих галактик принадлежит Ж. Вокулеру [26]. Как видно из рис. 8, семейства спиральных галактик характеризуются буквами A , B , AB . Здесь SA означает нормальную спиральную галактику, SB — спираль с перемычкой (баром), SAB — переходные формы. Кроме семейств, учитываются разновидности (кольцевая — r , спиральная — s , смешанная — rs).

Отметим, что спиральная конструкция обладает поворотной симметрией, порядок которой соответствует числу ветвей галактики.

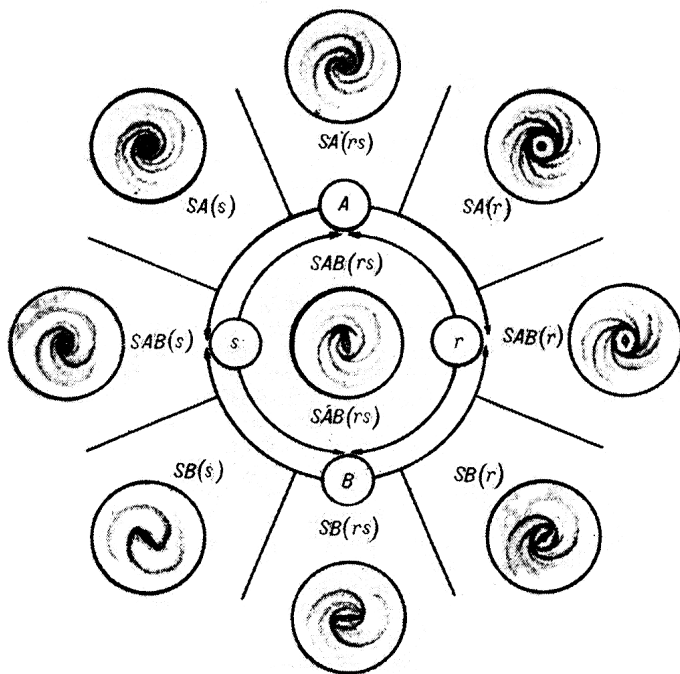


Рис. 8. Классификация спиральных галактик по Ж. Вокулеру

Представленные узоры подсказывают нам структуру потоков, некогда существовавших в оболочках протоядер галактик. Мы видим, что при слабом выделении энергии в недрах протоядер для выноса тепла из их экваториальных зон к полюсам было достаточно двух вращающихся “жгутов”. Но с увеличением мощности внутриядерного источника энергии число циркуляционных контуров возрастает. Естественно, при этом увеличивается скорость вращения объекта. В результате взрыва многожгутовая ротационно-диссипативная структура, отделившись от небесного тела, превращается в многоветвистую спиральную галактику, вращающуюся в космическом пространстве.

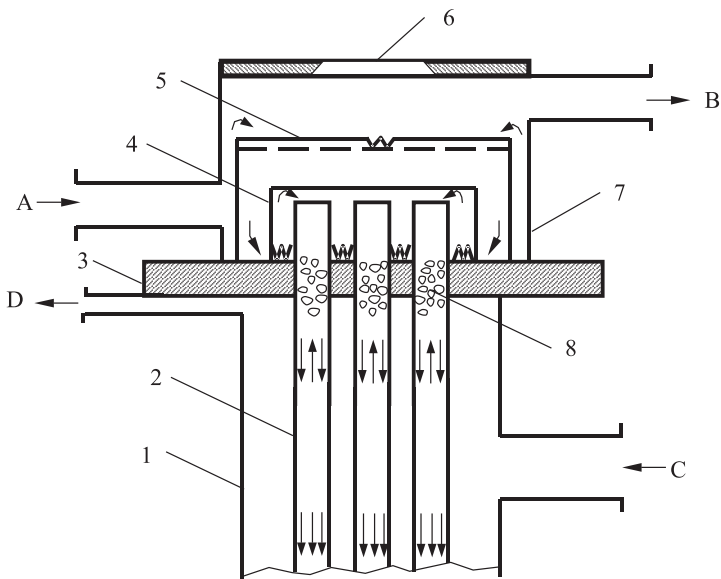
Внешний вид центральной части галактик зависит от гидродинамической ситуации, складывавшейся в глубинах протоядер. К обсуждению этого вопроса мы еще вернемся после анализа опытных данных.

1.2.3. Испаритель с пульсирующим распределительным устройством

Для расшифровки поведения солнечных гранул необходимо установить закономерности распределения двух встречных потоков: высокоионизированного, поднимающегося к поверхности, и низкоионизированного, опускающегося в глубины нашей звезды. Наиболее близкий режим взаимодействия вертикальных потоков мы можем наблюдать в испарителях со стекающей пленкой.

Испарители предназначены для концентрирования теплочувствительных растворов и дисперсий, опреснения воды, разделения жидкостей. Конструкция испарителя со стекающей пленкой показана на рис. 9. Опытный аппарат состоит из 7 труб $\varnothing 38 \times 2,5$ мм и длиной 4 м. Для распределения жидкости по сечению аппарата использован общий гидрозатвор, состоящий из двух концентрично установленных внутри камеры 7 обечаяк 4 и 5. В выступающей части каждой трубы 2 прорезано по четыре тангенциальных канала, обеспечивающих формирование стекающих пленок. Смотровое окно 6 дает возможность наблюдать за характером течения пленок внутри труб 2.

Во время работы испарителя жидкость через штуцер А поступает в распределительную камеру 7, растекается по ее периметру и переливается через зубчатые кромки обечайки 5. Затем поток подтекает к трубам 2, пройдя нижние прорезы в цилиндрической перегородке 4. Далее жидкость вновь поднимается вверх до торцов труб 2. При входе внутрь труб через тангенциальные прорезы жидкость приобретает вращательное движение,



1 – нагревательная камера; 2 – испарительная труба; 3 – трубная доска; 4 – цилиндрическая перегородка с нижними прорезями; 5 – цилиндрическая перегородка с верхними прорезями; 6 – смотровое окно; 7 – корпус распределительного устройства; 8 – положение пенных пробок. Штуцеры: А – ввод раствора; В – выход вторичного пара; С – вход первичного пара; Д – удаление газов.

Рис. 9. Испаритель со стекающей пленкой

за счет чего равномерно распределяется по внутренней поверхности и стекает вниз. Греющий пар по штуцеру С подают в нагревательную камеру 1. В результате передачи тепла через стенки труб стекающая пленка раствора частично испаряется. Образующийся вторичный пар поднимается в камеру 7 и через штуцер В отправляется в конденсационную систему. В нижней части аппарата расположен сепаратор (не показанный на схеме), в котором основная масса удаляемого вторичного пара очищается от капель.

В первичном паре, как правило, содержится некоторое количество воздуха. По мере конденсации пара воздух скапливается под трубной решеткой 3, откуда эвакуируется в атмосферу через штуцер Д.

Испытание опытного испарителя проведено в ряде химических и нефтехимических производств. Исследовался, в частности, тепломассообмен при стекании пленок растворов глицерина, стирола, алкилборатов [50].

Наблюдения показали, что вблизи верхних торцов трубок 2 в процессе испарения устанавливаются пенные пробки 8. Пробки непрерывно пульсируют и периодически перебрасывают избыток жидкости из трубки в трубку, тем самым, выравнивая сопротивление каналов течению паровых потоков. (Явление пробкообразования исчезает при высокой вязкости продукта).

Таким образом, изучаемая нами грануляция есть не что иное, как самопроизвольно возникающие в поверхностном слое Солнца газодинамические структуры, обеспечивающие распределение двух встречных потоков. Характерная черта этих образований — интенсивная пульсация пенных сгустков вещества в месте встречи потоков. Как нам кажется, более всего для них подходит название “пульсационно-диссипативные” структуры.

Пока в наших исследованиях речь шла о перераспределении встречных радиальных потоков вблизи свободной поверхности Солнца. Но нас интересует также распределение потоков и в глубине нашей звезды. Дело в том, что вращение плазменного шара происходит за счет выноса меридиональными потоками избытка энергии из экваториальных зон к полюсам. Возвращающиеся с полюсов к экватору охлажденные потоки должны были бы сразу же “провалиться” в первые попавшиеся на их пути опускающиеся каналы.

Однако чего-либо подобного на Солнце мы не наблюдаем. Более того, судя по пятнам, выход потоков “захожденной” плазмы происходит вблизи экватора. Скорее всего, принцип распределения потоков в глубинных слоях примерно тот же, что и в поверхностном слое. Согласно этому предположению в центре каждой нижележащей конвективной ячейки расположен шаровой сгусток низкоионизированной плазмы. При одновременном подъеме этих сгустков потоки высокоионизированной плазмы идут вверх, а в промежутки между ними стекают вниз потоки плазмы, поступающей с полюсов. При одновременном опускании шаровых уплотнений потоки высокотемпературной плазмы отсекаются и меридиональные низкотемпературные потоки получают возможность двигаться к экватору. Отсюда возникает видимое нами “дыхание” Солнца.

Проверим выдвинутое предположение на примере распределения жидкости по сечению многотрубного испарителя со стекающей пленкой.

Распределительные устройства исследовались на гидродинамическом стенде со 120-трубной моделью испарителя. Диаметр использованных нагревательных труб — $\varnothing 38 \times 2,5$ мм. Интенсивность орошения труб по сечению аппарата определялась путем измерения расходов жидкости в десяти контрольных трубах, расположенных по диаметру аппарата.

Требуемой упорядоченности потоков в пленочных испарителях достигают при равенстве скорости стекания жидкости во всех теплопередающих трубах. Соблюдение элементов симметрии в нисходящих потоках обусловлено принятой конструкцией испарительной камеры. Максимально возможное размещение теплообменной поверхности в единице объема аппарата приводит к такому делению пространства трубами, при котором наблюдается их полная симметрия в ромбической сетке. Испарительные трубы располагаются в пространстве камеры правильными рядами, занимая в трубной решетке узлы этой сетки. Сетка состоит из системы равных ромбов, параллельно ориентированных и смежных по целым сторонам. Ромбы без промежутков и наложений равномерно заполняют плоскость трубной решетки. Основное свойство сетки проявляется в том, что любые два ее узла можно совместить друг с другом при помощи переноса (рис. 10, 11 с).

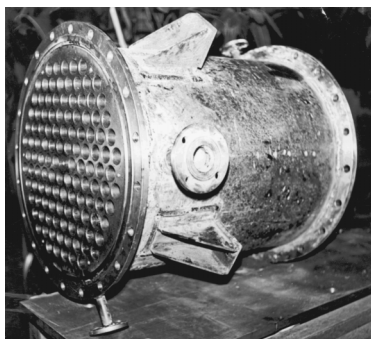
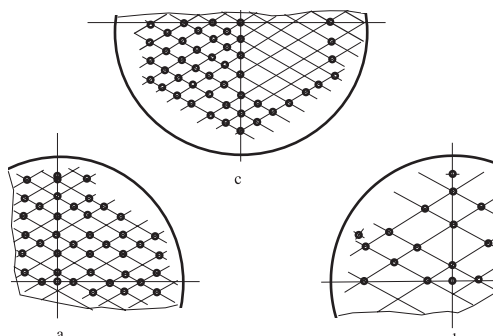


Рис. 10. Нагревательная камера испарителя со стекающей пленкой

Регулярность пространственного расположения труб обеспечивает минимальные затраты металла на изготовление и необходимую прочность аппарата при оптимальном взаимодействии конструкции с протекающими через нее потоками теплоносителя и испаряемого продукта.



а – средняя; б – верхняя; с – нижняя (перфорация соответствует расположению труб в нагревательной камере).

Рис. 11. Перфорированные тарелки

Испарители состоят из сравнительно небольшого числа типовых элементов, имеющих цилиндрическую, коническую, шаровую, эллиптическую и плоскую форму. Комбинируя эти элементы и изменяя их взаимное расположение и масштаб, получаем тот или иной тип аппарата. Если число эквивалентных способов расположения конструктивных элементов в аппарате принять равным R , то конфигурационная энтропия системы будет

$$S = k \ln R,$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Симметрия элементов, внося упорядоченность, всегда действует в направлении сокращения числа возможных вариантов. В этом плане ромбическое расположение труб в испарительной камере приводит к некоторому минимальному значению R_0 и соответствующей ему минимальной величине S_0 :

$$S_0 = k \ln R_0,$$

Величина S_0 характеризует минимальные затраты средств на изготовление аппарата. Любое отклонение от установленного закона расположения труб приводит к росту R и, как следствие, к возрастанию энтропии.

Если рассматривать энтропию как меру потерь общественных материальных ценностей, то для данного конкретного случая производства испарителей возможно составление уравнения экономического состояния, по форме не отличающегося от уравнения состояния идеального газа. Оптимальные экономические затраты достигаются в этом случае при наименьшем значении энтропии [63].

Аналогично с этим увеличение или уменьшение толщины стекающей пленки в одной или нескольких теплопередающих трубах приводит к нарушению гидродинамической симметрии и росту конфигурационной энтропии потоков, а следовательно, к увеличению материальных затрат на проведение процесса. При таких жестких требованиях к симметрии испарительной камеры и гидродинамических потоков необходимо, очевидно, проанализировать элементы симметрии распределительных устройств.

Установлено, что равномерность орошения труб улучшается при увеличении числа вводов жидкости в аппарат и возрастании симметричности этих вводов по отношению к оси аппарата. Однако такой метод значительно усложняет конструкцию, поэтому опыты были ограничены двумя вариантами: вводом жидкости сверху по вертикальной оси или двумя взаимно противоположными периферийными вводами, расположенными по горизонтали.

Осевая симметрия вставок, выполненных в виде колокольчика с тремя установочными ребрами, обеспечивает генерацию пленок в каждой трубе, но не по сечению аппарата (рис. 12).

Использование закономерностей симметрии в расположении отверстий перфорированных тарелок позволяет распределить жидкость по сечению аппарата, но не гарантирует генерацию пленки в каждой трубе (рис. 11, 13).

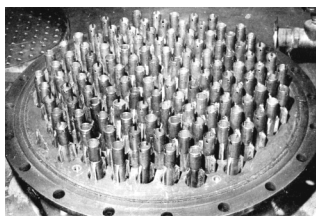


Рис. 12. Распределительное устройство со вставками в испарительных трубах

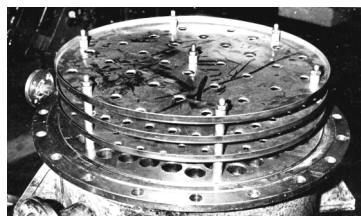
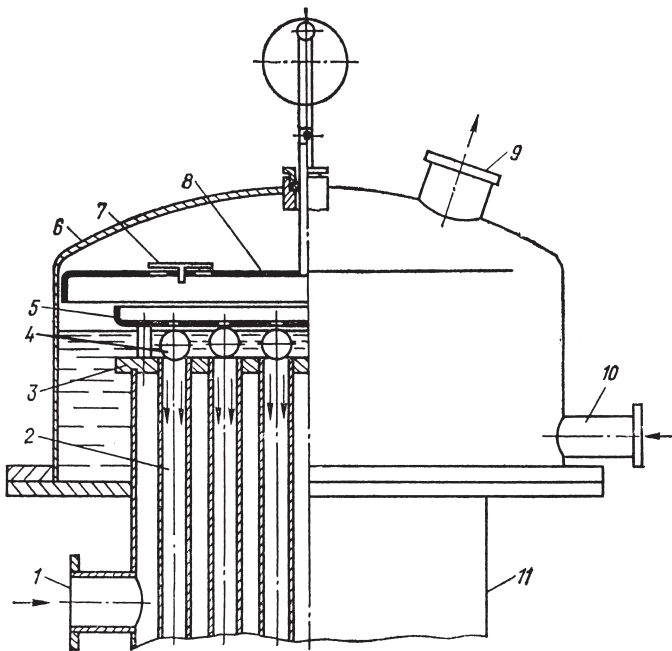


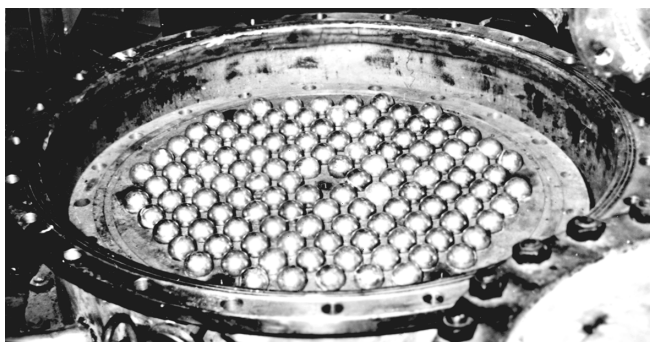
Рис. 13. Распределительное устройство с тремя перфорированными тарелками

Наконец, оба типа распределительных устройств требуют расхода жидкости на порядок больше экономически оправданной величины. В этих условиях только возрастание числа осей симметрии дроссельных элементов и симметричности перфорации тарелок по отношению к координатам расположения труб дает необходимые результаты. Стремясь удовлетворить оба эти требования, приходим, с одной стороны, к перфорированной тарелке, координаты отверстий которой совпадают с координатами расположения труб в трубной решетке, а с другой — к дроссельному элементу, выполненному в виде шара, погруженному на одну треть своего диаметра в теплообменную трубу. У шара, как известно, бесконечное число осей симметрии бесконечного порядка. Но этого оказалось недостаточно. Кроме геометрической симметрии элементов в трех измерениях, понадобилась симметрия в четвертом измерении. Другими словами, шары должны совершать колебательное движение между трубной решеткой и ограничительной перфорированной тарелкой. Подъем шаров (под действием разрежения в распределительной камере) и их опускание (под действием силы тяжести) симметричны во времени (рис. 14) [51–59].

Основным элементом устройства являются полые шары (дроссельные элементы) 4, расположенные на верхних концах теплопередающих труб 2, закрепленных в трубной решетке 3. Трубы размещены в испарительной камере 11, питаемой паром через штуцер 1. Над шарами помеще-



a



b

Рис. 14. Пульсирующее распределительное устройство с шарами (а) и его внутренний вид (b)

на перфорированная пластина 5. Распределительная камера 6 снабжена пульсатором 8 с клапанами 7, штуцерами для подвода раствора 10 и выхода вторичного пара 9.

Исходный раствор при подаче его в нижнюю часть распределительной камеры в момент, когда дроссельные элементы опущены, растекается ровным слоем по всей трубной решетке. При движении поршня пульсатора вверх в распределительной камере создается разрежение относительно давления в испарительных трубах. Дроссельные элементы поднимаются. Поскольку каждый дроссельный элемент выполнен в виде полого шара и при подъеме центр шара перемещается по траектории, близкой к оси трубы, то в результате перемещения образуется кольцевая щель равной толщины. В эту щель поступает определенное количество жидкости. При движении поршня вниз открываются клапаны 7, и пар, поступивший в момент подъема шаров из труб в распределительную камеру, направляется в сепаратор. Шары возвращаются на место, причем под действием силы тяжести они устанавливаются строго по центру труб. Далее все повторяется сначала. При движении вниз и вверх шары хаотично вращаются вокруг своего центра тяжести.

Стекающая в пульсационном режиме пленка упаривается, затем отделяется от вторичного пара в сепараторе.

Снижение плотности пульсирующего орошения в 7–10 раз (по сравнению с применяемым в известных распределителях [60]) дает значительный выигрыш в электроэнергии, несмотря на некоторое потребление ее пульсатором. Устройство не засоряется.

С увеличением диаметра аппарата до нескольких метров перфорированная пластина снабжается регулируемыми винтами, установленными над каждым дроссельным элементом [61]. Одновременно вместо поршневого пульсатора на штуцере выхода вторичного пара устанавливается трехходовой пневматический клапан для попеременного соединения распределительной камеры с паровым пространством данного аппарата и с вакуумной системой установки. В качестве генератора импульсов вместо трехходового крана может быть использован пульсатор с вращающимся ротором, оснащенный электродвигателем с вариатором [62].

Устройство позволяет ликвидировать асимметрию, обусловленную подачей раствора в распределительную камеру в одном месте, и добиться полной геометрической симметрии стекающих потоков в отдельных трубах и по сечению аппарата.

При конструировании пульсирующего распределителя использовалось минимальное количество элементов, соблюдалась их полная симмет-

рия. Любое усовершенствование устройства приводит либо к нарушению симметрии элементов, либо к увеличению их числа. То и другое влечет за собой рост конфигурационной энтропии и, как следствие, больший расход материала и энергии на его изготовление и эксплуатацию. Кроме того, ухудшается качество теплочувствительного продукта.

Таким образом, ориентация на законы симметрии позволяет обоснованно и результативно решать конкретные задачи распределения потоков жидкостей и газов в аппаратах.

Снижение скорости течения потока в начальной стадии и прерывистость потока в последующей, сопровождающиеся изменением направления поля скоростей, являются необходимыми и достаточными условиями распределения жидкости в гравитационном поле. Ниже приведены результаты испытаний пульсирующего распределительного устройства.

Конечной целью экспериментов на 120-трубной модели выпарного аппарата с пульсирующим распределительным устройством являлось получение математической зависимости качества распределения ξ в функции расхода \bar{G} , отнесенного к одной трубе, высоты подъема шаров H , частоты колебаний f и величины хода поршня L .

Здесь ξ — среднеквадратичное отклонение расхода жидкости в исследуемом испарителе. Значения ξ рассчитывают с учетом количества труб, охватываемых контрольными трубами по сечению аппарата.

К сожалению, получить теоретическое решение этой задачи невозможно ввиду чрезвычайной сложности гидродинамических процессов, происходящих в распределительном устройстве. Следовательно, остается один способ — экспериментальное определение качества распределения в зависимости от названных факторов.

На математическом языке задача формулируется следующим образом: необходимо получить некоторое представление о функции отклика. Поскольку вид искомой функциональной зависимости неизвестен, ее удобно представить в виде полинома. Разложение функции в степенной ряд эквивалентно представлению ее рядом Тейлора.

Учитывая специфику проведения эксперимента и общее количество имеющихся экспериментальных данных, функциональная зависимость $\xi = f(\bar{G}, H, f, L)$ предполагалась линейной. В результате аппроксимации опытных данных получено уравнение

$$\xi = 1,95 \cdot 10^{-4} + 0,025\bar{G} + 6,4 \cdot 10^{-3}H - 2,28 \cdot 10^{-5}f - 4,17 \cdot 10^{-3}L.$$

Уравнение справедливо при следующих значениях аргументов:

$$1,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с} \leq \bar{G} \leq 13,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с};$$

$$2 \cdot 10^{-3} \text{ м} \leq H \leq 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}; 0,6 \text{ Гц} \leq f \leq 2,0 \text{ Гц};$$

$$3,5 \cdot 10^{-2} \text{ м} \leq L \leq 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Более подробно методика проведения опытов и обобщения полученных данных изложена в работе [50].

Итак, нам экспериментально удалось доказать, что оптимальное распределение потоков жидкости и пара по сечению многотрубного пленочного испарителя и в трубах может быть достигнуто с помощью пульсирующих дроссельных элементов.

Элементы выполнены в виде шаров, периодически перекрывающих вертикальные потоки от горизонтальных. Очевидно, что по тому же принципу происходит перераспределение радиальных и меридиональных потоков в оболочках звезд, где роль дроссельных элементов выполняют самопроизвольно возникающие в циркуляционных ячейках шаровые уплотнения плазмы.

Наблюдаемый нами процесс периодического расширения и сжатия Солнца отражает, по-видимому, механизм поочередного включения в действие гравитационного и ротационного эффектов.

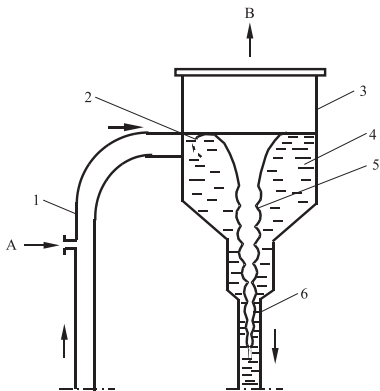
Обсуждаемые здесь пульсационно-диссипативные структуры занимают особое положение в иерархии креационно-диссипативных структур, поскольку координируют взаимодействие разнонаправленных потоков, выносящих энергию из глубин Солнца и перераспределяющих ее в поверхностных слоях.

В нашем исследовании газодинамики Солнца осталось еще одно “белое пятно”, а именно: нам не совсем ясно, как вращаются вокруг своей оси потоки низкоионизированной плазмы (жгуты), продвигающиеся с полюсов к экватору. Выяснить особенности вращения меридиональных потоков нам помогут результаты испытаний испарителей с естественной циркуляцией.

1.2.4. Испаритель с тангенциальным вводом потока в сепаратор

Отметим ряд особенностей вихревого течения, обнаруженных при испытании испарителей с естественной циркуляцией [64, 65].

Как показано на рис. 15, при вводе двухфазного потока по касательной к внутренней стенке сепаратора 3 жидкость приобретает вращательное движение. При этом наблюдаются две ярко выраженные области потока: центральная с полым вихревым “шнуром” 5 и прилегающая к стенке слабо вращающаяся часть жидкости 4. На полой ядре поверхности вихря обнаруживаются расширения и сужения, являющиеся результатом действия инерционных волн.



1 — подъемный канал; 2 — тангенциальный ввод потока; 3 — сепаратор; 4 — слой слабо вращающейся жидкости; 5 — вихрь; 6 — опускной канал; штуцеры: А — вход воздуха; В — выход воздуха.

Рис. 15. Схема циркуляционного контура испарителя

С повышением тепловой нагрузки скорость течения двухфазного потока, поступающего в сепаратор, возрастает. При достижении некоторой критической скорости поток, стесненный в опускном канале, смыкается и над вихрем появляется фонтан высотой 1—1,5 м. Фонтан возникает лишь при определенном сочетании технологических и конструктивных параметров циркуляционного контура.

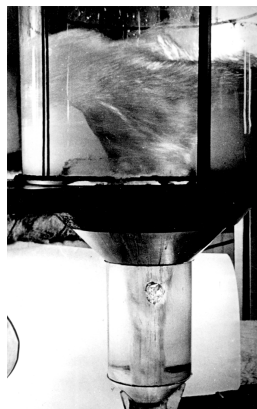
Это явление наблюдается, в частности, при диаметрах сепаратора $\varnothing 4-6$ м и скорости тангенциального ввода парожидкостной смеси 25—30 м/с. В то же время скорость установившегося поступательного движения потока в опускном канале в этом режиме находится в пределах 1,5—2,5 м/с.

Иная картина складывалась при испытаниях холодного стенда. В этом случае циркуляция обеспечивалась за счет нагнетания воздуха в подъемный канал. Образование фонтана не отмечалось, но вблизи вихря несколько поднялся уровень жидкости (рис. 16 б).

Обе установленные особенности понадобятся нам при оценке условий образования галактик и планетных систем, а также при формировании самой Земли.



а



б

а) вид сверху; б) вид сбоку.

Рис. 16. Вихрь жидкости в нижней части сепаратора (холодная модель)

1.3. ПРИЧИНЫ ВЗРЫВА НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

Априори, можно утверждать, что спокойный период развития протоядер галактик и протозвезд происходил в условиях соблюдения баланса между притоком энергии в их массу в ходе протекания внутренних реакций и стоком этой энергии в космос через их внешнюю поверхность.

Свет далеких звезд, образовавшихся из протоядер галактик, свидетельствует о том, что в них идут те же реакции, что и в Солнечной системе. Это означает, что взрывы ядер происходят не из-за недостатка “топлива” в их недрах, а в результате затруднений, связанных с эвакуацией вырабатываемой энергии в космос.

Здесь следует отметить, что объем небесного тела пропорционален кубу текущего радиуса, в то время как внешняя поверхность лишь квадрату радиуса. В связи с этим с увеличением размера и массы небесного тела количество вырабатываемой энергии, опережает то, что оно может удалить в космос через свою поверхность. Поэтому массивные тела, как правило, вращаются с более высокой скоростью и чаще взрываются.

Естественным фактором “спускового” (“триггерного”) действия может быть накопление продуктов реакции во внешней оболочке в ходе эволюции небесного тела. В этом случае обмен энергией с космосом ухудшается, что сопровождается перегревом объекта и его взрывом. Разумно предположить, что сброс оболочки и ее преобразование в звезды отражает стремление системы развить поверхность обмена энергией с космосом, т.е. достигнуть более устойчивого состояния.

Одновременно само уменьшившееся ядро приводит в соответствие приток энергии из своих недр с ее стоком в космос. Сокращение количества вырабатываемой в недрах энергии на единицу площади внешней поверхности дает возможность телу снизить число оборотов вокруг своей оси и вступить в стадию своего спокойного развития.

1.4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА КОЛИЧЕСТВА ДВИЖЕНИЯ И МАССЫ ВЕЩЕСТВА ПРИ ВЗРЫВЕ НЕБЕСНОГО ТЕЛА

В данном разделе на примере формирования Солнечной системы и галактик нам необходимо показать справедливость гипотезы В.А. Амбарцумяна. Лучшим подтверждением явится доказательство того, что распределение углового момента и массы вещества при взрыве Протосолнца должно было быть именно таким, каким мы его наблюдаем сейчас в нашей планетарной системе. То же самое касается галактик.

Солнце, как мы уже знаем, вращается медленно, его угловой момент сравнительно мал. Большая часть углового момента, как оказывается, “заключена” в орбитальных движениях планет — прежде всего в движении самой большой из них, Юпитера. Это при всем притом, что масса планет составляет менее 1 % массы Солнца.

Динамическая обстановка, складывающаяся при взрыве, имитировалась путем внезапного изменения параметров процесса, протекающего в испарителе с турбинным приводом циркуляционного насоса (рис. 9, 10; часть I). Прежде всего проверялось поведение системы при быстром повышении температуры циркулируемой среды. С этой целью во время работы испарителя резко повышалось давление первичного пара в нагревательной камере 6. Усилившийся приток тепла к потоку воды в течение 20–30 с поднимал располагаемый температурный перепад турбины с 4 °С до 40 °С. В результате число оборотов турбонасоса возрастало с 500 до 2600 в минуту.

Отсюда можно сделать вывод, что в момент взрыва небесное тело многократно увеличивает число оборотов вокруг своей оси. В итоге масса оболочки приобретает кинетическую энергию в количестве, достаточном для отрыва от центральной части объекта. Выброшенные с высокой скоростью в космос сгустки вещества, длительное время не испытывают какого-либо трения со стороны окружающего пространства при своем движении по орбите вокруг родительского тела. Последнее обстоятельство позволяет им сохранять момент количества движения, приобретенный во время взрыва.

Иначе ведет себя оставшаяся масса вещества. При снижении температуры среды в конце взрыва выработка механической энергии материнским телом резко сокращается. В этом случае трение потоков в ядре за короткий период времени замедлит его вращение. Ситуация аналогична поведению гироскопов различной конструкции, например, волчка. Как известно, “спящий” волчок — это вращающееся вокруг оси симметрии твердое тело с опорой ниже центра тяжести. Уравновешенный волчок вращается после своего запуска довольно длительное время. Но если выполнить волчок полым и залить в него какую-либо жидкость, то его устойчивость будет потеряна после нескольких оборотов вокруг своей оси. Причиной тому являются значительные затраты механической энергии внутри волчка на преодоление трения между слоями жидкости.

Перечисленные причины привели к тому, что при взрыве Протосолнца основной момент количества движения (98 %) оказался у планет, образовавшихся из сгустков вещества, и лишь ничтожная его доля сохранилась у Солнца.

Та же ситуация сложилась, по-видимому, и при взрыве Протоядра Галактики. Ее спиральные ветви должны обладать значительно большим моментом количества движения, чем ядро.

Продолжим рассмотрение результатов испытания испарителя с турбонасосом. Во второй серии опытов воспроизводились условия сброса массы оболочки в космос. Для этого количество воды в сепараторе 2 внезапно уменьшалось до предельно возможного уровня, позволяющего все же сохранять циркуляцию. Установка незамедлительно входила в пульсационный режим. Поток перегретой жидкости поступал в турбину отдельными порциями. В момент прохождения потока через сопла число оборотов турбины резко возрастало, а при холостом ходе — падало. Так при перегреве раствора в 20 °С число оборотов турбины периодически поднималось до 1200, а затем опускалось до 400 в минуту.

Как видим, при недостатке воды в контуре момент количества движения возникает и исчезает через определенные интервалы времени, поддерживая работу установки в некотором переходном режиме.

Ранее нами установлено, что вращение небесных тел, в том числе и Земли, происходит за счет обмена количеством движения между газожидкостной или газоплазменной оболочкой, где рождается момент, и ядром. Если масса вещества принадлежавшая оболочке, сбрасывается при взрыве в космос, то природный насос, подававший эту массу с полюсов к экватору, прекращает нормально функционировать.

Таким образом, взрывная потеря массы снижает число оборотов небесного тела и переводит его в пульсационный режим вращения.

До сих пор в построении модели формирования галактик и планетных систем мы опирались лишь на результаты испытаний индивидуального циркуляционного контура. Но мы уже знаем, что в оболочках Протоядра Галактики и Протосолнца действовали значительные коллективы циркуляционных ячеек как гравитационного, так и ротационного типа. Именно их суммарное действие определило закон распределения момента количества движения между сгустками выброшенной в космос материи.

Начнем свои рассуждения с того, что подвод исходного вещества в зону реакции обеспечивался той газо- и гидродинамической структурой, которая складывалась из комплекса циркуляционных ячеек, возникающих в оболочке небесного тела. Следовательно, скорости субъядерных и ядерных реакций, развивающихся при взрывах, также подчиняются уравнению Ерофеева (здесь мы предполагаем, что величина энергии активации мала). Отсюда максимальное значение скорости реакций соответствует достиже-

нию системой той газо- и гидродинамической устойчивости, что отражает критерий Глесдорфа—Пригожина. Само собой разумеется, что скорость нарастания и снижения числа оборотов взрывающегося небесного тела будет проходить в строгом соответствии с отмеченной закономерностью развития реакций, протекающих в его недрах.

Эта же закономерность должна наблюдаться в распределении скоростей движения выброшенных в космос звездных ассоциаций, образующих рукава спиральный галактик, а также в дифференциации орбитальных скоростей вращения планет вокруг Солнца. Но, чтобы воспользоваться установленными закономерностями, необходимо хотя бы указать принцип образования звездных ассоциаций и планетных систем.

Обратимся к инерционным волнам, возникающим в вихрях и, в частности, во вращающихся “жгутах” — тех самых “холодных” потоках, что двигаются с полюсов к экватору. Волны в “жгутах” имеют ту же инерционную природу, что и волны в вихревых “шнурах” циркуляционных испарителей. С увеличением скорости вращения при взрыве “жгуты”, расправляясь в спиральные ветви, попадают, очевидно, в резонансный режим, что усиливает воздействие инерционных волн и способствует, в конечном счете, разрыву потоков в наиболее узких местах.

Причем, распад “жгутов”, отделяющихся от вращающейся шаровой поверхности, происходит, очевидно, по наиболее вероятному сценарию, т.е. с соблюдением принципа золотого сечения. Золотое сечение (гармоничное деление) — деление отрезка a , при котором большая часть x , является средней геометрической между всем отрезком a и меньшей его частью $a-x$, т.е. $a:x = x:(a-x)$ [66].

Сохраняя “наследственные черты” звезды в рукавах галактик располагаются в виде отдельных скоплений таким образом, что соотношения периодов обращения соседних скоплений образует спектр, получаемый на основе принципа золотого сечения. В данном случае мы просто перенесли особенности построения Солнечной системы на закон формирования спиральных галактик.

Любопытно, что расположение перигелиев и афелиев планет по логарифмической спирали, как доказал К.П. Бутусов, также связано с “гармоническими” числами, подтверждающими правило, лежащее в основе золотого сечения [67, 68]. Возможно также, что правило Тициуса—Боде, по которому в настоящее время оценивают расстояние между планетами [69], отражает установленную К.П. Бутусовым закономерность.

Продолжим обсуждение особенностей распределения количества движения при взрыве. Определенную часть углового момента “забирают” с

собой пояса астероидов и комет. Эти пояса — реликт “дыхательной” системы Протосолнца. Система, как мы уже выяснили, состояла из коллектива шарообразных уплотнений вещества, некогда размещавшихся как запорные клапаны в подъемных каналах гравитационно-диссипативных структур. Располагаясь на определенном уровне, шаровые уплотнения при своем опускании создавали подобие “диафрагм”, отсекающих пространства повышенного давления от областей более низкого давления. Можно предположить, что таких “диафрагм”, распавшихся затем на пояса астероидов, у Протосолнца было несколько.

Астероиды сохранились до нашего времени благодаря тому, что подавляющее большинство из них движется в широком промежутке между орбитами Марса и Юпитера.

Другой пояс, состоящий из комет, обнаружил Я. Оорт. Им установлено, что планетная система окружена роем каменисто-ледяных тел. По аналогии можно предположить, что наблюдаемые у ряда спиральных галактик кольца представляют собой остатки пульсационно-диссипативных структур, в свое время обеспечивавших “дыхание” протоядер.

Возвратимся к обсуждению расположения планет вокруг Солнца. Очевидно, что изменение центробежных сил, развивающихся при взрыве, происходило также по *S*-образной кривой. Вблизи точки перегиба этой кривой, где Протосолнце достигло своей максимальной скорости вращения, должна была отделиться планета с минимальным временем прохождения своей сегодняшней орбиты. Этой планетой, как будет показано ниже, является Меркурий.

Выброс в космос “диафрагм” приводил, вероятно, к нарушению резонансного режима отделения “жгутов”, что сопровождалось в дальнейшем появлением в системе планет с малой массой. Так, если двигаться с периферии Солнечной системы к центру, то вслед за поясом комет Оорта нам встречается малая планета Плутон, а за поясом астероидов — Марс, обладающий также незначительной массой. Продолжая двигаться по направлению к Солнцу, мы должны были бы встретить пояс астероидов и перед Меркурием (см. рис.17). Недаром же расстояние между Меркурием и Венерой больше, чем между Венерой и Землей. Но похоже, что от этого пояса мало что осталось. Тем не менее, отдельные представители этого “семейства” должны были наблюдаться в недалеком прошлом при пересечении ими диска Солнца.

К сказанному следует добавить, что выброшенные в космос сгустки вещества являлись после самоуплотнения теми ядрами, на которых оседа-

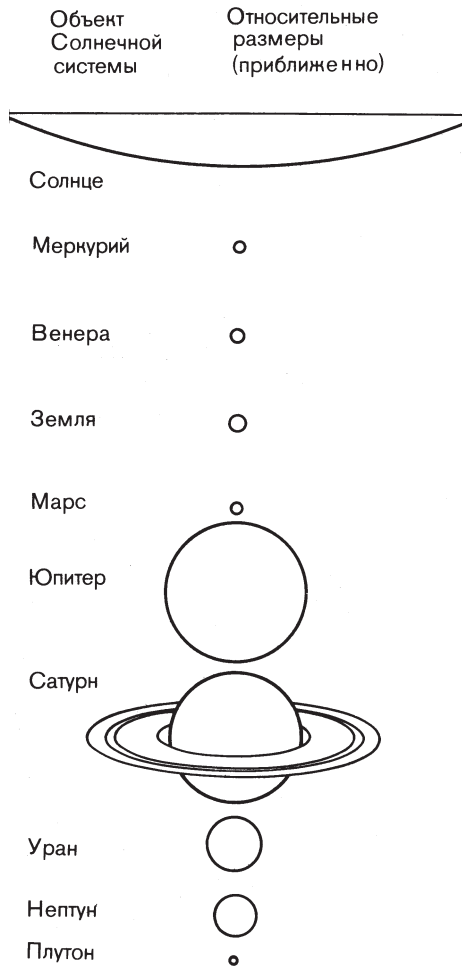


Рис. 17. Относительные размеры планет и Солнца

ли частицы пыли и газы, оказавшиеся на орбите их движения. Судя по сохранившимся многокилометровым кратерам на поверхности планет земной группы многие астероиды также “не возражали” объединить с ними свою судьбу.

Далее несколько углубим свои представления об энергетических преобразованиях, происходивших во время взрыва.

1.5. НЕРАВНОВЕСНАЯ ТЕРМОДИНАМИКА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Нас, безусловно, интересуют количественные соотношения, подтверждающие наблюдаемые закономерности. В поиске этих соотношений мы будем по-прежнему опираться на значения энтропии.

Уточним, что изменения энтропии могут происходить [70]:

1) вследствие изменения конфигурационной энтропии (например, в результате увеличения числа частиц или молекулярной разупорядоченности при рассеянии вещества в большом объеме);

2) вследствие изменения тепловой энергии (например, в результате теплового разупорядочения при рассеянии тепла в большом объеме или при рассеянии потенциальной энергии подобно теплу).

При космическом взрыве, как конфигурационная, так и тепловая энтропия системы возрастают. Это обстоятельство создает впечатление, что процесс непременно должен закончиться образованием из небесного тела облака пыли и газов.

В принципе ничто не мешает нам по аналогии с термическим КПД η_t внести в расчеты конфигурационный КПД η_k . По замыслу величина η_k должна отражать степень сохранения симметрии газодинамических образований при взрыве. Учитывая общую тенденцию природных процессов к хаосу, можно предположить, что лишь 1–2 % выброшенной массы вещества может расположиться в космосе как звезды и планеты. Все остальное должно, казалось бы, разлететься вокруг ядра в виде пыли и газов. Причем выдвигаемое предположение касается лишь объектов с достаточно мощными гравитационным и ротационным полями, обеспечивающими устойчивую циркуляцию потоков. Как видим, стереотипное мышление толкает нас на то, чтобы дать значению η_k величину 1–2 %.

В действительности же в космосе наблюдается обратная картина. Здесь мы видим четкие спиральные рукава галактик, состоящих из звезд, в которых сосредоточена основная часть выброшенной массы, а содержание межзвездной пыли и газов в них не превышает 1–2 % [14]. Таким образом, конфигурационная энтропия претерпевает во время взрыва значительно меньшие изменения, чем тепловая. Тем самым проявляется замечательное свойство рассматриваемых систем, заключающееся в том, что элементы их симметрии, существовавшие в оболочках протоядер, сохраняются в галактических образованиях, представших перед нами спустя миллиарды лет.

Выявленная особенность формирования галактик и планетных систем является вполне прогнозируемой, поскольку реакции в космических

объектах идут постадийно. Отчасти это вызвано тем, что креационно-диссипативные структуры способны подводить исходные вещества в зону реакции и отводить из нее образующиеся продукты лишь за конечное время, входящее, как мы установили, в уравнение Ерофеева.

В результате на первой стадии при протекании субъядерных реакций система оказывается не в состоянии выработать такое количество кинетической энергии, которое было бы достаточно для полного распыла вещества оболочки. Это вещество должно пережить еще вторую звездную стадию своего развития с ее ядерными реакциями, а затем после сброса звездных оболочек, перейти к последующей планетной стадии, где, как мы знаем, преобладают химические реакции.

После каждого взрыва деформационные силы разъединяют систему на отдельные части и увеличивают расстояние между ними, но при этом сохраняют общие геометрические признаки, присущие материнской структуре. Создается впечатление, что законы перехода неравновесных систем из одного состояния в другое инвариантны по отношению к преобразованиям подобия.

Рассмотрим основные принципы этих преобразований. Задавшись, скажем, двумя подобными фигурами, например большим и маленьким треугольниками одинаковой формы, мы можем любой из них рассматривать как результат деформации или преобразования другого, т.е. либо считать, что меньший треугольник равномерно растянут до большого, либо, наоборот, большой равномерно сжат до меньшего. Можно рассматривать более радикальные преобразования. Выделим одно из них.

Так, Б. Риман предложил преобразования, допускающие растяжение, сжатие, изгиб и даже кручение. Фигуры, которые могут быть получены одна из другой посредством таких преобразований, называются гомеоморфными или топологически эквивалентными. Как правило, стараются охарактеризовать эквивалентные фигуры посредством некоторых определяющих свойств. Если эти свойства обнаруживаются в двух фигурах, то такие фигуры топологически эквивалентны точно также, как, например, два треугольника конгруэнтны, когда две стороны и угол, заключенный между ними, в одном треугольнике равны соответственным элементам в другом [71].

Главная задача топологии — установить, когда две фигуры топологически эквивалентны. Однако это может оказаться трудным, если просто на глаз сравнивать фигуры, как это мы делаем сейчас на данном этапе исследований. Для повышения достоверности результатов сравнения разработана отдельная ветвь математики, называемая дифференциальной топологией [72]. Но, чтобы воспользоваться ее методами, необходимо предвари-

тельно идентифицировать креационно-диссипативные структуры не только на Солнце, но и на ближайших звездах, а также в ядрах галактик. Кроме того, следует выполнить соответствующую статистическую обработку наблюдаемых видов спиральных галактик и обнаруженных к настоящему времени планетных систем. Лишь после этого можно будет методами топологии и дифференциальной геометрии строго подтвердить родство рассматриваемых фигур.

Одновременно для римановых преобразований необходимо на основе классических представлений [73, 74] разработать специальную терминологию, касающуюся устойчивости форм деформируемых объектов. На текущий момент мы можем воспользоваться приемами неравновесной термодинамики, полагая, что для каждого отдельного интервала времени система достигает устойчивости, характеризуемой критерием Гленсдорфа—Пригожина. Сумма этих интервалов составляет полное время перехода вещества из одной стадии своего развития в другую. Справедливости ради необходимо отметить, что уровень деформации определяется обычным критерием устойчивости закрытой системы, если включить в нее взрывающийся объект и окружающее пространство. Отмеченная двойственность явлений, наблюдаемая при трансформации креационно-диссипативных структур, присуща, очевидно, большинству открытых природных систем.

Приведенные здесь теоретическое и экспериментальное обоснования дают нам сравнительно полное представление о закономерностях и существенных связях, имевших место в космических переходных процессах. Поэтому, выполненный в следующем разделе, приближенный расчет первоначального крутящего момента Земли приобретает, как нам кажется, определенную достоверность.

1.6. ОЦЕНКА МОМЕНТА КОЛИЧЕСТВА ДВИЖЕНИЯ ПРОТОЗЕМЛИ

Вначале нанесем реперы по маршруту нашего вычислительного процесса. В качестве ориентиров возьмем имеющиеся наблюдательные данные. Так, установлено, что звезды спектрального класса O, B, A вращаются очень быстро — экваториальная скорость вращения у них, как правило, превышает 100 км/с. Как уже говорилось, у Солнца, типичной звезды класса G, скорость вращения точек экватора составляет всего лишь около 2 км/с [13].

Очевидно, что планеты Солнечной системы образовались из одного мощного “захожденного” потока (жгута), двигавшегося в оболочке Протосолнца с одного из полюсов к экватору.

Похоже, что ситуация в оболочке Протосолнца была близка к той, что сейчас наблюдается на Юпитере.

Эта планета обеспечивает свое вращение в основном за счет одного-единственного жгута, находящегося в ее южном полушарии. Выход “холодного” потока возле экватора фиксируется по так называемому Большому Красному Пятну (БКП). БКП имеет форму овала с длиной 40000 км и шириной около 14000 км. Диаметр самого Юпитера находится в пределах 143 тыс. км, масса в 317,8 раз больше массы Земли, период вращения составляет 0,41 земных суток.

В свою очередь, период вращения БКП вокруг оси Юпитера отличается от вращения самой планеты. Пятно дрейфует в окружающей его Южной тропической зоне. Примерно за 30 лет БКП запаздывает от нее на один оборот. Само БКП вращается вокруг своей оси, завершая полный оборот за 6 земных суток. Напомним, что основная часть энергии поступает в оболочку Юпитера из его ядра [68].

Судя по всему, циркуляция потоков на Юпитере может быть взята нами в качестве аналога циркуляции, существовавшей в оболочке Протосолнца.

Мы уже говорили в первой части книги, что захоложенные потоки жидкого водорода, увлекаемые планетой, как бы перекачиваются по более плотным нижележащим слоям. Такой режим течения приводит к вращению “жгутов” вокруг своей оси в сторону, противоположную вращению самой планеты.

Очевидно, что та же закономерность наблюдалась и в оболочке Протосолнца. Отсюда следует, что отделившаяся при взрыве протопланетная спираль вращалась в направлении, противоположном направлению вращения большинства планет. К настоящему времени направление реликтового вращения сохранили лишь Венера и Уран.

Остальные планеты в ходе своего развития изменили направление первоначального вращения на противоположное. Такая операция при наличии газожидкостной оболочки и гор не представляла для них особого труда.

Здесь следует отметить, что направление вращения вокруг своей оси астероидов не может быть для нас ориентиром, поскольку вращение сгустков плазмы, из которых образовались эти небесные тела, не было строго определенным.

Ранее мы пришли к выводу, что на начальной стадии своей истории Марс обладал газожидкостной оболочкой. Теперь, учитывая сказанное выше, мы приходим к заключению, что и Плутон имел оболочку из газов и жидкостей.

Для того чтобы приступить к приближенному расчету, примем к рассмотрению еще одну величину, а именно скорость потери вещества во время взрыва. Здесь следует учитывать, что истечение потоков плазмы, находящейся при сверхвысоких давлениях и температурах в миллионы градусов, можно наблюдать лишь в космических условиях. Нам остается лишь подобрать ориентир для сравнения. Принимая во внимание скорости сброса вещества в космос звездами Вольфа-Райе — очень яркими голубыми объектами, ограничим рассматриваемую величину значением [13]

$$v = 1000 \text{ км/с.}$$

Напомним, что вторая космическая скорость, необходимая для отрыва какого-либо тела от поверхности Солнца составляет 618 км/с.

Проведем оценку скорости вращения “холодного” жгута вокруг оси Протосолнца. Очевидно, что при отделении от Протосолнца жгут, распавшись на сгустки, сохранял свой момент количества движения. Отсюда орбитальная скорость движения планет должна примерно совпадать со скоростью вращения материнского жгута.

Скорость движения планет по своим орбитам выбираем по справочным данным, например [12, 26].

Как видим, во время взрыва скорость вращения Протосолнца возросла с 4,7 км/с до 47,7 км/с. Основная планетная масса отделилась в интервале окружных скоростей 5,4—13,06 км/с. Земля отправилась на орбиту спутника Солнца со скоростью 29,27 км/с. Здесь мы пренебрегли незначительным расхождением скорости вращения Протосолнца и его жгута из-за дрейфа последнего. Сравнивая эти скорости со скоростями вращения наиболее активных звезд, мы видим, что материнское небесное тело, породившее нашу планетную систему, относилось, так же, как и Солнце, к классу “желтых карликов”. Собственно, ожидать чего-либо иного от звезды, заброшенной на периферию Галактики, не приходится. Можно также констатировать, что скорость вращения жгута Протоядра Галактики, давшего жизнь спиральной ветви, в которой сейчас находится Солнце, также была сравнительно невысокой — всего 250 км/с. Оказывается, в начале взрыва Протоядро Галактики вращалось лишь немногим быстрее, чем звезды классов O, B, A.

Не имея возможности в рамках данного исследования углубиться в детали проблемы фрагментации и расширения креационно-диссипативных структур до размеров сегодняшней Солнечной системы, мы, тем не менее, укажем на основные вехи расчета взрыва Протосолнца.

Наиболее вероятным процессом при взрыве является, очевидно, процесс послыонного продвижения вглубь ядерных реакций. Во время переход-

ного процесса оболочка небесного тела превращается в “слоеный пирог”, где каждый нижележащий слой выталкивает расположенные над ним слои плазмы. Так как плотность слоев к поверхности снижается, то вышележащие слои приобретают особо высокую скорость.

Например, пороховые газы во время стрельбы выбрасывают из оружейного ствола снаряд со скоростью 2,81 км/с. Но если между пороховым зарядом и снарядом закачать легкий газ — водород, то пороховые газы вначале сожмут слой водорода (“подушку”). Затем сжатый до высоких давлений водород, расширяясь, сообщит снаряду космическую скорость 10–11 км/с [75, 76].

По этой схеме были сброшены в космос верхние слои оболочки Протосолнца, не участвующие в глубинных реакциях.

Далее, с повышением давления внутри ядра Протосолнца в результате взрыва, начался синтез новых элементов. При этом можно предположить, что определенная часть каждого вновь синтезируемого элемента приобретала скорость во время реакции, достаточную для выхода в космос. Эта часть вещества уносила с собой некоторое количество движения. Такое же количество движения, судя по результатам испытания реактивной турбины, сообщалось Протосолнцу, что способствовало увеличению числа его оборотов.

Оставшаяся часть вновь возникшего элемента проникала вглубь и вступала в очередную стадию ядерных реакций. Такая последовательность событий привела к дифференциации скоростей вылета будущих планет-спутников.

Так, сжатая ударной волной плазма водорода из верхних слоев оболочки вытолкнула на дальнюю орбиту Протоплутон и его спутник. За ними последовали сгустки будущих планет-гигантов, рабочими телами которым служила смесь высокоионизированных газов — водорода и гелия. Причем соотношение этих компонентов изменялось от планеты к планете.

Наиболее массивный сгусток будущего Юпитера был выброшен потоком плазмы, ставшей затем атмосферой молодого Марса. По-видимому, это была смесь ионизированного водорода и водяного пара, точнее кислорода, синтез которого начался после сброса водородо-гелиевой оболочки.

Тот же поток, но с большим содержанием ионизированного кислорода, вывел на орбиту спутник Солнца — Протомарс. Впоследствии этот поток достался Земле в виде облака водяного пара.

В свою очередь, сжатая “подушка” из ионизированных углерода и кислорода отправила в космос Протоземлю и окутала затем прибывшую на свою орбиту Протовенеру. Добраться до места назначения Протовенере

помог поток ионизированных легких металлов и кислорода, осевших затем в виде оксидов на Меркурии.

И наконец, Протомеркурий использовал в качестве рабочего тела букет ионизированных газов на основе тяжелых элементов и кислорода.

Как видим, на ранней стадии развития Солнечной системы концентрация тяжелых элементов повышалась от ее периферии к центру, что частично сказалось на распределении плотности вещества образовавшихся планет.

Здесь следует особо подчеркнуть важность слова “частично”, поскольку мы рассматриваем распад “захожденного” жгута, двигавшегося сравнительно неглубоко в оболочке Протосолнца. По всей вероятности, жгут состоял из продуктов реакции, доставшихся Протосолнцу от Протоядра Галактики. Поэтому элементы, синтезированные непосредственно Протосолнцем, могли покрыть поверхность сформировавшихся планет лишь тонким слоем.

Таким образом, закон “гармоничных чисел”, соблюдаемый в распределении расстояний планет и Солнца, продиктован местом того или иного синтезированного при взрыве элемента в периодической системе элементов Д.И. Менделеева.

Похоже, что у нас уже достаточно данных для выполнения приближенного расчета.

Удобнее всего начать вычисления с оценки скорости отрыва от Протосолнца Меркурия. К этому моменту основная часть оболочки Протосолнца была сброшена в космос.

Поскольку Меркурий уже приобрел скорость движения по орбите в 47,7 км/с, то получается, что скорость его радиального выброса в космос была

$$v_m = 618 - 47,7 = 570,3 \text{ км/с,}$$

где знакомая нам величина 618 км/с представляет собой вторую космическую скорость на Солнце.

Далее предположим, что соотношение скоростей истечения потока ионизированного водорода, вытолкнувшего в космос Плутон, и потока ионизированных легких металлов с кислородом, отправивших на орбиту Меркурий, было тем же, что мы наблюдали в орудийном стволе при истечении пороховых газов и водорода.

В таком случае скорость отрыва Плутона будет

$$v_n = 3 \times 570,3 - 4,7 = 1706,2 \text{ км/с.}$$

Но Протосолнце было массивнее Солнца. Допустим, что его масса превышала массу Солнца на 30 %.

Тогда для отрыва Протоплутону понадобилась скорость

$$v_{\text{пл.н}} = 1,3 \times 1706,2 \approx 2218 \text{ км/с.}$$

Как видим, первоначальная скорость взрывного потока более чем в два раза превышала скорость истечения газов звездами Вольфа-Райе.

Займемся вылетом Земли. К тому времени от оболочки Протосолнца осталась примерно десятая часть. Отсюда скорость отрыва Земли будет

$$v_3 = (618 - 29,27) \times 1,03 \approx 606,4 \text{ км/с.}$$

Приведем для сравнения некоторые сведения. На том расстоянии, на котором сейчас находится Земля, для преодоления тяготения Солнца ей необходима скорость в пределах 41,74–42,45 км/с. Учитывая, что ее орбитальная скорость колеблется в пределах 29,27–30,26 км/с, находим, что ей следует сообщить скорость всего 12,47–12,8 км/с для того, чтобы полностью оторваться от Солнца [77].

Несомненно, что во время взрыва Земля получила дополнительный момент количества движения. Для его оценки воспользуемся данными по Юпитеру. Мы видим, что экваториальная скорость планеты равна 12,7 км/с, в то время как периферийные слои БКП вращаются со скоростью $5,15 \cdot 10^{-2}$ км/с. Иными словами скорость вращения Юпитера в 246 раз превышает скорость вращения вокруг своей оси БКП.

Перенесем это соотношение на скорость истечения выталкивающих газов и экваториальную скорость вращения Земли $v_{\text{эк.З}}$. Тогда получаем

$$v_{\text{эк.З}} = \frac{606,4}{246} \approx 2,5 \text{ км/с.}$$

Таким образом, экваториальная скорость вращения Протоземли была сравнительно невысокой — всего 2,5 км/с.

Тем не менее, при образовании в сгустке железного ядра и дальнейшей аккреции на нем остального вещества скорость формируемой планеты должна была возрасти, поскольку первоначальный момент количества движения изменялся слабо.

Таким образом, жидкая Земля была быстровращающимся эллипсоидом. Последнее обстоятельство при переходе вещества Земли из жидкого в кристаллическое состояние определило ее строение.

ВЫВОДЫ

Подведем итог нашему исследованию.

Итак, внутренние процессы, приводящие к пульсациям и вращению небесных тел, находят логичное объяснение в рамках теории “диссипативных” структур.

Возникающие в оболочках небесных тел динамические структуры обеспечивают подвод исходных компонентов в зону глубинных реакций и отвод продуктов реакций и энергии к их внешней поверхности. Наблюдаемые уплотнения и разрежения в потоках создают условия для квантования материи при взрыве.

При переходе из сплошного в дискретное состояние потоки, действовавшие в оболочках ядер галактик, распадаются на отдельные сгустки материи, из которых затем формируются скопления звезд.

Спиральные ветви галактик — это следы исчезнувших конструкций ротационно-диссипативных структур, обеспечивавших вращение протоядер, а кольца — пульсационно-диссипативных, что отвечали за их “дыхание”. Причем “дыхание” протоядер и протозвезд выражалось в их периодическом сжатии и расширении.

Вращение и пульсации небесных тел позволяли им найти наиболее оптимальные условия обмена энергией с окружающим космическим пространством.

По тому же принципу при взрыве Протосолнца образовалась наша Солнечная система.

Результаты испытаний пленочных и циркуляционных испарителей, контуры которых приняты в качестве аналогов креационно-диссипативных структур, позволили подтвердить, что основной момент количества движения после взрыва Протосолнца должен был (и как это есть на самом деле) сосредоточиться у планет.

Возникновение поясов астероидов и комет (реликта системы дыхания Протосолнца) не оказало существенного влияния на формирование Земли.

Распад креационно-диссипативных структур во время взрыва происходит по наиболее вероятному сценарию — по принципу “золотого сечения”.

Взорвавшаяся в далекие времена звезда (Протосолнце) обладала одним мощным “захожденным” потоком (жгутом), двигавшемся в ее оболочке с южного полюса к экватору. Жгут вращался вокруг своей оси примерно так же, как сейчас вращается поток на Юпитере.

При распаде жгута во время взрыва небесного объекта образовались планеты. Синтезируемые во время взрыва Протосолнца элементы создавали потоки, выталкивающие в космос сгустки будущих планет. Закон “гармоничных чисел”, соблюдаемый в распределении расстояний между планетами, продиктован местом того или иного синтезированного при взрыве элемента в периодической системе элементов Д.И. Менделеева.

Заброшенная на орбиту Солнца Протоземля вращалась вокруг своей оси с экваториальной скоростью примерно 2,5 км/с.

При конденсации вещества Земли ее скорость вращения многократно возросла. Жидкая Земля представляла собой быстро вращающийся эллипсоид.

ПЕРЕХОД ЗЕМЛИ ИЗ ЖИДКОГО СОСТОЯНИЯ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ

Современные представления о состоянии планеты выделяют литосферу — наружную зону, включающую в себя кору и верхнюю часть мантии приблизительно до глубины 70 км. Литосфера расколота примерно на 10 больших плит. Под жесткой литосферой расположен слой повышенной текучести — астеносфера. Из-за малой вязкости астеносферы литосферные плиты плавают в “астеносферном океане”.

Оболочечная структура Земли, как утверждают составители модели, является следствием дифференциации ее вещества под действием гравитационного поля в условиях разогрева недр. Под чехлом метаморфических и осадочных пород, имеющим переменную мощность, расположена континентальная кора, состоящая из двух главных слоев: гранитного и базальтового. Океаническая кора имеет базальтовый состав, и вся мантия состоит из ультрабазитов. Основными составляющими базальта и гранитов являются оксиды алюминия, кремния, магния, кальция и железа. Кроме того, у гранитов по сравнению с базальтами наблюдается повышенное содержание оксидов калия.

Внешнее ядро (30 % массы Земли) находится в жидком состоянии и представляет собой смесь серы (12 %) и железа (88 %). Внутренне ядро (1,7 % массы Земли) — твердое и состоит из железо-никелевого сплава (20 % Ni, 80 % Fe). Полагают, что основную часть тепла Земля получает в своих недрах за счет радиоактивного распада урана, тория и калия. Разогрев планеты мог также быть усилен теплотой, аккумулированной при образовании планеты, а также выделившейся при последующей гравитационной дифференциации вещества на силикатную мантию и железное ядро (рис. 18).

В результате гравитационной дифференциации вещества в недрах Земли и его дегазации возникли также гидросфера и атмосфера [78—85].

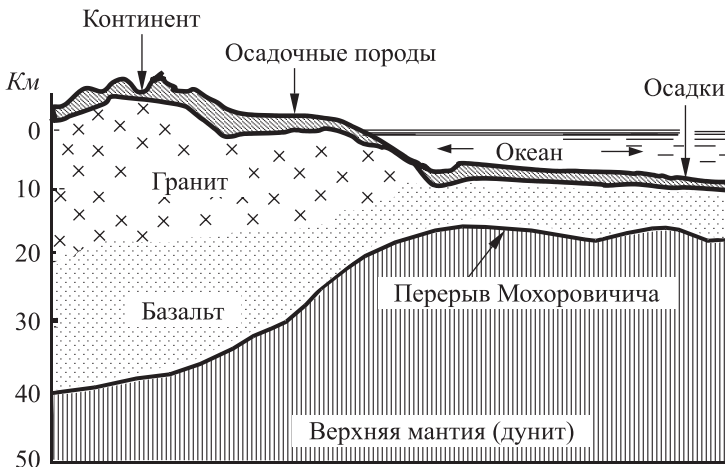


Рис. 18. Схематический разрез через континентальную и океаническую земную кору

Исследуем известную модель строения Земли на предмет ее соответствия установленным нами термодинамическим ограничениям. В частности, проверим, возможно ли перед отвердеванием планеты встречное движение потоков железа с одной стороны и воды с оксидами алюминия и кремния с другой.

2.1. ФОРМИРОВАНИЕ ЛИТО- И ГИДРОСФЕРЫ

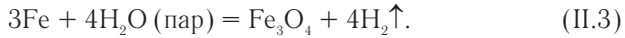
Итак, под воздействием гравитационного поля железо стремится опуститься к центру разогретой Земли, а более легкие оксиды и вода — подняться к ее поверхности. Напомним, что масса воды в Мировом океане составляет всего лишь 0,02 % массы Земли, в то время как масса сплавов железа, сосредоточенная в ядре, превышает 30 % ее массы. Вряд ли ручейкам поднимающейся вверх воды удалось избежать роковой встречи с мощными потоками жидкого железа, стремящимися к центру Земли. Очевидно, что контакт между этими потоками неизбежен.

Проследим, к чему это приведет. При изобарно-изотермических условиях возможность химических и фазовых превращений в закрытой системе* определяется уравнением

$$\Delta G_i^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0. \quad (\text{II.1})$$

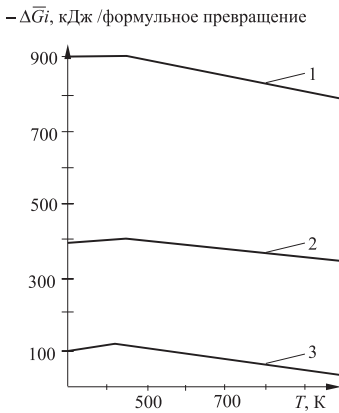
* Система состоит из двух подсистем, открытых друг для друга.

На рис. 19 даны расчетные значения ΔGi^0 для двух типов реакций [86]



Здесь же приведены данные по взаимодействию алюминия и кремния с водой и водяным паром.

В расчетах использованы табулированные значения величин ΔH^0 и ΔS^0 , представленные в справочной литературе [87]. Отрицательные значения



1 — Al; 2 — Si; 3 — Fe.

Рис. 19. Зависимость изменения средней энергии Гиббса от температуры при взаимодействии с водой и водяным паром

изобарно-изотермического потенциала свидетельствуют о высокой вероятности рассматриваемых реакций и, в частности, железа с водой.

Следовательно, сегодняшняя модель образования океана путем “вытапливания” воды из земных недр не укладывается в формат нашего дальнейшего исследования, и мы вынуждены с ней распрощаться. В таком случае нам остается предположить, что вода поступила на поверхность Земли из ее атмосферы. Впрочем, высказанная идея не нова, поскольку еще в начале прошлого века она была широко распространена среди отечественных ученых [16].

Подкрепить наше предположение позволяет сравнение протоатмосферы Земли с протоатмосферами ближайших планет, например, Юпитера и Сатурна.

Обе последние планеты являются водородо-гелиевыми. По массе твердое ядро Юпитера составляет 3–4 %, а ядро Сатурна — 26–28 % от полной массы.

Теперь нам нужно объяснить, как согласно известной теории столь значительные жидкие массы планет смогли “вытопиться” из ничтожно малых ядер. Практически обсуждаемый здесь процесс относится к категории маловероятных. Отсюда следует вывод, что облака газов и, возможно, вещество протоядер возникли изначально в виде сгустков материи, отделившихся при взрыве протозвезды. Предполагают, что при формировании планет вначале из конденсата образовались ядра, а затем на возникшую твердую поверхность происходила аккреция газов [88, 89].

Совершенно очевидно, что если ядра Юпитера и Сатурна сумели удержать возле своей поверхности столь массивные газовые оболочки, то гравитационному полю нашей планеты не составляло особого труда обеспечить притяжение слоя водяного пара, масса которого к тому же не превышала 0,02 % от ее полной массы.

Далее, известная теория не в состоянии объяснить, почему на Земле возникли материки. Между тем внешний облик планеты служит основой для расшифровки всей ее предыдущей истории.

Вновь обратимся к энергетическим преобразованиям, сопровождавшим образование Земли. Можно не сомневаться в том, что приток лучистой энергии от ближайшей звезды и ее сток в космос послужили главной причиной появления мощных течений в оболочке жидкой Земли. Само образование материков, в очертаниях которых мы видим застывшую структуру древних потоков, подтверждает справедливость данного предположения. Вместе с тем, нет никакой гарантии в том, что в среде глинозема, кремнезема и железняка, вязкость которых в расплавленном состоянии на несколько порядков выше вязкости воды [90, 91], могли возникнуть столь мощные течения. Вряд ли той механической энергии, что вырабатывалась Землей как тепловым двигателем, хватило бы для проталкивания высоковязких потоков на тысячи километров с экватора к полюсам и обратно.

Скорее всего, вязкость компонентов жидкой Земли лишь немногим отличалась от вязкости воды. Если допустить ее трех- или четырехкратное превышение, то эта величина совпадает со значением вязкости сплава ферросиликоалюминия (ФСА) [92–94].

Итак, мы установили, что на определенном этапе своей эволюции Земля состояла в основном из сплава железа, алюминия и кремния. Судя по всему, наш вывод не так уж далек от истины. В самом деле, если уж мы в первичных условиях предоставили железу право не взаимодействовать с водой, то, согласитесь, было бы не совсем справедливо по отношению к алюминию и кремнию лишать их такой же возможности.

Температура жидкого ФСА находится в пределах 1600–1700 °С. Сомнительно, чтобы при атмосферном давлении и такой высокой температуре жидкая вода могла существовать в верхних слоях Земли. Если же всю массу океанской воды испарить, то образовавшийся слой пара поднимется ввысь на многие сотни километров, а давление на поверхность Земли возрастет до нескольких десятков атмосфер. В этих условиях пары сплава ФСА, несмотря на разделительный слой восстановительных газов, будут взаимодействовать с водяным паром, и над Землей разрядятся дожди из капель оксидов алюминия, кремния и железа.

Таким образом, в поверхностных слоях Земли длительное время циркулировали потоки пульпы, состоящей из сплава ФСА и его оксидов. Впрочем, химическое сродство алюминия и кремния к кислороду значительно выше, чем у железа (рис. 19). Поэтому большая часть оксидов железа восстанавливалась алюминием и кремнием до чистого железа. Именно эти сплавы и отчасти их оксиды послужили основным материалом для намыва материков.

Но еще долго раскаленное ложе Мирового океана оставалось пустым, пока снижение температуры и давления атмосферы не привело к конденсации водяного пара. Первые потоки воды двигались в остывающее ложе океана с полюсов Земли. Сам процесс формирования океана занял примерно 500 млн. лет [95]. Древний океан ровным слоем покрывал как низменные, так и возвышенные участки Земли, включая материки. Но затем, по мере взаимодействия алюминия, железа и кремния с водой, вырастали горные хребты. Постепенно континенты освобождались от воды. Этот процесс продолжается и сейчас, хотя фронт реакции опустился уже на глубину нескольких десятков километров.

В пользу развиваемой здесь теории говорит наблюдаемое соотношение между числом вулканов на суше и в океане. Кажется вполне логичным утверждать, что вероятность реакции сплава ФСА с водой в недрах Земли под океаном значительно выше, чем под материками, по той простой причине, что в первом случае расстояние от воды до зоны реакции значительно меньше, чем во втором. Действительно, мы видим, что в океане существует более 10 тысяч вулканов, а на суше проявляют активность лишь 817. Причем последние расположены, как правило, на островах или полуостровах, т.е. вблизи морей и океанов [96].

В результате реакции алюминия, кремния и железа с водой образуются оксиды этих элементов и водород. Именно из кремнезема, глинозема и железняка состоит основная часть литосферы.

Так, В.И. Вернадский полагал, что до глубины 25 км и больше алюмосиликаты и силикаты являются, несомненно, преобладающими, строящими земную кору минералами.

Свойства вещества этой части планеты, помимо кислорода, определяются, прежде всего, свойствами двух элементов — кремния (Si) и алюминия (Al). Эти элементы составляют в среднем больше трети массы земной коры, заключающей по весу 26,0 % Si и 7,45 % Al, всего 33,45 %.

По распространенности металлов в земной коре следующие пять металлов занимают первое место: Fe, Ca, Na, Mg, K. Их общее содержание по весу в земной коре (до 20 км) равняется 14,55 %. Все остальные метал-

лы не дают и 0,4 % по весу ее вещества. Особняком среди этих пяти элементов стоит железо, так как для него значительная часть атомов наблюдается вне связи с кислородом, а другая, являясь аналогом глинозема, занимает особое положение в кремнеземно-глиноземных кристаллохимических структурах (в ядре) [97].

В последних своих работах Вернадский высказывал следующую мысль: “С глубиной кислород быстро сходит на нет, и, по-видимому, растет количество водорода. В то же самое время температура и давление повышаются. Все это может приводить к сохранению в этих глубинах водородистых соединений. Есть указание на общий процесс с глубиной: замену CO_2 углеводородами. Именно для метана исключительная связь с жизнью сомнительна, так как этот легкий газ имеет свойства, напоминающие водород” [98].

Примерно к такому же выводу можно прийти, сравнивая химический состав атмосфер и распределение массы вещества среди планет Солнечной системы. Так, мы видим, что основная масса выброшенного в космос вещества сосредоточена в планетах-гигантах Юпитере, Сатурне, Уране и Нептуне. В свою очередь, мощные атмосферы и оболочки этих планет состоят, главным образом, из водорода и гелия. Следовательно, в оболочке Протосолнца преобладала восстановительная среда. Отсюда можно сделать вывод, что большинство планет земной группы сложено из чистых элементов и их гидридов.

Очевидно также, что основная масса кислорода была синтезирована на заключительной стадии взрыва, когда давление в ядре Протосолнца резко повысилось. Последнее обстоятельство привело к тому, что в верхних слоях планет земной группы и в их атмосферах появились оксиды различных элементов.

В свете полученных знаний продолжим детализацию модели строения Земли.

2.2. ОБРАЗОВАНИЕ МАТЕРИКОВ

В известной теории строения Земли практически отсутствует раздел, касающийся последовательности кристаллизации литосферы. Возьмем на себя смелость восполнить этот пробел.

Предлагаемая версия развития событий основана на открытых ранее закономерностях перераспределения тепла в оболочке Земли в результате возникновения ротационного эффекта [10]. Согласно этому эффекту потоки расплавленного ФСА, обладающие высокой температурой, двигались с

экватора к полюсам, частично испаряясь. Поскольку одновременно шло взаимодействие паров сплава ФСА с водяным паром, то в результате генерировалось значительное количество механической энергии, передаваемой Земле. Земля, в свою очередь, преобразовывала эту энергию в момент количества движения и затем передавала его “захожденным” потокам сплава ФСА, перемещая их с полюсов к экватору.

Непрерывная переброска избытка энергии из экваториальной зоны расплавленной планеты к полюсам осуществлялась путем забора массы жидкого сплава из ложа Атлантического и Тихого океанов и ее нагнетания, но уже в охлажденном виде, по направлению к экватору в районы расположения будущих материков. Добиваясь минимальных затрат энергии, Земля, действуя как турбонасос, перемещала потоки по кратчайшему пути как в Северном, так и в Южном полушарии. То же самое можно сказать о Восточном и Западном полушариях. Иными словами, в каждой четверти шаровой поверхности Земли, как и сейчас, действовал свой сугубо обособленный от других циркуляционный контур. В итоге при равномерном остывании планеты на свет должно было появиться не менее четырех континентов — по два в каждом полушарии.

Вначале, используя внешние признаки континентов, попытаемся расшифровать динамику их построения. Своим острым концом каждый континент направлен к Южному полюсу, а расширяющейся частью — к Северному. Клинья вытянуты в меридиональном направлении, что обеспечивало их минимальное сопротивление течению “захожденных” потоков (см. рис. 20). Очевидно, что на Северном полюсе изначально сформировалась просторная чаша дна расплавленного океана, а на Южном — архипелаг. Возможности этих двух образований, выполняющих роль насосов, различные, поэтому южные “холодные” течения преобладали над северными. Причем дно Северного океана постоянно изменяло по широте место выброса расплавленной массы к экватору. В результате застывшая кромка ближайших материков создавала ожерелье вокруг чаши расплавленного океана. Таким способом формировались основания клиньев северных континентов.

В то же время берега Антарктиды, где сток энергии в космос был гораздо интенсивнее, чем на Севере, успешно нагнетали остывающую массу на “острие” каждого клина. По мере возрастания сопротивления какого-либо сформировавшегося материка течению потоков место подачи расплавленной пульпы к экватору смещалось по широте на “острие” вновь заходящего континента.

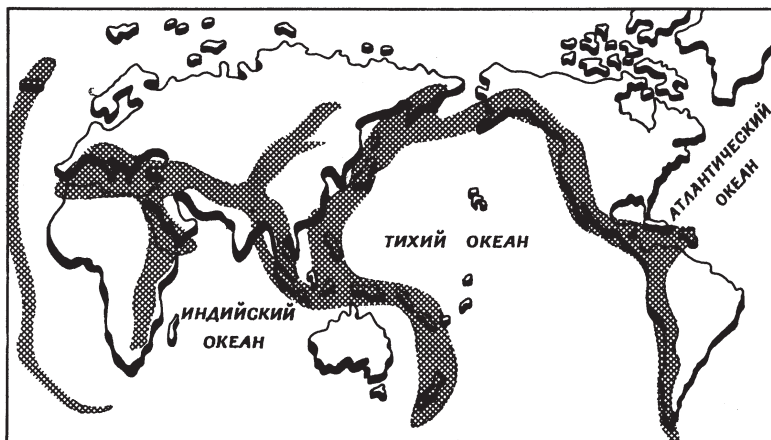


Рис. 20. Контуры материков. Сетка нанесена на области со значительными запасами геотермальной энергии, в основном совпадающими с районами вулканической деятельности и горообразования

Южные более мощные течения теснили остывающую массу будущих материков на Север от экватора. По этой причине основная часть суши оказалась в Северном полушарии. При внимательном рассмотрении южных материков мы обнаруживаем, что их клиновидная форма не обладает полной симметрией в меридиональном направлении. Создается впечатление, что при формировании Африки и Австралии сила Кориолиса отклоняла “холодные” южные потоки на Запад, и, следовательно, направление вращения Земли совпадало с сегодняшним. В то же время геометрия береговой линии и наклон поверхности Южной Америки говорят о противоположном направлении вращения Земли. Возможно, что уже в период образования материков Земля изменяла свое направление вращения.

На конечной стадии формирования будущей суши возникли Австралия, Новая Зеландия, остров Мадагаскар, острова Северного ледовитого океана и, вероятно, Гренландия. В этот момент из-за недостатка жидкой фазы Земля перешла в пульсационный режим вращения. Как уже нам известно, в таких случаях циркулируемые потоки нагнетаются к экватору отдельными порциями. Наибольшая из них пришлась, очевидно, на возникшую из небытия Австралию.

Вскрытые закономерности не допускают иного расположения материков, как только вдоль меридианов. Единственными силами, способными развернуть континенты, являются силы компрессионного эффекта. Эф-

фekt, как нам уже известно, возникает в горах при торможении высокоскоростных влажных потоков. В Кордильерах и Гималаях барические силы действуют по касательным к сечениям Земли, расположенным, в свою очередь, параллельно экваториальному сечению, т.е. в широтном направлении. Собственно, эти силы обеспечивают вращение Земли.

Но в период формирования материков гор еще не было, что позволило материкам достаточно прочно закрепиться в кристаллизующейся литосфере. Иное дело — острова. Астеносфера в то время находилась вблизи поверхности Земли, и малые образования закристаллизовавшегося вещества могли смещаться по ней под напором мощных течений. В таком случае вполне логично будет предположить, что остров Мадагаскар и Новая Зеландия являются, скорее всего, осколками размытых и снесенных потоками на Восток перешейков Антарктиды с Африкой и, соответственно, с Австралией.

Причиной разрушения перешейков могло быть снижение Землей числа оборотов. Вследствие этого планета теряет свой гироскопический эффект, что, в свою очередь, приводит к изменению положения ее оси вращения в пространстве. В этот период возникают довольно мощные инерционные силы, действующие в меридиональном направлении. Но смещение островов под действием этих сил не может превышать уровень пространственного колебания полюсов Земли.

Необходимо при этом отметить, что если остывающая Земля изменяла свое число оборотов или направление вращения, то это могло произойти лишь в результате внешнего воздействия на Солнечную систему, что является маловероятным событием.

В изложенную здесь летопись Земли слабо вписывается судьба Гренландии. Слишком уж непохож горный ландшафт Гренландии на расположенные рядом равнины Канады. Необходимо, конечно, учитывать минералогическое родство этих двух образований [99]. Но гидродинамические закономерности говорят о том, что этот остров-гигант мог появиться на свет одновременно с Антарктидой. Можно предположить, что именно Гренландия на ранней стадии кристаллизации жидкой планеты, находясь строго на Северном полюсе, нагнетала, как насос, расплавленную массу в направлении Аляски и Скандинавии. Но затем малые размеры острова по сравнению с Антарктидой не позволили ему закрепиться на своем законном месте, и крутящий момент во взаимодействии с течениями заставил его дрейфовать к побережью Северной Америки. В пользу выдвинутого предположения говорит совпадение очертаний берега Гренландии с профилем котловины Северного Ледовитого океана.

Остановимся на механизме образования Антарктиды и Гренландии. Из опытных данных по вихревым движениям следует, что в опускающихся потоках в стесненных условиях может происходить выброс вверх струи жидкости при сравнительно высоком давлении. Очевидно, что с ростом числа оборотов Земли на ее полюсах происходило выдавливание вверх из опускающихся потоков части циркулирующего вещества, из которой затем при остывании образовались Антарктида и Гренландия.

Нами уже отмечалось, что сток энергии на Южном полюсе был выше, чем на Северном. В результате Южное полушарие жидкой планеты вращалось несколько быстрее Северного, что в период кристаллизации должно было привести к проявлению торсионного эффекта. Эффект заключается в малозаметном закручивании по спирали остывающих меридиональных “волокон” Земли, включая материки, вокруг ее оси вращения.

Действительно, мы видим, что центральный меридиан Южной Америки несколько смещен по широте на Восток по отношению к центральному меридиану Северной Америки. Точно то же самое наблюдается у Австралии по отношению к Азии. На S-образно изогнутые осевые линии континентов обращал внимание еще П. Фурмарье [84].

Положение Африки отклоняется от установленного правила. Мы вернемся к этому вопросу после обсуждения характера подземных реакций, способствовавших смещению данного континента по поверхности Земли.

Нас, конечно же, интересуют причины возникновения причудливых очертаний Европы, этой колыбели западной цивилизации. Не меньшего уважения заслуживают очаги восточной культуры — Китай и Япония, форма берегов которых также требует соответствующего объяснения.

В своих рассуждениях нам никак нельзя полагать, что в период “намыва” континентов шел только процесс кристаллизации вещества. На самом деле этот процесс преобладал лишь на полюсах, а ближе к экватору наблюдалась обратная картина: здесь “намытые” материки “таяли”.

Солнечное излучение, пробивающееся через толщу облаков, и тепло земных недр продолжали расплавлять застывающую массу в зонах столкновения северных и южных потоков. Образовавшиеся дислокации под давлением окружающих пород эмигрировали в восточном направлении, одновременно вращаясь вокруг своей оси и уменьшаясь в размерах. Причем форма дислокаций сохранялась неизменной. Об этом свидетельствуют контуры береговых линий восточной части Средиземного моря, Черного и Каспийского морей [85], а также озера Байкал, впадина которого является последней из дислокаций на их пути из Европы в Восточную Азию (рис. 21).

Возможно, под слоем более поздних отложений на всем протяжении от Средиземного моря до Японского скрыты дислокации древних пород аналогичного по форме типа.

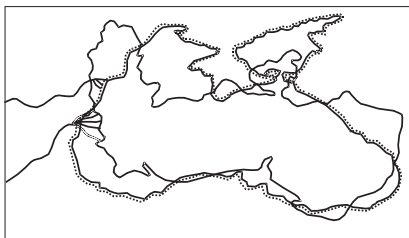
В Западной полушарии Солнце успело расплавить котловины Мексиканского залива и Карибского моря. Таким же образом вблизи побережья Азии возникли впадины Охотского, Японского, Восточно- и Южно-Китайских морей. Не отставали от “разрушительной деятельности” и возникающие в этих котловинах потоки расплавленной массы. Так, например, Европа могла выглядеть достаточно цельным материком, по форме напоминающим компактную Аляску. Но после того как Гренландия примкнула к Восточному побережью Канады, в Западной полушарии резко изменилась гидродинамическая обстановка. Южные высокотемпературные потоки двинулись из района Карибского моря по маршруту сегодняшнего Гольфстрима, размывая встретившийся на их пути почти сформировавшийся материк. В итоге Европа приняла форму клина, направленного своим не совсем острым концом на встречу “губительному” для нее течению.

Таким же способом потоки,двигающиеся из Южно-Китайского моря, размывали и сглаживали берега Японии и Китая. Но, в конце концов, остывание Земли привело к окончательной фиксации формы континентов в том виде, в котором мы обнаруживаем их сейчас.

Установив динамику образования материков, приступим к изучению их внутреннего строения. Попутно уделим внимание строению всей Земли.

2.3. СТРАТИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В НЕДРАХ ЗЕМЛИ

Сейсмические исследования показали, что материковые погружены в окружающие породы на глубину 30–40 километров. Как видим, глыбы материков по мере своего роста медленно опускались в высоковязкую часть остывающего расплава. В то же время легкотекучая часть, формируя потоки, продолжала пополнять верхние слои материков. Разделение жидкой массы на легкоплавкую и тугоплавкую означает, что одновременно с “выращиванием” материков циркуляция потоков обеспечивала фракционирование



— Каспийское море;

⋯ Черное море.

Рис. 21. Совмещение контуров Черного и Каспийского морей с поворотом одного из них на 90°

ние первичного сплава. В итоге под океаном расположились тяжелые кремниевые сплавы, давшие в дальнейшем жизнь базальтовым породам, а под сегодняшними осадочными слоями материков — более легкие, из которых затем образовался гранит. По той же причине месторождения бокситов, кальциевых и магниевых руд оказались в верхних слоях материков.

Проследим этот процесс на примере разделения сплава ФСА.

2.3.1. Разделение сплава ферросиликоалюминия (ФСА)

В экспериментальных исследованиях нам необходимо установить, в какой мере гравитационное и центробежное поля повлияли на распределение элементов в Земле. В идеальном варианте состав сплава ФСА должен соответствовать тому, что был в период кристаллизации Земли. Но поскольку полностью это условие выполнить невозможно, то мы возьмем для опытов сплавы, получаемые из углей.

Как известно, неорганическая часть энергетических углей состоит в основном из оксидов железа, алюминия и кремния с примесями малых элементов [100–102].

В настоящее время на отечественные ТЭС поступает уголь, неорганическая часть которого достигает 25–30 %. Между тем известно, что лишь 1–2 % неорганических соединений принадлежит непосредственно деревьям, сформировавшим угольные месторождения, а все остальное относится к наносным отложениям. Следовательно, 400–500 млн. лет назад, когда Землю покрывали тропические леса, большая часть ее поверхностных слоев состояла из кремнезема, глинозема и железняка.

Технология выплавки ФСА из углистых пород и отходов углеобогащения изложена в работах [103–106]. Требуемый уровень содержания Si и Al в сплаве достигается при температурах шихты в рудно-термических печах в пределах 1900–2500 °С. Количество углерода в шихте находится в пределах 25–35 %. Реакция восстановления сплавов из оксидов сопровождается выделением промежуточных газообразных продуктов, в частности, субоксидов алюминия и кремния. Большая часть этих субоксидов улавливается и возвращается вновь в цикл встречным потоком холодной шихты, поступающей в печь.

Выпускаемый в настоящее время для металлургических и машиностроительных предприятий стандартный ФСА содержит в своем составе, % масс.: 15–25 Al; 55–60 Si; 15–30 Fe. В сплаве имеются примеси P, S, Ca, Mg, Na, K и ряда других микроэлементов.

Разделение ФСА на отдельные элементы в центробежном поле изучалось на примере расслоения этого сплава во время грануляции. Грануля-

ции подвергался сплав марки ФС55А25 (состав сплава, масс. %: 55 — Si; 22,5–27,5 — Al; 0,03 — S; 0,07 — P; 0,4 — Mn; 0,4 — Cr; остальное — Fe)*. Плотность сплава — 3,94 кг/дм³. Схема установки представлена на рис. 22 а.

При работе стенда расплавленный в индукционной печи сплав через штуцер А заливался в перфорированный стакан 2. При вращении вала 3 электродвигателем 4 капли сплава вылетали из перфораций стакана и подхватывались потоком инертного газа (или воды), поступающего в корпус 1 через тангенциальный штуцер В. Охлаждение и кристаллизация капель

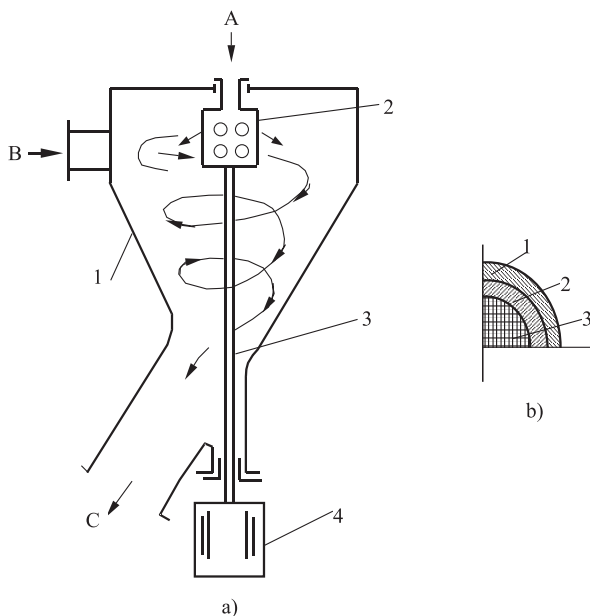


Рис. 22.

а) Схема гранулятора

1 — корпус гранулятора; 2 — перфорированный стакан; 3 — вал; 4 — электродвигатель; штуцеры: А — подача расплавленного сплава; В — ввод инертного газа или воды; С — выход газа и гранулированного продукта.

б) Разрез гранулы

1 — алюминий; 2 — кремний; 3 — железо.

* Грануляция выполнена Научно-исследовательским институтом металлургии (НИИМ, г. Челябинск) в порядке сотрудничества с ИПМаш НАН Украины (г. Харьков).

происходила во вращающемся потоке газа. Готовые гранулы выводились с газом через штуцер С.

Грануляция производилась при следующих параметрах: число оборотов вала — 1000–1400 об/мин; скорость ввода инертного газа в корпус гранулятора — 20–30 м/с; температура инертного газа — 18–20 °С. Размер гранул регулировался за счет изменения числа оборотов вала и скорости подачи газа в гранулятор. В зависимости от установленного режима получали или шаровидные гранулы диаметром 1–2 мм или веретенообразные того же диаметра в максимальном поперечном сечении, но длиной 4–5 мм.

На рис. 22 б дан разрез одной из гранул. Как видим, в центре шарика разместилось железо, над ним — кремний, а на поверхности — алюминий. Важно отметить, что при температуре плавления ФСА алюминий имеет плотность примерно 2,2 кг/дм³, кремний — 2,3 кг/дм³, а железо — 7,8 кг/дм³ [92–94].

Если придерживаться общепринятой теории декантации, то центробежные силы во вращающейся капле должны были бы отбросить тяжелое железо к периферии, в промежуточный слой оттеснить кремний, а в центре частицы оставить алюминий. Но разрез гранулы показывает, что элементы ведут себя “противозаконно”.

Хотя кристаллизация сплава ФСА длится доли секунды, все же этого времени, как мы видим, оказалось вполне достаточно для того, чтобы алюминий выделился на поверхности гранулы. Ситуация проясняется при сравнении температур кристаллизации элементов. Известно, что жидкое железо переходит в кристаллическое при температуре примерно 1539 °С, кремний — 1415 °С, алюминий — 660 °С [92–94]. Следовательно, расслоение сплава ФСА произошло в строгом соответствии с температурами кристаллизации составляющих его элементов.

Назовем вновь открытый эффект центробежным разделением по температурам кристаллизации (ЦРТК). Надо отметить, что для проявления ЦРТК необходимо достаточно мощное силовое поле. Так, например, индукционный нагрев сплава ФСА в кварцевых трубках до температуры плавления, выдержка его некоторое время в жидком состоянии и последующая кристаллизация при естественном охлаждении не дали желаемого результата. Гравитационное поле сумело произвести лишь слабую ликвацию кристаллизующего сплава.

Как мы уже смогли убедиться ранее, крутящий момент жидкой Земли был довольно значительным. Это обстоятельство предопределило строение нашей планеты.

2.3.2. Центробежное расслоение жидкой Земли

Придерживаясь установленной при разделении ФСА закономерности, мы приходим к выводу, что в центре Земли должны находиться сплавы железа с тугоплавкими металлами. К ним относятся: вольфрам, рений, осмий, тантал, молибден. Температура кристаллизации этих элементов при атмосферном давлении находится в пределах

$$2610 < t < 3410 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Центральную область ядра должны окружать сплавы железа с иридием, ниобием, рутением, гафнием, родием, ванадием и хромом. У данных элементов [107, 108]:

$$1875 < t < 2442 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Примерно в том же диапазоне располагаются температуры кристаллизации карбидов перечисленных металлов [108, 109], что также позволяет им входить в состав ядра Земли. Во внешнюю оболочку твердого ядра, как это ни странно, попадают карбиды легких металлов — алюминия, бора и бериллия, а также кремния. Температура кристаллизации этих твердых растворов при атмосферном давлении

$$2150 < t < 2830 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Итак, похоже, что карбиды будут сопровождать основные элементы вплоть до астеносферы.

Жидкая оболочка твердого ядра состоит, по-видимому, из сплава железа с никелем (1453 °С), кобальтом (1493 °С) и титаном (1668 °С). Здесь же находится карбид железа (1650 °С)*.

Общее содержание сплавов, включая карбиды, в массе железного ядра должно быть сравнительно невысоким. Безусловно, значительное давление в недрах Земли изменит кристаллическую решетку сплавов и повысит температуру их плавления [110]. Но соотношение между температурами кристаллизации сохранится, и потому рассмотренная слоистая структура не изменится.

Закончив с размещением железа и его сплавов, перейдем к декантации следующих наиболее распространенных элементов — кремния, магния, кальция и алюминия. Большая часть мантии Земли, вплоть до астеносферы, сложена, по всей вероятности, из кремния (1415 °С) и его сплавов. Причем, как полагают, среди сплавов преобладают магниевые.

* В дальнейшем в скобках будут указываться температуры кристаллизации чистых элементов.

На ранней стадии формирования слоистой структуры Земли еще до периода конденсации водяного пара из атмосферы эти же компоненты составляли основную часть литосферы. Более легкий сплав кремния с калием вошел в состав фундамента материков. Мощные течения вынесли в их поверхностные слои легкоплавкие элементы и их сплавы. Так, зону над фундаментом занял кальций (842–852 °С), затем над ним — алюминий (660 °С), а еще выше — магний (650 °С).

Такие соединения, как нитриды и сульфиды, должны расположиться, судя по температурам их кристаллизации, более или менее равномерно в толще Земли, играя роль включений в слоях основных элементов [108].

Нас, конечно, крайне интересует поведение свободного углерода в данной ситуации. Дело в том, что углерод, обладая высокой температурой кристаллизации (3500 °С), одним из первых должен был бы появиться в ядре Земли. Но, с другой стороны, низкая плотность (1,75 кг/дм³) [111] неизбежно привела бы к его вытеснению в поверхностные слои окружающими более тяжелыми элементами. Поскольку мы не видим в литосфере крупных месторождений чистого “всплывшего” углерода, кроме незначительных алмазных и графитовых, то можно предположить, что скорость кристаллизации компонентов земных слоев опережала скорость декантации углерода. В таком случае углерод, не вошедший в состав карбидов, оказался “запечатанным” в толще Земли, и его содержание должно нарастать к ее центру. По мере протекания подземных реакций углерод сосредотачивался в месторождениях известняка и доломита, а в дальнейшем с развитием жизни на Земле — в залежах угля и нефти.

Здесь мы обратили внимание на кристаллизацию и стратификацию лишь тех элементов, содержание которых в земных породах превышает 2–3 % [112]. Вполне объяснимое исключение было сделано лишь для углерода.

Размещение “малых” элементов в слоистой структуре имеет свои особенности. Дело в том, что эти элементы, растворяясь в металлах и металлоидах, образуют довольно прочные химические соединения [113, 114]. Возникающие на атомном и молекулярном уровнях электромагнитные силы препятствовали декантации этих элементов в центробежном поле Земли. По этой же причине часть железа оказалась в литосфере.

Преобладающая роль в сегодняшнем распределении соединений “малых” элементов в земной коре принадлежит вулканам, ледникам, потокам воды и воздуха, циркулировавшим в литосфере в более поздние этапы развития планеты, а также живой природе.

Но остался еще один крайне заметный элемент, присутствие которого мы видим в 95 % жизненно важных для нас соединений. Речь идет о водороде.

Есть достаточно оснований считать, что нижние слои астеносферы являются границей между кислородными и бескислородными соединениями кремния, к которым мы относим также ФСА. Именно здесь в слое малой толщины проходит основная реакция взаимодействия воды с кремниевыми сплавами. На каждый килограмм израсходованного кремния выделяется 1,4–1,6 м³ водорода. Основная его масса в чистом виде или соединившись с углеродом или серой диффундирует к поверхности Земли [95, 115]. Но незначительная доля проникает к центру Земли. Дело в том, что протоны способны довольно легко внедряться в кристаллическую решетку металлов и металлоидов, образуя с ними твердые растворы или газообразные гидриды. Как правило, в дислокациях атомарный водород рекомбинирует в молекулярный, который, в свою очередь, обладает также высокой проникающей способностью [116–121]. В связи с этим можно полагать, что присутствие водорода будет наблюдаться повсеместно от зоны реакции и до ядра Земли, но наибольшая его концентрация должна быть в непосредственной близости от астеносферы.

Впрочем, не исключено, что жидкая часть ядра состоит из гидридов, образованных с участием реликтового водорода, доставшегося Земле непосредственно от оболочки Протосолнца.

Как видим, наше исследование, выполненное исходя из чисто термодинамических предпосылок, в итоге подтверждает удивительную прозорливость Вернадского В.И. в части распределения веществ в недрах Земли.

Осветим несколько фрагментов истории атмосферы.

Формирование океана привело к изменению состава атмосферы. Над планетой начались непрерывные дожди, сопровождавшиеся грозowymi разрядами. Под воздействием молний происходил электролиз водяного пара. Разложение воды на кислород и водород наблюдалось также в верхних слоях атмосферы под влиянием ультрафиолетовых лучей Солнца. Образующийся водород как наиболее легкий газ устремлялся вверх и затем уходил в космос. В результате в воздухе постепенно накапливался кислород. Таким способом еще задолго до начала фотосинтеза растений в атмосфере образовалось около 25 % существующего в настоящее время кислорода [122].

С появлением первых организмов деятельное участие в регулировании содержания кислорода и углекислого газа в оболочке планеты стала принимать живая природа [123].

Итак, нам удалось в основных чертах раскрыть закономерности размещения элементов в недрах Земли. Последовательность дальнейших событий определялась тем, насколько быстро вода океана, проникающая в глубины за счет естественной циркуляции, достигала того или иного слоя элементов. Здесь следует подчеркнуть, что породообразующие сплавы при своем окислении реагировали именно с водой, а не с растворенным в ней кислородом или кислородом воздуха [122].

Формирование полезных для нас месторождений ископаемых началось с образования залежей оксидов магния, магнезита, доломита и других магниевых минералов. При дальнейшем продвижении фронта реакции в глубь Земли появились месторождения бокситов, нефелинов, глины и каолины. За ними в меловой период возникли залежи известняка, мрамора, мела и гипса. При оценке рудообразования важно учитывать термодинамические соотношения, установленные для природных систем [124–127].

Но нас в данном случае интересует не распределение полезных ископаемых, а количество тепла, выделяемое подземными реакциями. В связи с этим основное внимание далее уделим реакции взаимодействия ферросиликоалюминия с водой. Как уже говорилось, сплав ФСА являлся основным породообразующим материалом.

В качестве эталона для сравнения примем реакцию активированного алюминия с водой. Кроме оценки общего количества выделяемого тепла, нам необходимо найти скорость протекания перечисленных выше реакций. Это позволит рассчитать периоды и мощность землетрясений, что, в свою очередь, даст возможность обеспечить безопасность эксплуатации геотермических электростанций.

В дальнейшем при рассмотрении химических процессов будем руководствоваться четко установленными к настоящему времени положениями. В частности, на общее выделение или поглощение энергии при той или иной химической реакции более или менее существенное влияние оказывает переход реагирующих веществ из одного агрегатного состояния в другое, так как все подобные переходы связаны с поглощением или выделением тепла [128].

Анализ вулканических газов показывает, что до 80 % их состава занимает водяной пар [82]. Отсюда следует, что большая часть тепла подземных реакций расходуется на испарение воды. Фазовое превращение одного из реагирующих компонентов, несомненно, ограничивает рост температуры системы, что, в свою очередь, приводит к определенному пределу в увеличении скорости реакции.

Как видим, свое дальнейшее исследование нам нужно начинать с изучения испарительного процесса.

ВЫВОДЫ

Подведем итог рассмотрению материала данного раздела.

Как известно, масса железного ядра составляет 30 % массы Земли, а Мирового океана — лишь 0,02 %.

Оценка вероятности реакции железа с водой показала, что ядро и океан могли образоваться одновременно лишь при условии конденсации воды из облака водяного пара, окружающего расплавленную планету. Таким образом, земной океан сформировался по тому же принципу, что и океаны жидкого водорода на Юпитере и Сатурне.

На расплавленной Земле, как и сейчас, циркулировали потоки, переносящие тепло из экваториальных зон к полюсам. Эти потоки представляли собой перемещающуюся пульпу, состоящую из сплавов металлов и металлоидов с включениями их оксидов. Материки, появившиеся в период кристаллизации Земли, запечатлили в своей форме застывшую структуру древних течений. Большинство континентов имеет форму клиньев, вытянутых вдоль меридианов. Направление острой части клиньев к югу и их S-образная форма свидетельствуют о том, что действовавшие в оболочке Земли потоки обеспечивали сток энергии в космос с Южного полюса в большем масштабе, чем с Северного. Меридиональное расположение материков оставалось неизменным в течение всей истории развития Земли.

Одновременно с “выращиванием” материков циркуляция потоков обеспечивала фракционирование исходных сплавов, что привело к сосредоточению в материках соединений наиболее легких элементов. Опытным путем установлено, что разделение основного порообразующего сплава железа, алюминия и кремния (ферросиликоалюминия, или кратко ФСА) произошло под воздействием центробежного поля Земли с одновременной кристаллизацией составляющих его компонентов.

Таким же способом по температурам кристаллизации элементов и их сплавов расслаивалась вся остывающая планета. В результате тугоплавкие металлы и их сплавы оказались в центре, а легкоплавкие поднялись вверх и сформировали оболочку Земли.

Наиболее вероятным процессом, протекающим в недрах, является реакция взаимодействия сплава ФСА с водой. Анализ вулканических газов показывает, что большая часть тепла предполагаемой реакции расходуется на парообразование.

ФАЗОВЫЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В НЕДРАХ ЗЕМЛИ

Итак, мы подошли к решению одной из главных целей нашего исследования — оценке мощности подземных источников тепла и определению скорости выделения ими этой энергии.

Но прежде чем приступить к намеченным расчетам, нам необходимо выявить наиболее важные методы и средства, которыми располагает термодинамика, и показать ход применения этих методов для расчета интенсивности теплообмена при фазовых и химических превращениях.

В качестве примера фазовых превращений возьмем процесс, наблюдаемый в испарителях с поднимающейся пленкой.

3.1. ТЕПЛООБМЕН В ИСПАРИТЕЛЕ С ПОДНИМАЮЩЕЙСЯ ПЛЕНКОЙ

Как правило, для описания теплообмена при кипении и конденсации в качестве независимой переменной принимают температурный напор. В связи с этим возникает явное противоречие между наблюдаемой интенсивностью теплообмена и способом обобщения опытных данных.

Так, известно, что плотность теплового потока при любых видах теплообмена пропорциональна установленной разности температур. Между тем, при кипении и конденсации температурные различия между фазами могут быть сколь угодно малыми, но интенсивность теплообмена в большинстве случаев многократно превышает наблюдаемую для конвективного теплообмена.

К числу недостатков известных методов расчета испарителей, конденсаторов и парогенераторов относится введение в зависимости для коэффициентов теплоотдачи неизвестных величин, таких, как температурный напор и удельная тепловая нагрузка.

В этом можно убедиться при анализе, например, уравнения Нуссельта для конденсации насыщенного пара любого вещества при стекании пленки конденсата по стенкам вертикальных труб [129, 130]*:

$$\alpha = 1,15 \sqrt[4]{\frac{r \cdot \rho^2 \cdot \lambda^3 \cdot g}{\mu \cdot H \cdot \Delta t}} \quad [\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})], \quad (\text{III.1})$$

где α — среднее значение коэффициента теплоотдачи;

r — теплота конденсации, Дж/кг;

ρ — плотность конденсата, кг/м³;

λ — теплопроводность конденсата, Вт/(м · °C);

μ — динамический коэффициент вязкости конденсата, кг/(м · с);

H — высота вертикальной трубы, м;

Δt — разность температур, °C;

g — ускорение свободного падения, м/с².

Предпосылки при выводе формулы (III.1) таковы: течение пленки конденсата имеет ламинарный характер; силы инерции, возникающие в пленке, пренебрежимо малы по сравнению с силами вязкости и веса; сила тяжести единичного объема конденсата уравновешивается силой вязкости, действующей со стороны соседних слоев жидкости; конвективный перенос тепла в пленке, а также теплопроводность вдоль нее малы по сравнению с теплопроводностью поперек пленки; трение конденсата о пар отсутствует, температура внешней поверхности пленки равна температуре насыщенного пара; плотность и коэффициенты теплопроводности и вязкости конденсата от температуры не зависят.

Из уравнения (III.1) следует, что средний коэффициент теплоотдачи уменьшается с ростом высоты H теплообменных труб испарителя и температурного напора. В точных расчетах учитывают волновой режим течения пленки и изменение физических свойств конденсата в зависимости от температуры.

Учет последних двух поправок не устраняет главного недостатка формулы, а именно: остается неизвестной величина Δt . Кроме того, приведенная выше зависимость справедлива для неподвижного пара или когда скорость его течения мала. В нагревательных камерах типовых испарителей скорость движения пара как в продольном, так и в поперечном направлениях через пучок труб к центру достаточно высока. В этом случае поток пара оказывает динамическое воздействие на конденсатную пленку.

* Возможно, у читателя не окажется под рукой первой части книги, поэтому автор приводит здесь обозначения величин.

В длиннотрубных испарителях температура пара (в состоянии насыщения) снижается от зоны ввода пара в верхней части аппаратов до места выхода конденсата вблизи нижней трубной решетки примерно на 2–3 °С. В пучке труб также имеется определенный перепад температур по сечению аппарата. Этот фактор необходимо учитывать в расчетах.

Примерно такая же ситуация неопределенности сложилась в случае использования известных формул для расчета теплоотдачи при кипении. Поскольку объем образующегося при кипении пара в сотни раз больше объема испаряемой жидкости, то при отводе пара от теплоотдающей поверхности возникает интенсивная турбулизация пристенного слоя. Это обстоятельство учитывают введением экспериментальных значений удельной тепловой нагрузки q в расчетные зависимости коэффициентов теплоотдачи α . В частности, распространенной является степенная зависимость вида [131]

$$\alpha = cq^{2/3}, \quad (\text{III.2})$$

где c — коэффициент пропорциональности, величина которого зависит от рода жидкости и давления, а также в некоторой степени от поверхностных условий.

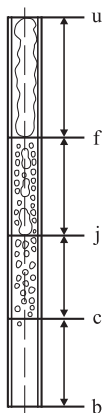
Изложенный прием оценки интенсивности теплоотдачи содержит в себе явное противоречие, поскольку если известно значение q , то для выбора поверхности теплопередачи практически нет необходимости рассчитывать α .

Противоречия исключаются при рассмотрении процессов кипения и конденсации на основе термодинамических закономерностей. В качестве примера рассмотрим последовательность расчета испарителей с поднимающейся (или восходящей) пленкой. Конструктивно эти аппараты выполняют таким образом, что конденсирующийся поток движется в низ межтрубного пространства, как это происходит у испарителей со стекающей пленкой, а испаряемый — в верх трубного пространства [132]. Причем первое пространство входит в состав конденсационного контура, а второе — испарительного.

Оба контура представляют собой проточные системы, обмен энергией между которыми в виде тепла сопровождается перераспределением вещества между составными частями циркулируемых потоков. Последнее обстоятельство приводит к возникновению деформационного взаимодействия между фазами каждой системы, что дает возможность рассматривать циркуляционные контуры как тепловые двигатели, обеспечивающие определенную скорость течения потоков вдоль теплообменной поверхности аппарата.

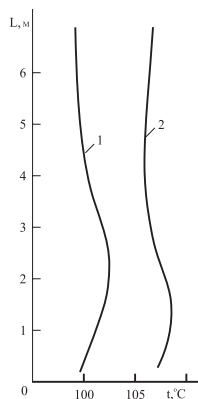
Данному факту следует придать должную отчетливость, достаточную для того, чтобы решить вопрос о скорости передачи тепла при фазовых превращениях. С этой целью необходимо выполнить анализ сложной физической ситуации и осмыслить под определенным углом зрения множество разрозненных, внешне между собой не связанных результатов опыта.

Экспериментально наблюдаемая гидродинамическая обстановка в отдельно взятой теплопередающей трубе представлена на рис. 23. На рис. 24 даны профили изменения температуры потока и стенки обогреваемой трубы [133]. Как видим, перед закипанием исходный поток повышает свою температуру на несколько градусов. Объясняется этот эффект тем, что в зоне закипания раствора создается повышенное давление вторичного пара, что необходимо для преодоления им сопротивления канала течению двухфазного потока.



Участки потока: *bc* — однофазный;
cj — эмульсионный; *jf* — пробковый; *fu* — стержневой.

Рис. 23. Структура потока при кипении жидкости внутри вертикальной трубы



1 — потока; 2 — стенки трубы.

Рис. 24. Изменение температур по высоте теплопередающей трубы

По мере продвижения кипящего потока внутри канала эмульсионный режим течения сменяется пробковым, а затем — стержневым.

Одновременно вторичный пар, поднимая жидкость на определенную высоту, делает запас работы гравитационного поля. Этот запас после отвода пара гравитационное поле использует для опускания жидкости.

В межтрубном пространстве складывается следующая гидродинамическая ситуация. Здесь первичный пар, конденсируясь, формирует пленку конденсата на внешней поверхности испарительных труб, чем опять же делается запас работы гравитационного поля. Используя этот запас, гравитационное поле вынуждает конденсатную пленку стекать в низ нагревательной камеры. Причем толщина стекающей пленки возрастает к низу трубы по мере конденсации очередных порций первичного пара. Поток первичного пара, двигаясь в том же направлении, ускоряет течение конденсатной пленки.

В соответствии с аналогией Рейнольдса, устанавливающей определенную зависимость между сопротивлением каналов течению потоков и интенсивностью передачи тепла, следует ожидать различных значений коэффициентов теплоотдачи по высоте испарительных труб.

Для оценки локальных значений коэффициентов теплоотдачи представим процессы, протекающие в каналах испарителя, в виде бинарного цикла в системе координат $T-S$ (рис. 25). При этом сопряжение циклов выполним таким образом, чтобы процесс адиабатического расширения первичного пара в начале межтрубного пространства (линия $m_e z_e$), находился над точкой окончания процесса адиабатного вскипания раствора в выходном участке нагревательной трубы (точка z_i).

Температура пара, поступающего от тепловой станции, как правило, превышает ту, что необходима для испарителя. В связи с этим первичный пар перед подачей в межтрубное пространство предварительно увлажняют. Для этого перед испарителем устанавливают редуциционно-охладительную установку (РОУ) [134, 135].

Отсюда следует, что предыдущее условие, касающееся размещения циклов, легко выполняется подбором соответствующего влагосодержания первичного пара. Принятый для наглядности способ совмещения циклов испарения и конденсации должен тем не менее подчиняться общему принципу — неизменности значений теплового потока, проходящего через различные среды (см. уравнение III.4).

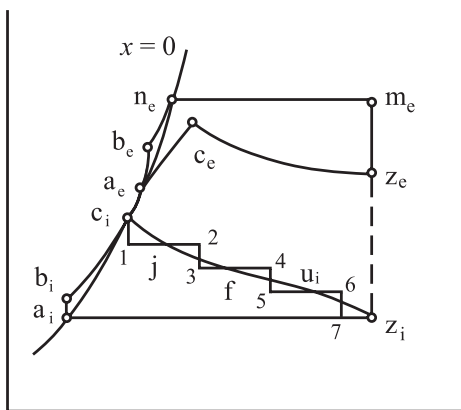


Рис. 25. Бинарный цикл испарительной установки в системе координат $T-S$

Итак, площадь верхней ступени бинарного цикла, ограниченная линией $a_e b_e n_e m_e z_e c_e a_e$, соответствует количеству тепла, преобразуемого в работу, выполняемую первичным паром по ускорению течения конденсатной пленки.

В свою очередь, часть тепловой энергии, ограниченная на T – S диаграмме площадью фигуры $a_i b_i c_i u_i z_i a_i$, преобразуется в испарительном контуре в механическую энергию, затрачиваемую на циркуляцию кипящего потока.

Сравнивая форму обеих фигур, отмечаем, что профиль линии $b_i c_i u_i$, отражающей ход изменения температуры кипящего раствора по высоте нагревательной трубы, примерно соответствует профилю линии $a_e c_e z_e$, фиксирующей вариацию температуры пленки конденсата, стекающей снаружи той же трубы.

Площадь, заключенная между этими линиями, численно равняется потере работоспособности системы в связи со снижением температуры в конденсатной пленке, стенке труб и пограничном слое раствора.

Диаграммы верхней и нижней ступеней отражают работу, совершаемую упругими рабочими телами — первичным и вторичным водяным паром при своем расширении в продольном направлении.

Что касается работы гравитационного поля в опускном канале испарителя и в межтрубном пространстве при стекании конденсатной пленки, то изменения температур жидкости в том и другом случаях будут крайне незначительны.

Известно, что если масса m опускается на расстояние L при ускорении силы тяжести g , то уменьшение гравитационной энергии на mgL равно увеличению кинетической энергии на $\frac{mV^2}{2}$, где V — скорость. Если перепад высот L выразить в м, то L будет также располагаемой работой, например 1 кг воды в кгм. Предположим, что в результате трения потоков о стенки труб располагаемая работа полностью переходит в тепло. Тогда при $H = 10$ м повышение температуры 1 кг воды состоится на величину

$$\Delta t = \frac{10 \cdot 1}{427} = 0,0234 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Разобьем дальнейший свой расчет на три последовательных этапа. В первом приближении найдем коэффициенты теплопередачи от неподвижного обогревающего пара к раствору, а во втором — учтем ускорение конденсатной пленки потоком пара.

В третьем, наиболее сложном, этапе обоснуем и новый вид расчетных зависимостей.

Вначале воспользуемся методикой расчета скорости естественной циркуляции, изложенной в первой части данной книги.

Для этого предположим, что “срабатывает” лишь температурный напор, действующий в продольном направлении по высоте теплообменных труб. На диаграмме $T-S$ адиабатный процесс вскипания изображен вертикальной линией cd (рис. 4 Ч.1). Найденному значению скорости потока v соответствует определенная интенсивность отдачи тепла, рассчитываемая по зависимости для конвективного теплообмена [131].

По найденным значениям скорости течения потока определяют распределение температурных напоров между обогревающим паром и испаряемой жидкостью.

Общий температурный напор

$$\Delta t = \Delta t_i + \Delta t_p + \Delta t_e. \quad (\text{III.3})$$

Значения частных температурных перепадов определяют из системы уравнений

$$q = \alpha_i \Delta t_i = q_e \frac{\Phi_e}{\Phi_i} = \alpha_e \Delta t_e \frac{\Phi_e}{\Phi_i} = \frac{1}{\varepsilon} \Delta t_p, \quad (\text{III.4})$$

где термическое сопротивление равно:

$$\varepsilon = \varepsilon_i + \varepsilon_p + \varepsilon_e \frac{\Phi_i}{\Phi_e}; \quad (\text{III.5})$$

$$\varepsilon_p = 1,15 \frac{\Phi_i}{\lambda_p} \log \frac{\Phi_e}{\Phi_i}, \quad (\text{III.6})$$

откуда

$$\Delta t_e = \frac{\alpha_i}{\alpha_e} \frac{\Phi_i}{\Phi_e} \Delta t_i; \quad (\text{III.7})$$

$$\Delta t_p = \alpha_i \varepsilon \Delta t_i. \quad (\text{III.8})$$

Коэффициент теплоотдачи находят по формуле Нуссельта (III.1):

$$\alpha_e = \frac{1,15 \left(\frac{r \rho^2 \lambda^3}{\mu L} \right)^{0,25}}{\Delta t_e^{0,25}}.$$

Здесь r принимают при t_e ; ρ , μ , λ для конденсатной пленки определяют при температуре конденсации $t_{\text{кон}}$, которую первоначально задают по зави-

симости $t_{\text{кон}} = 0,15t_i + 0,85t_e$. Выражение в числителе обозначают через β . Подставив значения α_e в формулу (III.7), имеем

$$\Delta t_e = \left(\frac{\alpha_i \Phi_i}{\beta \Phi_e} \Delta t_i \right)^{4/3}. \quad (\text{III.9})$$

После подстановки значений частных температурных напоров (III.8), (III.9) в формулу (III.3) получаем

$$\Delta t - (1 + \alpha_i \varepsilon) \Delta t_i = \left(\frac{\alpha_i \Phi_i}{\beta \Phi_e} \Delta t_i \right)^{4/3}. \quad (\text{III.10})$$

Значения α_i для зоны конвективного теплообмена определяют по зависимости

$$\text{Nu} = 0,021 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,43}, \quad (\text{III.11})$$

где при расчете критерия Re используют значения скорости циркуляции, найденные из термодинамического расчета. После подстановки значения α_i в уравнение (III.10) находят величину Δt_i , а затем — последовательно по зависимостям (III.8), (III.9) определяют значения Δt_p и Δt_e . Значение величины Δt_e открывает возможность расчета α_e , а затем и коэффициента теплопередачи.

Второй этап расчета — определение коэффициентов теплоотдачи при кипении — выполняют после анализа гидродинамической обстановки, возникающей в пристенном слое при установленном Δt_i .

По своей природе циркуляция кипящей жидкости в пристенном слое аналогична естественной циркуляции потока в аппарате. В связи с этим расчет кипения также проводится по диаграммам, приведенным на рис. 4. Ч.І. Отходящая от стенки жидкость (см. рис. 4. Ч.І) вскипает в процессе cd (cn — действительный процесс расширения потока). После отделения пара в центре трубки (процесс da) жидкость под воздействием гравитационного поля вновь опускается к стенке (процесс ab), где она нагревается, повышая свою температуру на величину Δt_i (процесс bc).

В стационарных условиях давление среды возле вертикальной теплопередающей стенки не изменяется. Однако если образовавшийся при кипении пар отходит от поверхности теплопередачи с определенной скоростью, то, согласно закону сохранения количества движения, давление у поверхности должно повыситься. Одновременно на пузырек начинает действовать масса вышележащих слоев жидкости, что обуславливает его движение по траектории под углом к оси трубки. Образование пузырьков —

процесс периодический. В момент всплытия пузырьков давление возле стенки снижается, что дает возможность потоку жидкости, также обладающему некоторым скоростным напором, подойти из центральной зоны трубы к ее поверхности. Для продольного потока поступление в него пара от поперечного потока является практически изотермическим процессом, что изображается на $T-S$ диаграмме горизонтальными линиями.

Разбив теплообменную трубу по высоте на отдельные участки, как показано на рис. 25, мы, последовательно используя продольный и поперечный температурные напоры, приходим к действительной скорости течения. По этой скорости уточняем гидродинамический режим течения и значение α_i , а затем, подсчитав установившиеся температурные напоры, окончательно находим α_e . Расчет завершаем оценкой коэффициента теплопередачи [50].

Установлено, что при капельной конденсации α_e существенно возрастает [136].

В этом случае при сравнительно небольших скоростях пара ($v_n = 4,5-13,3$ м/с) коэффициент теплоотдачи α_e увеличивается в 1,5–3,5 раза по сравнению со значениями для неподвижного пара. С увеличением скорости течения пара до $v_n = 19,5-67,2$ м/с коэффициент теплоотдачи возрастает в 1,9–7,4 раза.

Причем коэффициент теплоотдачи при капельной конденсации с увеличением скорости пара растет более существенно, чем при пленочной. Так, при ламинарном течении пленки увеличение скорости течения пара с 19,4 до 44,7 м/с приводит к росту α_e по сравнению с неподвижным паром всего лишь в 3,5 раза. Оценку скорости пара проводят с использованием $T-S$ диаграммы (рис. 25), где также рассматривают адиабатический процесс расширения.

Для перечисленных выше условий составлены соответствующие критериальные зависимости, применяемые в практических расчетах [137]. Перед оценкой поверхности теплопередачи в третьем приближении необходимо обсудить физико-химические основы процессов кипения и конденсации.

3.2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ КИПЕНИЯ И КОНДЕНСАЦИИ

До сих пор взаимодействие пара и жидкости рассматривалось нами как взаимное влияние энергетической природы, как средство обмена энергией в чистом виде. Перераспределение вещества между составными час-

тиями обеих подсистем — конденсационной и испарительной — нас интересовало лишь постольку, поскольку в ходе превращений между ними возникало деформационное взаимодействие.

Но в общем количестве энергии, содержащейся в паре, доля механической энергии незначительна. Как известно, теплота парообразования представляет собой сумму двух величин — внутренней потенциальной энергии тела (обозначим ее через ζ) и внешней работы расширения (Ψ)

$$r = \zeta + \Psi. \quad (\text{III.12})$$

Внешнюю работу и изменение внутренней энергии определяют по формулам

$$\Psi = Ap(V'' - V') \quad (\text{III.13})$$

и

$$\zeta = r - \Psi = r - Ap(V'' - V'), \quad (\text{III.14})$$

где A — тепловой эквивалент единицы работы;

p — давление пара;

V' — объем жидкости;

V'' — объем пара.

Величины Ψ и ζ называют также внешней и внутренней теплотами парообразования [138]. Внутренняя теплота парообразования ζ при всех давлениях значительно больше внешней теплоты парообразования Ψ . Так, например, при различном давлении водяного пара (p , МПа) значения ζ и Ψ (кДж/кг) будут

$p = 0,01;$	$\zeta = 2247,1;$	$\Psi = 147,9;$
$p = 10;$	$\zeta = 1160,63;$	$\Psi = 169,7;$
$p = 20;$	$\zeta = 553,1;$	$\Psi = 75,84.$

В предыдущем разделе мы достаточно полно осветили вопрос о зависимости скорости передачи тепла от величины внешней теплоты парообразования Ψ . Теперь такую же ясность необходимо внести в отношении влияния на процесс величины ζ . Эта проблема заслуживает особого внимания, поэтому остановимся на ней более подробно.

Мы знаем, что представление о такой физической величине, как “энергия”, связывают с количеством движения материи. В частности, теплота есть не что иное, как количество движения частиц микромира (электронов, атомов, молекул). Следовательно, при теплообмене происходит обмен количеством движения между участвующими в процессе компонента-

ми. Особенностью такой формы передачи энергии является рост энтропии, что, как полагают, отражает факт увеличения беспорядка в системе.

В подъемном канале испарителя мы наблюдаем явный рост энтропии. Для пояснения данного утверждения вновь привлечем понятия о конфигурационной и тепловой энтропиях, которые мы уже использовали в первом разделе нашего исследования. То, что казалось тогда нам сложным и непонятным в аналитической формулировке, в геометрической интерпретации становилось самоочевидным.

В данном случае будем считать, что возрастающее по высоте канала многообразие структур двухфазного потока отражает рост конфигурационной энтропии, а увеличение энтропии вторичного пара по отношению к энтропии вскипающей жидкости — рост тепловой энтропии. Условно можно принять, что за увеличение значений конфигурационной энтропии ответственна внешняя теплота парообразования, а тепловой — внутренняя.

Динамика изменения суммарной энтропии служит одной из важнейших координат состояния системы. Потенциалом взаимодействия, сопряженным с энтропией, является температура [139].

Напомним, что энтропия есть отношение приращения тепла, полученного в цикле, к абсолютной температуре. Как мы только что имели возможность убедиться, составители формулы (III.2), не мудрствуя лукаво, представляют коэффициент теплообмена при кипении как функцию приращения тепла во времени и таким способом косвенно вводят в рассмотрение изменение во времени энтропии.

Но для того, чтобы взять величину энтропии в качестве количественной характеристики скорости передачи тепла, необходимо быть уверенным в том, что температурный напор действительно определяет динамику процесса. Ситуация в подъемном канале испарителя, казалось бы, подтверждает незыблемость наших представлений о температуре, снижение которой приводит к росту энтропии.

Но иная картина складывается в конденсационном контуре. Здесь, несмотря на температурный напор, действующий в направлении от пара к стенке, энтропия системы в ходе процесса не увеличивается, а снижается, поскольку молекулы в конденсатной пленке располагаются более упорядоченно, чем в паре.

Экспериментально также установлено, что при равных температурных напорах интенсивность теплообмена, например, в испарителях, обогреваемых парами высокотемпературных органических теплоносителей (дифенильной смесью), в пять-шесть раз ниже, чем при обогреве водяным паром. Это обстоятельство повлекло за собой, в частности, необходимость

введения в нормы расчета испарителей со стекающей пленкой сугубо индивидуальных критериальных зависимостей для каждого конкретного случая теплообмена [50, 140, 141].

Из изложенного следует, что для открытых систем температура не может служить потенциалом взаимодействия компонентов и, следовательно, энтропия не является количественной характеристикой переходных процессов. Увеличение или уменьшение беспорядка, отражаемое энтропией, есть следствие развития динамических процессов, протекающих в системе, а следствие не может стать причиной и тем более количественно определять скорость передачи тепла. Цепочка логических заключений приводит нас к мысли о том, что в арсенале термодинамики должна быть величина, более полно, чем температура, характеризующая интенсивность передачи энергии в открытых системах.

Действительно, для систем, где происходит обмен энергией и веществом, таковой величиной является химический потенциал [142]. Изменение состояния открытой системы, обусловленное рассматриваемым видом взаимодействия, проявляется в виде перераспределения ее массы между отдельными фазами. Очевидно, именно масса (обозначаемая литерой m) — физическая величина, являющаяся количественной мерой изменения, претерпеваемого системой.

Таким образом, мы приходим к простой зависимости

$$dGi = \mu dm. \quad (\text{III.15})$$

В нашем случае химическая энергия процесса dGi полностью переходит в тепловую, поэтому изменение массы во времени практически отражает скорость передачи тепла.

Нам осталось уточнить порядок определения величины μ .

Мы рассматриваем здесь фазовые переходы одного вещества — H_2O , поэтому значения химического потенциала для единицы массы практически совпадают со значением свободной энергии ΔGi .

В свою очередь, величины $\Delta Gi_{\text{исп}}^0$ можно вычислить, рассматривая испарение как химическую реакцию [41]

$$\Delta Gi_{\text{исп}}^0 = \Delta H_{\text{исп}}^0 - T \Delta S_{\text{исп}}^0. \quad (\text{III.16})$$

В отличие от $\Delta H_{\text{исп}}^0$ и $\Delta S_{\text{исп}}^0$, которые мало зависят от температуры, $\Delta Gi_{\text{исп}}^0$ очень сильно зависит от температуры T , которая явно входит в соотношение (III.16). Если ради простоты предположить, что изменения энтальпии и энтропии постоянны, то можно графически представить зависимость ΔGi от ΔH и ΔS , как это сделано на рис. 26 на примере H_2O . При вы-

соких температурах $T\Delta S^0$ больше, чем ΔH^0 , свободная энергия испарения отрицательна и испарение воды при парциальном давлении водяных паров 1 атм должно происходить самопроизвольно. При низких температурах ΔH^0 больше, чем $T\Delta S^0$, так что ΔGi^0 положительно, и самопроизвольно осуществляется конденсация водяных паров. В точке кипения при 373 К ΔGi^0 равно нулю, и жидкая и парообразная вода находятся в равновесии.

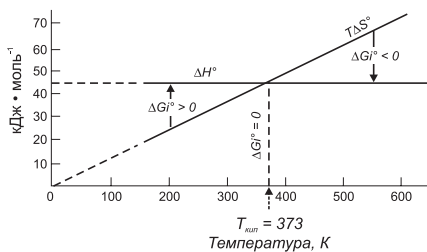


Рис. 26. Энтальпийный и энтропийный вклады в изменение свободной энергии испарения жидкой воды

Молярная теплота испарения может быть найдена как разность между стандартными теплотами образования жидкой и газообразной H_2O

$$\Delta H_{\text{исп}}^0 = \Delta H_{\text{п}}^0 - \Delta H_{\text{ж}}^0. \quad (\text{III.17})$$

Из этих формул видно, что значения $\Delta Gi_{\text{исп}}^0$ существенно отличаются от $\Delta H_{\text{исп}}^0$. Поэтому величина $\Delta H_{\text{исп}}^0$ не должна как движущая сила входить в уравнения теплообмена. Но, глядя на анализируемые нами формулы по кипению и конденсации, мы видим как раз обратную картину.

Поясним сказанное. Так, если пересчитать значения теплоты парообразования из единиц кДж/моль, принятых в химии, в единицы кДж/кг, используемые в теплотехнике, то мы получим уже знакомую нам величину $r_{\text{исп}}$, т.е. имеем

$$\Delta H_{\text{исп}}^0 \rightarrow r_{\text{исп}}^0. \quad (\text{III.18})$$

После чего мы обнаруживаем, что формула по теплоотдаче при пленочной конденсации (III.1) выглядит как зависимость

$$\alpha_{\text{к}} = f(r^{0.25}), \quad (\text{III.19})$$

при капельной конденсации

$$\alpha_{\text{к}} = f(r^{0.7}), \quad (\text{III.20})$$

и, наконец, при конденсации паров дифенильной смеси

$$\alpha_{\text{к}} = f(r). \quad (\text{III.21})$$

Отсюда видно, что составители формул косвенно пытались применить термодинамический формализм при описании процесса теплообмена. Но даже в этом несовершенном с позиции термодинамики варианте представ-

ленные формулы позволяют установить определенную зависимость интенсивности теплообмена от гидродинамической обстановки на поверхности труб.

Поэтому, помимо замены r на μ , необходимо в последующих этапах расчета ввести еще две величины: поверхностное натяжение σ и геометрические параметры твердой поверхности. Далее, рассчитав значения поверхностной энергии Гиббса $\Delta G_{i\sigma}$, можно будет найти условия разрушения конденсатной пленки.

Не лучше обстоит дело с расчетом теплообмена при кипении. В псевдотермодинамическом варианте формула (III.2) выглядит как

$$\alpha_n = f(r^{0.7}). \quad (\text{III.22})$$

Величина степени при r соответствует примерно тому значению, которое можно получить из второго приближения расчета испарителя, представив α в открытом виде как функцию r .

Динамику изменения степени при r в переходном процессе можно проследить, воспользовавшись уравнением Ерофеева. Такую операцию, как вы помните, мы уже проводили при исследовании процесса испарения воды в горном озере.

Итак, с ростом Δt число центров парообразования (и, следовательно, степень при r) возрастает, достигает своего максимума в точке перегиба S-образной кривой, что соответствует приведенной выше зависимости, а затем, по мере оттеснения жидкости от стенки вторичным паром, падает. Таким образом, вариация степени при r отражает колебание величины поверхности контакта фаз в непосредственной близости от твердой стенки.

При оценке скорости процесса, как правило, стремятся ввести в расчеты измеряемые величины: температуру, давление, концентрацию. Так, например, Льюис и Рендалл предложили вместо химического потенциала применять термодинамическую активность, которую можно рассматривать как исправленную концентрацию [143]. Метод вполне приемлем для гомогенных систем. Но при фазовых превращениях, как мы только что смогли убедиться, возникает такая трудновычисляемая переменная величина, как поверхность контакта фаз.

К тому же в химических реакциях, к изучению которых мы сейчас приступаем, образующийся газ непрерывно отводится из зоны взаимодействия. Последнее обстоятельство не позволяет достичь равновесных условий, и поэтому давление газа (или его концентрация) не может быть рассчитано по энергии Гиббса. Все это не позволяет воспользоваться рекомендациями Льюиса и Рендалла.

Подытожим данный раздел исследований. На основе анализа процесса испарения можно дать ряд рекомендаций, относящихся к последовательности обобщения опытных данных и расчета реакций взаимодействия сплавов с водой.

При низких давлениях возможен расчет скорости теплообмена образцов сплавов с водой на основе оценки ступенчатого процесса адиабатного вскипания воды. По найденной скорости отвода тепла несложно затем найти скорость реакции. В случае если величина реакционной поверхности неизвестна, опытные данные следует обобщать по уравнению Ерофеева. После нахождения оптимальных условий, соответствующих точкам перегиба S-образных кривых, где реакционная поверхность примерно равна начальной поверхности твердой фазы, необходимо представить опытные данные через химические потенциалы. Причем этот этап обобщения особенно необходим при высоких давлениях, когда вскипание воды невозможно и гидродинамическую обстановку в системе создает газ (водород), выделяющийся во время реакции.

В ходе процесса величины энергии Гиббса претерпевают соответствующие изменения. Поэтому, приняв для оценки значений μ равновесные величины энергии Гиббса, мы тем самым переводим выполняемый расчет в разряд приближенных. Более точные данные можно получить, выполнив ряд последующих итераций.

3.3. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГЕТЕРОГЕННЫХ РЕАКЦИЙ

Нам предстоит познакомиться в этом разделе с достаточно сложной проблемой — оценкой скорости топохимических реакций. Ряд исследователей полагает, что роль концентрации в этих системах выполняет величина реакционной поверхности. Отсюда скорость реакции, по их мнению, зависит от того, насколько развита реакционная поверхность. Но это всего лишь один из факторов, влияющих на процесс.

Скорость реакции является результатом воздействия: располагаемого энергетического потенциала, свойств сплавов и воды, поверхности контакта фаз и газогидродинамической обстановки внутри аппарата.

Постараемся упорядочить наши представления о процессе, рассмотрев реакции взаимодействия сплавов алюминия и кремния с водой.

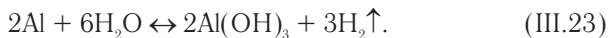
3.3.1. Взаимодействие активированного алюминия с водой

Производство водорода в автономных условиях получило наиболее широкое распространение в системе гидрометеослужбы.

По данным Всемирной метеорологической организации (WMO), в большинстве стран водород генерируют непосредственно на метеостанциях. Основным способом получения водорода — реакция взаимодействия сплавов с водным раствором едкого натра [144].

В перспективе в связи с непрерывным увеличением стоимости углеводородного сырья вода будет главным источником получения водорода. Высокая калорийность и отсутствие вредных веществ в продуктах сгорания определяют значительные преимущества водорода по сравнению с другими видами топлива. Вполне возможно, что применяемая в настоящее время на метеостанциях технология является прообразом тех многотоннажных производств водорода, которые в недалеком будущем займут свое достойное место в промышленности высокоразвитых стран. По этой причине не снижается интерес к исследованию закономерностей взаимодействия сплавов с водой. Для описания явления во всей полноте приходится прибегать как к методам термодинамики, так и к смежным дисциплинам, трактующим процесс с точки зрения кинетики. В данной работе ставится задача выявить роль тепломассообмена в ходе химических и физических превращений сплавов в оксиды.

В качестве предмета исследования выбрана реакция взаимодействия алюминия с водой



Необходимо установить скорость и полноту данной реакции.

Равновесные характеристики процесса исследованы достаточно подробно. Известно, что при температуре 363 К энергия Гиббса имеет величину $\Delta Gi = -927,2$ кДж, а константа равновесия достигает значения $K = 2,66 \cdot 10^{133}$. Значительные отрицательные величины ΔGi свидетельствуют о высокой вероятности реакции. Полнота реакции, рассчитанная по константе равновесия, практически близка к единице. При адиабатном ведении процесса в зоне реакции развивается температура 2880 К, в то время как 5-кратный избыток воды по отношению к стехиометрическому объему снижает температуру до 760 К [145]. На данный момент представления о скорости реакции менее четкие. При умеренных температурах чистый алюминий покрыт плотной оксидной пленкой и практически не взаимодействует с водой [146]. В то же время ряд сплавов алюминия в тех же условиях проявляет исключительно высокую активность. Так, например, скорость вытеснения водорода из воды сплавом АГ5О5И5 (масс. %: Al — 85, Ga — 5, Sn — 5, In — 5) более чем на два порядка превышает скорость вытеснения водорода алюмокремниевыми сплавами [147, 148].

В общем случае скорость реакции зависит от структуры и состава сплава, свойств воды и образующегося оксидного слоя, температуры, давления, формы и размеров реагирующей системы, а также свойств контактирующей с ней части окружающей среды. Тем не менее, существуют некоторые определяющие факторы, дающие право говорить о возможности расчета предельной скорости процесса, достижимой при прочих благоприятных условиях.

К числу таких факторов относится, в частности, местная скорость звука, ограничивающая скорость истечения водорода из зон образования ядер оксидов. Но для оценки производительности реактора необходимо знать, кроме того, число и площадь сечения зон выделения газа, приходящихся на единицу площади поверхности сплава. Определение величины реакционной поверхности, изменяющейся в ходе процесса, — задача трудновыполнимая, поэтому целесообразно обратить основное внимание на теплообмен.

Тепло способно “растекаться” в твердом теле, что в первом приближении позволяет принимать площадь поверхности теплообмена равной площади поверхности образца сплава.

В результате газообразования объем реагирующей системы увеличивается в сотни раз, что обуславливает возникновение естественной циркуляции воды вблизи реагирующей поверхности. Скорость подъемного потока также ограничена местной скоростью звука.

Установление величин температурного напора и скорости омывания образца жидкостью позволяет по обычным критериальным зависимостям рассчитать интенсивность теплообмена. Зная удельный тепловой поток, несложно подсчитать эквивалентный ему массовый поток водорода. Тем самым открывается возможность предварительного расчета предельно достижимой скорости газовыделения. Такой подход справедлив, если допустить, что химическая стадия процесса имеет минимальное сопротивление. Следовательно, сопротивление физической стадии, обусловленное подводом воды и удалением продуктов реакции и тепла, определяет скорость реакции.

Опыты по изучению тепломассобмена проведены в стеклянном аппарате Киппа и металлическом реакторе [50]. Исследована интенсивность теплоотдачи от кубиков, изготовленных из сплавов АГ5О5И5 и ФСА, к циркулирующему потоку.

В центре кубика со стороной $(10 \div 25) \cdot 10^{-3}$ м устанавливают термопару. Отверстие для термопары ($d_{\text{отв}} = 3 \cdot 10^{-3}$ м) заливают эпоксидной смолой, предварительно изолировав спай термопары от эпоксидной смолы слоем хлопка. Контакт между термопарой и телом кубика контролируют

тестером. В качестве вторичного прибора используют потенциометр типа КСП-4 и зеркальный потенциометр КП-59.

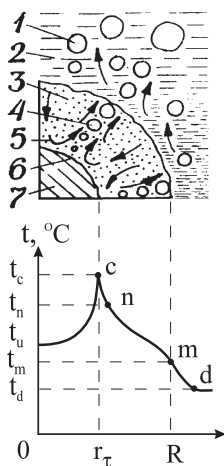
Одновременно с записью температуры среды фиксируют температуру центра образца. Измерение температуры поверхности образца выполняют термопарой со щупом при проведении реакции в открытом сосуде.

Инерционность системы проверяют по ранее принятому способу [149].

Образцы имели начальную площадь поверхности $(1,4 \div 1,8) \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. Давление в реакторе не превышало 0,94 МПа. Максимальная скорость выделения водорода при этом составила $W_{\text{max}} = 1,05 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с})$ или $W_{\text{max}} = 7,14 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

При исследовании реакции в открытом сосуде установлено, что температура внешней поверхности гидрооксидного слоя в местах газообразования (t_m) выше температуры среды (t_d) на $1,6 \div 2,4 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура центра образца (t_n) превышает температуры среды на $2,4 \div 6,2 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 27).

Приближение фронта реакции к спаю термопары в центре образца вызывает скачкообразное повышение температуры на $5 \div 9 \text{ }^\circ\text{C}$ при кипении и газообразовании (аппарат Киппа) и на $37 \div 53 \text{ }^\circ\text{C}$ при одном газообразовании (закрытый реактор). Большой скачок наблюдается при более высокой температуре. Время прохождения всплеска температуры — $10 \div 15$ секунд. При извлечении образца температура внешней поверхности (t_m) быстро повышается и затем падает. Это объясняется тем, что некоторое время реакция продолжается за счет воды, оставшейся на поверхности.



1 — газовые пузыри в жидкости;
2 — жидкость; 3 — слой образующегося гидрооксида; 4 — газовые пузыри в слое гидрооксида; 5 — направление циркулирующих потоков жидкости в слое гидрооксида; 6 — реакционная поверхность частицы; 7 — непрореагировавшее ядро частицы.

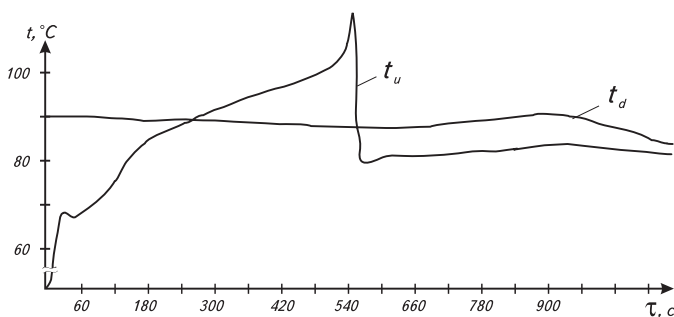
Рис. 27. Схема частицы сплава и изменения ее температуры при взаимодействии с водой

После прохождения скачка прибор показывает температуру среды (измеряемую дополнительно ртутным термометром), что свидетельствует о завершении реакции в связи с полным разрушением образца. Динамика роста температуры центра образца при падении кубика в воду в кинетическом реакторе отражена на рис. 28. На начальном этапе температура резко возрастает, затем темп роста замедляется, тем самым сказывается влияние образующегося оксидного слоя. Разрушение и осыпание образца во время реакции вызывает повышение температуры на дне реактора.

Величина температуры границы между алюминием и раскаленным оксидом алюминия говорит о том, что на поверхности контакта происходит вскипание воды.

Экспериментальные значения температуры реакционной поверхности (t_n) с учетом принятой инерционности системы оказались равными температуре кипящей жидкости при критическом давлении истечения газового потока. Так, на конечной стадии реакции за 15 с температура поднялась со 102°C до 114°C (рис. 28). Ввиду кратковременности существования тонкого реагирующего слоя и значительной инерционности системы измерения реальная величина температуры составляет 194°C . Фактический скачок — 92°C . В пересчете на полупериод реакции ($\tau_{0,5} = 330$ с) подъем температуры происходит от 90°C до 173°C , т.е. всплеск составляет 83°C . Величина 173°C является температурой насыщения при критическом давлении истечения потока, зафиксированном в момент времени, соответствующий $\tau_{0,5}$.

Установленные величины температур реакционной поверхности сплава АГ505И5 позволяют рассчитать среднелогарифмический температурный



t_u — центр образца; t_d — дно реактора; $m = 11,8 \cdot 10^{-3}$ кг.

Рис. 28. Изменение температуры в зависимости от времени при реакции сплава АГ505И5 с водой (кинетический стенд), $t_n = 90^\circ\text{C}$

напор, обеспечивающий передачу тепла. При этом $\Delta t_{\max} = t_n - t_d$, а $\Delta t_{\min} = 2 \div 3$ °C (см. рис. 28).

Естественная циркуляция обеспечивает послойное взаимодействие частицы с омывающей ее жидкостью. Скорость обтекания частицы равна приведенной скорости жидкости $v_{\text{пр}}$ в подъемном канале. Для нахождения $v_{\text{пр}}$ проводят оценку гидродинамики циркулирующего потока. При низком давлении течение в подъемном потоке определяет пар, а с повышением давления — водород. В начальный момент скорость потока находят по изменению энтальпии вскипающей жидкости [50]. Во втором случае используют формулы для оценки местной скорости звука в двухфазном потоке [150]. При этом учитывают не только стехиометрические количества продуктов реакции, но и объем воды, испарившейся на реакционной поверхности и сконденсировавшейся в подъемном потоке. Средняя скорость потока равна $2/3$ величины скорости истечения. Найденное значение средней скорости позволяет уточнить количество поднимаемой жидкости по зависимостям для газлифтов [151, 152].

$$(1-\varphi) = \frac{0,01\mu_{\text{ж}}^{0,3} + 0,14}{d_{\text{н.п.}}^{0,34} v_{\text{г.пр.}}^{0,48}}, \quad (\text{III.24})$$

где φ — газосодержание; $\mu_{\text{ж}}$ — вязкость жидкости, МПа · с; $d_{\text{н.п.}}$ — диаметр подъемного канала, м; $v_{\text{г.пр.}}$ — приведенная скорость течения газа, м/с.

Использование данных [151] позволило установить, что правую часть уравнения необходимо умножить на коэффициент k_z , изменяющийся в пределах $0,292 \div 0,753$. Снижение k_z наблюдается при уменьшении диаметра подъемного потока, который принят равным сумме диаметров частицы и двух пузырьков [153]. Для рассматриваемых нами условий $k_z = 0,333$.

Значение приведенной скорости жидкости, найденное по разработанной методике, находится в пределах $1,81 \div 2,1$ м/с. Числа Рейнольдса изменяются от 45626 до 110891. Поскольку коэффициент лобового сопротивления $k_{\text{лс}}$ в указанном интервале возрастает [154], следует ожидать увеличения безразмерного коэффициента теплоотдачи с ростом чисел Рейнольдса.

Экспериментальные данные обработаны по известным зависимостям. Расчеты выполнены на момент времени $t_{0,5}$. Оказалось, что наименьшие отклонения дает формула Кунии, а наибольшие — формула Кацнельсона–Тимофеевой [155]. В упомянутых работах степень влияния чисел Re находится в пределах $0,5 \div 0,58$. При омывании реагирующей частицы обнаружено более существенное влияние критерия Рейнольдса.

$$\text{Nu} = 1,85 \cdot 10^{-6} \text{Re}^{1,6} \text{Pr}^{0,33}. \quad (\text{III.25})$$

Отклонение расчетных значений критерия Nu от опытных не превышает 13,5 %.

С ростом скорости омывания возрастает паро- и газообразование, что сопровождается турбулизацией пограничного слоя. Близкие условия теплообмена наблюдаются при испарении воды в собственные перегретые пары [157].

Из сказанного следует, что в условиях гетерогенной системы предельное значение скорости химической реакции определяется интенсивностью теплоотдачи при естественной циркуляции [158]. Полученные результаты позволяют выделить два основных фактора, определяющих скорость реакции.

Во-первых, при сопряжении основной экзотермической реакции (образование водорода) с параллельной эндотермической (вскипание воды) процесс идет при малых температурных напорах, т.е. в условиях, близких к равновесию второй реакции.

Во-вторых, в гетерогенной системе взаимодействующие компоненты реагируют послойно [159].

Оба указанных выше фактора обеспечивают сравнительно низкие скорости течения 3-фазного потока, т.е. затраты на трение ничтожны. Известно, что КПД вскипающей системы не превышает 0,25 %, т.е. всего четвертая часть процента передаваемого через систему тепла преобразуется в механическую энергию [50]. С повышением давления в кинетическую энергию циркулирующего потока (диссипативной структуры) [36] преобразуются сотые доли процента химической энергии, что соответствует минимальному производству энтропии за счет трения [160].

Продолжим исследование процесса взаимодействия сплава алюминия с водой.

На этот раз в качестве объекта исследования возьмем реакцию взаимодействия множества частиц активированного алюминия (порошка) с водой. В этом процессе температурные и гидродинамические условия, возникающие на поверхности одной отдельной частицы, оказывают существенное влияние на развитие реакции воды с соседними частицами.

Здесь мы снова сталкиваемся с коллективными явлениями, на которых кратко останавливались в первом разделе. Как мы уже знаем, наиболее удобной формой обобщения опытных данных в этом случае является уравнение Ерофеева.

Познакомимся с работами, приведшими к такому заключению. Но прежде всего отметим ряд исследований, внесших заметный вклад в развитие теории гетерогенных реакций.

Модели топохимических реакций разрабатывались с учетом геометрических и энергетических характеристик системы.

Основными факторами, определяющими место образования зародышей на поверхности частиц, являются вероятность захвата и возможность выделения газообразных продуктов. Выражение доли прореагировавшего вещества учитывает оба этих фактора и может быть решено только приближенно. Однако для случайного распределения Аврами [161] решил уравнение, используя понятие о расширенном объеме прореагировавшего вещества. Принятое допущение оказалось справедливым лишь для умеренных превращений. Мампель [162] рассмотрел процесс образования ядер и их рост в системах, состоящих из шарообразных микрокристаллов. Влияние предложенной модели на развитие теории процесса оказалось незначительным ввиду трудностей приготовления образцов, на которых возможна ее проверка. Праут и Томпкинс [163] учли возможность образования зародышей в цепном процессе и предложили свое обобщающее уравнение. Болдырев [164] объяснил влияние примесей на кинетику процесса зародышеобразования, во-первых, деформационным действием решетки включения на пограничный слой основного вещества и, во-вторых, изменением характера электронных и ионных процессов, протекающих на границе раздела примесь-исходное вещество. Янг [165] разделил реакции разложения на два подкласса. В одном подклассе цепная разветвленная реакция проходит только на поверхности кристалла, при этом в точках разветвления образуются компактные объемные ядра, в другом — характерно растрескивание кристалла, вызванное проникновением реакции в объем исходного вещества. Дельмон [166] развил подход, предложенный Мампелем, и рассмотрел кинетические характеристики взаимодействия газа с твердым телом, включая последующую диффузию. Для многих важных кинетических задач Дельмон дал численные решения и привел табличные данные. Барре [167] сделал обзор работ по кинетике гетерогенных реакций, уделяя особое внимание физическому смыслу констант, входящих в математические зависимости. Розовский [168] построил ряд теоретических моделей и дал численные решения применительно к конкретным реакциям. Браун и др. [169] рекомендовали интервалы применимости и корректности известных кинетических уравнений реакций взаимодействия и термического разложения. Отмечено, что большинство зависимостей неудовлетворительно описывает конечную стадию процесса. Это связывают с одновременным влиянием таких факторов, как размер частиц, фрагментация кристаллитов, хемсорбция газообразных продуктов на твердом остатке, отравление и т.д.

Ерофеев [42], анализируя вероятность взаимодействия молекул данной системы, получил уравнение (I.1), о котором у нас уже шла речь ранее.

В работах [159, 165, 169, 170] высказано мнение, что уравнение (I.1) наиболее полно отражает формальную кинетику процесса.

Таким образом, мы не сделаем большой ошибки, обобщая опытные данные по уравнению Ерофеева.

В координатах α — τ кинетика описывается типичными сигмоидными кривыми, практически отражающими изменение величины реакционной поверхности во времени (рис. 7). В логарифмических координатах опытные данные представлены на рис. 29, расчетные значения n и k указаны в табл. 1. С повышением температуры значения k возрастают, а n — уменьшаются. Разброс экспериментальных точек при высоких температурах усиливается, следовательно, уравнение Ерофеева лишь приближенно описывает процесс. В конце реакции константа скорости возрастает в 49,2—79,5 раза, а показатель n снижается в 1,6—2,0 раза, что вызвано диффузионным торможением процесса из-за накапливающихся на поверхности сплава твердых продуктов реакции. Сравнение с данными Лепинь [43] показывает, что характер реакции изучаемого сплава с водой во времени (показатель n) сохраняется таким же, как и для чистого алюминия. Однако в случае активированного алюминия константа скорости k при температуре 40 °С на четыре, а при 70 °С — на два порядка выше, чем у чистого алюминия. Это свидетельствует о различной природе рассматриваемых веществ. В частности, подтверждается то обстоятельство, что развитие реакционной поверхности в образце активированного алюминия с мелкозернистой структурой происходит за счет его растрескивания.

На основании проведенных исследований был создан более эффективный сплав [171].

Кинетика взаимодействия этого сплава с водой раскрыта в работе [172].

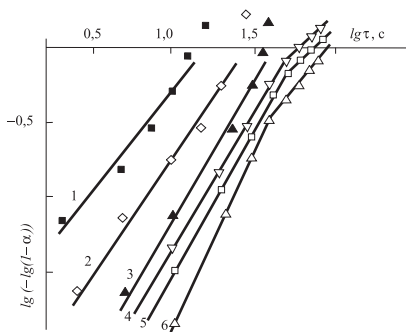


Рис. 29. Зависимость величины $\lg [-\lg(1-\alpha)]$ от логарифма времени $\lg \tau$ при различных температурах и дисперсном составе (фракций) сплава АГ5О5И5 (масс. %):
 Al — 85, Ga — 5, In — 5, Sn — 5):

- 1 — 90 °С, фр. $(0,1 \pm 0,16) \cdot 10^{-3}$ м;
- 2 — 75 °С, фр. $(0,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$ м;
- 3 — 65 °С, фр. $(0,4 \pm 0,63) \cdot 10^{-3}$ м;
- 4 — 50 °С, фр. $(0,01 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$ м;
- 5 — 40 °С, фр. $(0,63 \pm 1,0) \cdot 10^{-3}$ м;
- 6 — 35 °С, фр. $(1,0 \pm 1,6) \cdot 10^{-3}$ м.

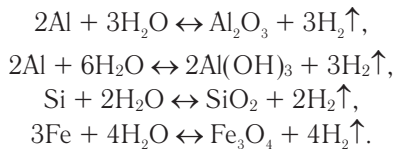
Таблица 1

Зависимость степени превращения (α_r , %) и скорости выделения водорода от температуры и дисперсного состава активированного алюминия (5 % Ga, 5 % In, 5 % Sn)

Температура, °С	Дисперсный состав, мм	Удельная поверхность, м ² /кг	Степень превращения α_r , %	Скорость выделения водорода $W_1 \cdot 10^3$, м ³ /(кг·с)	Скорость выделения водорода $W_2 \cdot 10^3$, м ³ /(м ² ·с)	$k \cdot 10^3$	n
35	1,0–1,6	50,7	64,71	1,51	29,78	0,0631 (5,01)	2,3 (1,42)
40	0,63–1,0	62,1	72,64	1,75	28,18	0,3548 (22,39)	1,94 (1,0)
50	0,01–0,2	184	83,96	2,0	10,87	0,7583 (37,15)	1,82 (0,93)
65	0,4–0,63	82,7	92,45	2,27	27,45	1,096	1,81
75	0,2–0,4	96,3	98,11	3,44	35,76	5,012	1,57
90	0,1–0,16	152	98,0	6,06	39,87	45,7	1,32

3.3.2. Термодинамика образования водорода в реакциях алюминия, кремния и железа с водой

Ниже на основе табулированных значений величин [87] рассчитаны изменения энергии Гиббса реакций взаимодействия алюминия, кремния и железа с водой и водяным паром. Ранее исследована термодинамика следующих реакций [50, 145, 173]:



Авторы указанной выше литературы, отдавая дань традиции, используют соотношение

$$\Delta H^0(T_2) = \Delta H^0(T_1) + \int_{T_1}^{T_2} \Delta C_P^0(T) dT,$$

где C_P — теплоемкость при $P = \text{const}$.

Наличие в современной литературе табулированных значений $H^0(T) - H^0(0)$ или $H^0(T) - H^0(298)$ позволяет упростить расчет изменения энтальпии реакции.

Типы возможных реакций, включая приведенные выше, даны на рис. 30. Здесь же представлены расчетные значения энергии Гиббса. С осредненными величинами этой энергии мы уже познакомились на рис. 19. Стехиометрические соотношения веществ устанавливались после оценки состава продуктов реакции.

При взаимодействии алюминия или его оксида с влажной атмосферой образуется ряд продуктов: гидрагиллит $\gamma\text{-Al}(\text{OH})_3$, байерит $\alpha\text{-Al}(\text{OH})_3$, бемит $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$, диаспор $\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$, γ - и $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ [119, 124, 175–177].

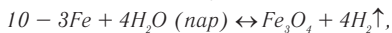
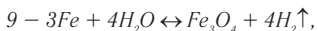
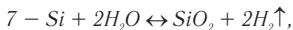
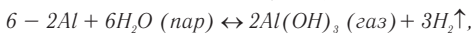
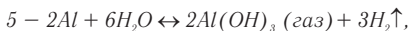
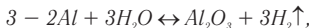
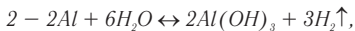
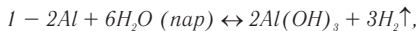
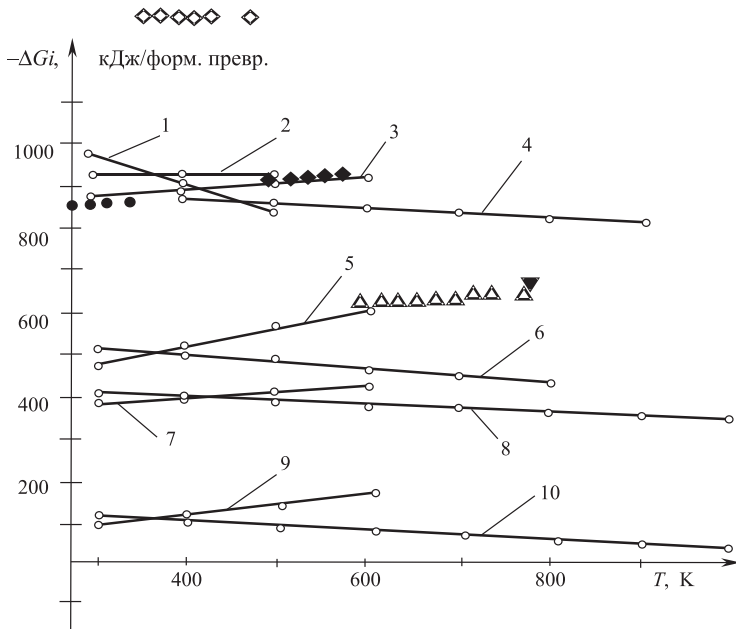
С ростом температуры продукты претерпевают ряд изменений. Так, гидрагиллит при нагреве до $200\div 250$ °С переходит в бемит. Байерит при $200\div 300$ °С — в бемит. Бемит при $300\div 450$ °С превращается в η - или $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, диаспор при $450\div 500$ °С — в $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

По химическому составу смесь гидрагиллита и байерита можно рассматривать как бетагиббсит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, а смесь бемита и диаспора — как метагидрооксид $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ [119, 145]. Возможно также наличие псевдобемита $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1,3\text{H}_2\text{O}$ [178]. Авторы работы [178] отмечают, что при температуре $20\div 90$ °С оксидная пленка трехслойная: непосредственно на поверхности алюминия — аморфный оксид или гидрооксид толщиной в несколько нанометров, далее — слой псевдобемита и поверх него — слой байерита. Толщины псевдобемита и байерита измеряются микронами. В интервале температур $100\div 374$ °С оксидная пленка состоит из бемита, однако на наружной поверхности обнаружены столбчатые кристаллы диаспора. Наружный слой отделен от поверхности металла тонким слоем $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. При температуре выше 374 °С (критическая точка воды) оксидная пленка состоит из $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ и $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (корунда).

Кроме того, отмечается, что при температуре $500\div 900$ °С возможна реакция расплавленного алюминия и продуктов его взаимодействия с парами воды. При этом оксиды алюминия частично переходят в газообразную форму (реакции 5 и 6), а частично растворяются в жидком алюминии и образуют комплексные соединения типа $(\text{Al}_2\text{O}_3)_x\text{H}$ или $(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O})_y\text{H}$ [119].

Кремний при низкой температуре разлагает воду по уравнению 7 на рис. 30. В случае если температура превышает 600 °С, реакция развивается по зависимости 8 на рис. 30 [116, 128].

Во время железо-парового способа получения водорода при 570 °С равновероятно присутствие компонентов: Fe_3O_4 , FeO и Fe. Выше 570 °С образуется оксид Fe (II) и водород. При более низких температурах наиболее устойчивым является Fe_3O_4 (см. уравнение 9 на рис. 30) [173, 178]. В выражении 10 на рис. 30 Fe_3O_4 взят как суммарный оксид, т.е. FeO и Fe_2O_3 [128, 173, 179].



● – данные ИПМаш для реакции 2, ($Al(OH)_3$ — аморфной структуры);

◇ – данные ИПМаш для реакции 2, ($\alpha, \gamma-Al(OH)_3$);

◆ – данные ИПМаш для реакции 3, ($Al_2O_3 \cdot H_2O$ — бемит);

△ – данные ИПМаш для реакции 4;

▼ – данные Kostron H. для реакции 4 [145].

Рис. 30. Изменение величины энергии Гиббса в зависимости от температуры

Полученные значения энергии Гиббса свидетельствуют о высокой вероятности реакций кремния и алюминия с водой. Реакции железа также возможны, но с повышением температуры снижается полнота реакции.

В зонах газообразования поверхности алюминия и кремния раскалены, что приводит к вскипанию поступающей на реакцию воды [149].

Равновесная термодинамика не учитывает фактор времени и характер переходных процессов, хотя и накладывает определенные ограничения на кинетику процесса. Так, выполнение стехиометрических соотношений между реагентами и продуктами реакции означает, что для каждой реакции имеется одно и только одно независимое кинетическое уравнение. Одним из компонентов исследуемых систем является газ, что позволяет при определении равновесия использовать сведения нетермодинамического характера. В частности, появление в структуре основных уравнений термодинамики константы равновесия и парциальных давлений обусловлено применением уравнения состояния идеального газа. Между константой равновесия и константами скорости прямой и обратной реакции существует взаимосвязь, позволяющая по двум величинам найти третью [174]. Так, согласно Вант-Гоффу уравнение изотермы реакции, связывающее величину константы равновесия с изменением термодинамического потенциала, имеет вид

$$K = e^{-(\Delta G_i/RT)},$$

где ΔG_i — изменения энергии Гиббса; R — газовая постоянная; T — температура.

С другой стороны, согласно закону действующих масс, константа равновесия реакций определяется из выражения

$$K = \frac{P_{H_2}^{v_i}}{P_{H_2O}^{v_j}},$$

где P — давление газа;

v_i, v_j — стехиометрические коэффициенты компонентов.

Рассчитав константу равновесия и зная давление водорода в реакторе, можно определить упругость водяного пара. Тем самым производят оценку чистоты получаемого водорода.

Полноту реакции α или степень разложения вещества находят с помощью константы равновесия по известным методикам [41].

Так, полнота реакции алюминия с водяным паром связана с константой равновесия уравнением

$$\alpha_{\text{теор.}} (2 - \alpha_{\text{теор.}}) = \frac{4\sqrt[3]{K}}{1 + 4\sqrt[3]{K}}.$$

Для реакции кремния с водяным паром уравнение для определения константы имеет вид

$$\alpha_{\text{теор.}} = \frac{\sqrt{K}}{1 + \sqrt{K}}.$$

Подставляя значение константы K , можно убедиться, что при любой температуре значения $\alpha_{\text{теор.}}$ близки к единице, т.е. реакции практически идут до конца.

Полнота процесса взаимодействия железа с паром подчиняется уравнению

$$\alpha_{\text{теор.}} = \frac{\sqrt[4]{K}}{1 + \sqrt[4]{K}}.$$

Расчетное значение $\alpha_{\text{теор.}}$ для этого случая изменяется от единицы при низких температурах до $\alpha_{\text{теор.}} = 0,72$ при температуре 1000 К.

Повышение давления не влияет на величину константы, но смещает равновесие в направлении уменьшения числа молей присутствующих газов. В связи с этим необходим дополнительный анализ условий проведения реакции железа с водой. Константа равновесия рассматриваемой реакции связана с давлением водорода зависимостью

$$K = P^4.$$

При температуре 600 К подъем давления водорода до 269,5 МПа приводит к состоянию равновесия. Поэтому развиваемое в автономных реакторах давление в 15 МПа не может сместить равновесие реакции.

Реакции взаимодействия сплавов с водяным паром более информативны, чем реакции с водой. Экспериментально определив общее давление и приняв давление водяного пара равным давлению насыщения (при заданной температуре), можно найти парциальное давление водорода. Последнее обстоятельство позволяет оценить, насколько данный режим ведения реакции отличается от равновесного. Трудность заключается в определении упругости водяного пара непосредственно над реакционной поверхностью, поскольку на ней находится слой оксида.

Для реакции алюминия с водяным паром мы имеем

$$K = \frac{P_{H_2}^3}{P_{H_2O}^6}.$$

Приняв давление водорода равным 15 МПа при температуре, например, 500 К, находим равновесное давление пара $P_{\text{пара}} = 7,7 \cdot 10^{-15}$ МПа. Малая величина давления свидетельствует о возможности получения водорода высокой чистоты. Этот же расчет говорит о том, что незначительной упругости водяного пара соответствует сверхвысокое давление водорода. Вместе с тем в замкнутой системе равновесное давление может развиваться лишь при сокращении ее объема на величину разницы объемов конденсированных исходных и конечных веществ. В противном случае давление водорода не достигает равновесного. Так, для реакции 1 на рис. 30 давление в замкнутом объеме реактора не может превышать 119,3 МПа. Поскольку в реакторе имеется избыток воды по отношению к стехиометрическому количеству, водород насыщается водяным паром. Влагосодержание парогазовой смеси определяется по зависимости [180]

$$x = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{г}}} \cdot \frac{\varphi \cdot P_{\text{нас}}}{P_{\text{общ}} - \varphi \cdot P_{\text{нас}}} \left[\frac{\text{кг пара}}{\text{кг сухого газа}} \right],$$

где $M_{\text{п}}$, $M_{\text{г}}$ — молекулярные массы пара и газа;

φ — относительная влажность газа;

$P_{\text{общ}}$, $P_{\text{нас}}$ — общее давление парогазовой смеси и давление насыщенного пара при заданной температуре, МПа.

Если принять температуру в реакторе 200 °С и давление 15 МПа, то при полном насыщении водорода ($\varphi = 1$) и $P_{\text{нас}} = 1,58$ МПа значение x составит 0,89 кг пара на 1 кг сухого водорода.

Использование табулированных значений термодинамических величин позволило повысить точность расчетов энергии Гиббса по сравнению с принятой ранее на 5÷9 %.

Таким образом, в термодинамических исследованиях расширен круг анализируемых реакций для алюминия и кремния и введены в рассмотрение реакции с железом.

Показано, что с понижением температуры вероятность реакций возрастает. В интервале температур 200÷600 К реакции алюминия и кремния с водой и при 300÷1000 К с водяным паром идут до конца. Железо с водой в интервале температур 300÷600 К реагирует с полнотой реакции $\alpha_{\text{теор.}} = 1$. При взаимодействии железа с водяным паром в интервале 300÷1000 К $\alpha_{\text{теор.}}$ изменяется от единицы до 0,72. Увеличение давления до 15 МПа практически не влияет на выход водорода.

Расчетами показана возможность получения водорода высокой чистоты. Это же было подтверждено экспериментами [181].

3.3.3. Испытания водородных реакторов высокого давления

Как уже говорилось, рассматриваемые в данной работе открытые системы сравнительно удалены от состояния равновесия. Несмотря на высокие значения химических потенциалов, влияние топохимических факторов ограничивает скорость газообразования, что дает возможность в первом приближении описать процесс линейной зависимостью

$$dGi/d\tau = A d\alpha/d\tau, \quad (\text{III.26})$$

где $A = \sum v_i \mu_i$ — химическое средство;

$\mu_i = (\partial Gi / \partial n_i)_{p, T, (n_i)}$ — химический потенциал;

p, T, n_i — индексы, означающие постоянство давления, температуры и массовых концентраций компонентов, кроме концентрации i -го компонента.

Здесь следует особо обратить внимание на то, что при взаимодействии множества частиц с водой возникают трудности с определением величины реакционной поверхности. Более или менее определенные значения $d\alpha/d\tau$ могут быть найдены лишь для узкого интервала максимальных скоростей выделения водорода, когда реакционная поверхность примерно равна внешней поверхности гранулированной массы сплава. Как мы уже знаем, максимальные скорости соответствуют точкам перегиба S-образных кривых, построенных в координатах $\alpha - \tau$.

Данные испытаний испарителей позволяют нам с определенными допущениями ввести в рассмотрение дополнительное уравнение

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = L \sum v_i \mu_i, \quad (\text{III.27})$$

где L — коэффициент, определяемый экспериментальным путем.

Правомерность применения обоих уравнений вытекает из положений термодинамики необратимых процессов.

Ниже приведены основные этапы становления моделей процесса, учитывающих энергетический фактор.

Онсагер впервые сформулировал общий принцип, а именно принцип наименьшего рассеяния энергии. Кроме того, Онсагер выдвинул и частный принцип, согласно которому необратимые процессы при небольших отклонениях от термодинамического равновесия могут быть описаны линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами [182, 183]. Де Донде [184] ввел понятия степени протекания, или химической переменной, а также показал возможность использования функции средства для анализа смещения равновесия в гетерогенных системах.

Пригожин [36] предложил новый общий принцип — принцип наименьшего производства энтропии, оказавшийся для решения практических задач более удобным, чем принцип Онсагера. Зубарев [185] рассмотрел статистическую теорию химических реакций как в линейном, так и в нелинейном по термодинамическим силам приближении. Дьярмати [186] установил соотношение между принципами Онсагера и Пригожина и формы уравнений последующих приближений, поскольку уравнения Онсагера являются линейным приближением. Из вариационного принципа наименьшего рассеяния энергии, представленного через силы, Дьярмати вывел уравнения теплопроводности, диффузии и вязких течений. Более подробно сведения по термодинамике необратимых процессов изложены в работах [187–192].

Следует отметить, что развиваемый вышеупомянутыми исследователями математический аппарат не позволяет вычислить фазовую траекторию конкретной химической системы или параметры предложенного цикла. Для решения задачи нам необходимы динамические уравнения, устанавливающие закономерности изменения коэффициента L .

Таким образом, разработанные термодинамические методы в сочетании с кинетическими позволяют достаточно полно исследовать равновесные и неравновесные условия гетерогенных систем.

Обратимся к опубликованным данным [193]. Максимальные скорости вытеснения водорода сплавами алюминия и кремния, а также борогидридом натрия представлены в табл. 2. Здесь же приведены экспериментальные значения коэффициента L .

Таблица 2

Термодинамические и кинетические данные реакций борогидрида натрия и сплавов алюминия и кремния с водой и раствором едкого натра при $t = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$

Наименование вещества	Энергия Гиббса реакции ΔG_i , кДж	Удельная энергия Гиббса $\Delta \mu$, кДж/кг*	Максимальная скорость выделения водорода, $W \cdot 10^3$, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Коэффициент $-L \cdot 10^8$, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{кДж})$
АГ505И5	-925	-17130	32	188
NaBH_4 , CoCl_2	-344	-9053	0,68	7,5
NaBH_4	-344	-9053	0,377	4,2
ФСА 25	(см. Al и Si)	-14115	0,318	2,25
ФС 75	-362,4	-12943	0,08	0,6

* Значения $\Delta \mu$ отнесены к 1 кг активной части сплава.

Как видим, величины L следуют за изменением значений A , но не в прямой зависимости. Последнее обстоятельство связано с различными величинами энергии активации, во многом определяемыми характером смыва продуктов реакции с поверхности взаимодействующих веществ.

Анализируемые результаты были получены при невысоких давлениях. Нас же интересуют реакции при повышенном давлении, протекающие в недрах Земли.

Исследование проводили на установке со стандартным баллонным одnogорловым газогенератором емкостью 45 л и рабочим давлением 15 МПа типа АВГ-45. Установка с газогенератором АВГ-45 аналогична автоматизированной реакторной установке, приведенной на рис. 31, за исключением систем приготовления и подачи щелочи и пульпы.

Методика эксперимента

Во время опытов порошок сплава и гранулированную щелочь засыпают в реактор, затем заливают требуемое количество воды.

После проведения процесса реактор охлаждают. По давлению и объему свободной части баллона определяют количество образовавшегося водорода. Сброс газа в атмосферу производят через конденсатор, сепаратор и расходомер ГСБ-400. Объем сливаемой пульпы измеряют мерной емкостью.

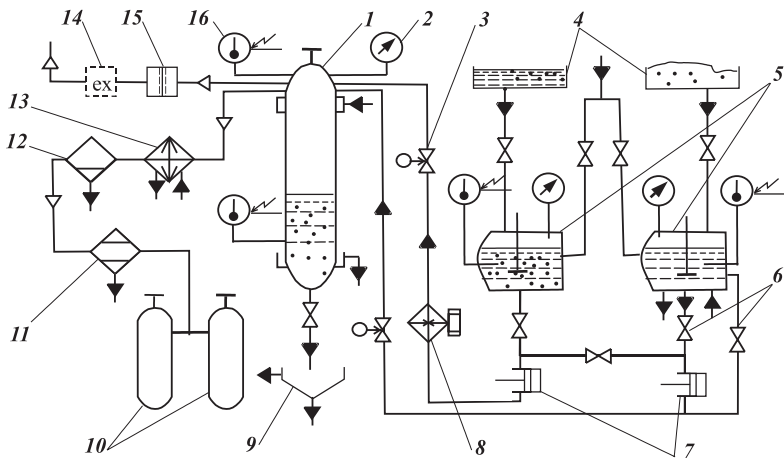
Для наблюдения за процессом аппарат снабжен соответствующими контрольно-измерительными приборами.

Поскольку среда в реакторе агрессивна, термомпары размещены в трубках из нержавеющей стали (диаметром $8 \cdot 10^{-3}$ м). Трубки введены в газогенератор через головку специальной конструкции на высоту 0,02 м и 1,17 м от дна баллона. Одновременно фиксируют температуру наружной стенки баллона.

Применялись сплавы следующего химического состава, масс. %: ФСА 11 (Fe-18.15, Si-61.9, Al-11.13, Ti-0.68, Mg-0.15, Ca-4.0, P-0.059, S-0.04); ФСА 16 (Fe-17.5, Si-60.4, Al-15.8, Ti-0.84, Mg-0.22, Ca-3.6, P-0.088, S-0.040); ФСА 18 (Fe-7.2, Si-74.8, Al-18); ФСА 25 (Fe-10, Si-65, Al-25); ФС 75 (Fe-20÷25, Si-74÷80, Al-0.6, Cr-0.5, P-0.05, S-0.03); С — кремний металлический, чистый; САС-1 (Si-25÷30, Al-62÷68, Ni-5÷7, Fe-0.5).

Результаты опытов представлены в табл. 3, 4 и рис. 32, 33. В таблицы внесены ранее опубликованные материалы [194]. В скобках указаны давление после остывания реактора и время индукционного периода.

Номера опытов в третьей таблице соответствуют номерам кривых на рис. 32. То же самое соблюдается между четвертой по тексту данного раздела таблицей и рис. 33.



1 – реактор; 2 – манометр; 3 – вентиль пневмоуправляемый; 4 – емкости для реагентов; 5 – мешалки для приготовления реагентов; 6 – вентили; 7 – насосы поршневые; 8 – теплообменник с электронагревом; 9 – емкость для продуктов реакции; 10 – баллоны для водорода; 11 – осушитель силикогелевый; 12 – сепаратор; 13 – конденсатор; 14 – огнегаситель; 15 – мембрана предохранительная; 16 – термометр электроконтактный (термопара).

Рис. 31 а. Схема автоматизированной реакторной установки (УВР)

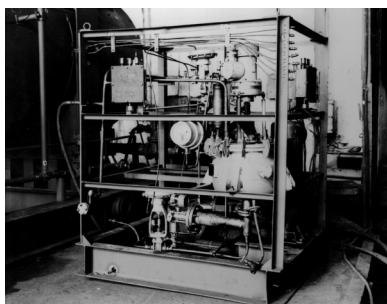
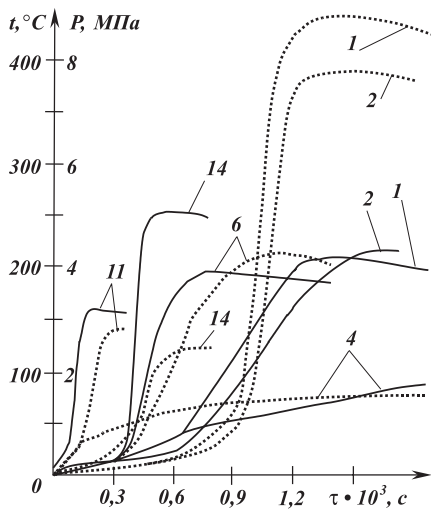
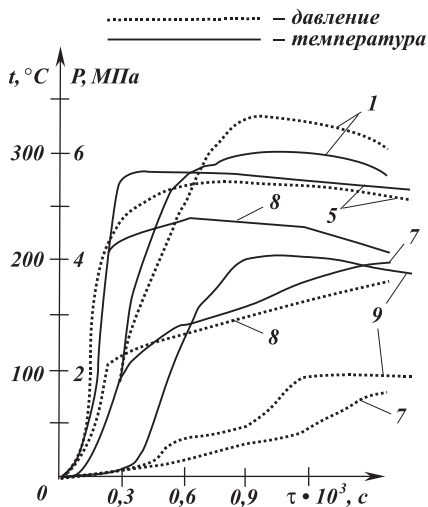


Рис. 31 б.
Реакторный блок (слева)
и блок подготовки реагентов
(справа)



1, 2 – Si; 4 – САС-1; 6 – ФС 75; 11, 14 – ФСА 25.

Рис. 32. Изменение температуры наружной стенки и давления в газогенераторе АВГ-45 во время реакции



1 – ФС 75; 5, 7 – ФСА 18; 8, 9 – ФСА 11.

Рис. 33. Изменение температуры и давления в газогенераторе АВГ-45 во время реакции

Таблица 3

Результаты испытаний газогенератора АВГ-45 на чистом кремнии, стандартных (САС-1 и ФС 75) и синтетических (ФСА 18 и ФСА 25) сплавах (1-я серия экспериментов)*

№	Соотношение загружаемых компонентов, кг	Концентрация щелочи, %	Максимальная температура в зоне реакции, °С	Давление в реакторе, МПа	Общее время реакции, мин	Количество полученного водорода, м ³
1	Si : Al : NaOH : H ₂ O	13,3	385	8,8 (6,0)	22	1,835
	1,2 : 0,05 : 0,8 : 6,0					
2	1,2 : 0,05 : 0,8 : 6,0	13,3	380	7,8 (5,2)	25	1,64
3	САС-1 : NaOH : H ₂ O	15	350	2,5	5	0,73
	1,25 : 0,9 : 6,0					
	1,25 : 0,65 : 6,5					
4	1,25 : 0,65 : 6,5	10	190	1,5	30	0,56
5	0,65 : 0,9 : 6,0	15	330	2,5	19	0,8
6	ФС75 : Al : NaOH : H ₂ O	15	320	4,0	30	1,485
	1,25 : 0,05 : 0,9 : 6,0					
7	ФСА18 : Al : NaOH : H ₂ O	16,6	310	3,5	20 (6)	1,3
	1,25 : 0,05 : 1,0 : 6,0**					
8	ФСА25 : Al : NaOH : H ₂ O	16,6	320	4,0	35	1,45
	1,2 : 0,3 : 1,0 : 6,0					
	1,2 : 0,3 : 0,8 : 6,0**					
	1,0 : 0,2 : 1,0 : 6,5					
	1,0 : 0,2 : 0,5 : 2,5					
9	1,2 : 0,3 : 0,8 : 6,0**	13,3	310	3,8	39 (4)	1,36
10	1,0 : 0,2 : 1,0 : 6,5	15,4	300	3,0	25 (4)	1,2
11	1,0 : 0,2 : 0,5 : 2,5	20	295	2,8	4	1,12
12	ФСА25 : NaOH : H ₂ O	6,66	275	2,0 (2,0)	20 (12)	0,8
	1,5 : 0,2 : 3,0					
	1,2 : 0,4 : 2,5					
	1,3 : 0,5 : 3,0					
	1,25 : 0,5 : 2,5					
13	1,2 : 0,4 : 2,5	16	360	(3,0)	6	1,15
14	1,3 : 0,5 : 3,0	16,6	350	(2,6)	13 (3)	1,05
15	1,25 : 0,5 : 2,5	20	370	2,8	5	1,25

* Дисперсный состав сплавов: С(Si) — $(0,05 \pm 3,0) \cdot 10^{-3}$ м, САС-1 — $(0,005 \pm 0,63) \cdot 10^{-3}$ м, ФС 75 — $(0,05 \pm 3,0) \cdot 10^{-3}$ м, ФСА 18 и ФСА 25 — $(0,05 \pm 4,0) \cdot 10^{-3}$ м;

** Для разогрева реактора вместо алюминия применен сплав САС-1.

Результаты испытаний газогенератора АВГ-45 на стандартном (ФС 75), синтетическом (ФСА 18) и полученных из угля (ФСА 11 и ФСА 16) сплавах (2-я серия опытов)*

№	Соотношение загружаемых компонентов, кг	Концентрация щелочи, %	Максимальная температура в зоне реакции, °С	Давление в реакторе, МПа	Общее время реакции, мин	Количество полученного водорода, м ³
1	ФС75 : Al : NaOH : H ₂ O 1,2 : 0,05 : 0,9 : 6,0	15	290	6,5	22	1,38
2	ФСА18 : Al : NaOH : H ₂ O 1,2 : 0,3 : 0,8 : 6,0	13,3	255	5,0 (4,8)	32	1,3**
3	ФСА18 : NaOH : H ₂ O 1,25 : 0,5 : 2,5	20	275	5,0 (4,8)	10	1,1**
4	1,25 : 0,5 : 2,5	20	280	4,6 (3,4)	13	1,14**
5	1,25 : 0,6 : 2,5	24	285	5,3 (3,7)	8	1,25**
6	1,25 : 0,6 : 3,0	20	280	4,5 (3,3)	12	1,2**
7	1,25 : 0,3 : 3,0	10	200	(1,25)	25 (5)	0,59**
8	ФСА11 : NaOH : H ₂ O 1,25 : 0,5 : 3,0	16,6	240	3,7 (3,3)	37 (1,5)	1,22
9	1,25 : 0,466 : 3,5	13,3	205	(1,8)	18 (6)	0,8
10	ФСА16 : NaOH : H ₂ O 1,25 : 0,5 : 3,0	16,6	245	3,5	30 (2)	1,18

Обсуждение результатов

Первая серия опытов, проведенная в летний период, показала, что наибольшая производительность реактора наблюдается при работе на металлическом кремнии. Однако при охлаждении реактора жидкое стекло застывает в нижней части баллона. В случае сброса водорода из горячего реактора происходят вскипание раствора и вынос твердых продуктов реакции в газопровод. В связи с этим проблема выгрузки пульпы из АВГ-45 при работе на чистом кремнии требует дальнейшей разработки.

Сплав САС-1 взаимодействует с водой мгновенно, однако образующийся гидроксид с некоторого момента начинает поглощать воду [195]. С исчезновением воды реакция затухает (опыт 4). Требуемая полнота про-

* Дисперсный состав сплавов: ФС 75 — $(0,16 \pm 2,0) \cdot 10^{-3}$ м; ФСА 18 — $(0,16 \pm 2,0) \cdot 10^{-3}$ м — в опытах № 2–4, $(0,1 \pm 2,0) \cdot 10^{-3}$ м — в опыте № 5 и $(0,315 \pm 2,0) \cdot 10^{-3}$ м — в опытах № 8, 9; ФСА 11, ФСА 16 — $(0,1 \pm 3,0) \cdot 10^{-3}$ м.

** Выгрузка продуктов реакции затруднена.

цесса обеспечивается при увеличении объема подаваемой воды примерно вдвое (опыт 5).

Установлено, что объем водорода, выделившийся в результате взаимодействия с водой ФСА 25, незначительно отличается от полученного в аналогичной реакции с ФС 75. Производство водорода в зимний период требует добавления порошка алюминия для разогрева реактора (опыты 6, 7).

Алюминий можно исключить, сокращая объем заливаемой воды. При этом становится возможным уменьшение количества используемой щелочи в 2 раза по отношению к стандартному расходу (опыты 10–12).

Температура в газогенераторе при стандартной загрузке ФС 75, щелочи и воды близка к указанной в инструкции [196]. При взаимодействии ФСА 25 и САС-1 температура незначительно повышается. С уменьшением подаваемой воды температура реакции ФСА 25 с раствором едкого натра увеличивается до 370 °С. Максимальные температуры отмечены в опытах с чистым кремнием.

В зимний период (в операторной 0–7 °С) температура изменяется следующим образом. Для реакции ФС 75 максимальная температура наружной стенки нижней части баллона — 160–170 °С, для кремния — 185–220 °С, для ФСА 25 — 145–165 °С (при сокращении подаваемой воды вдвое — до 220 °С).

Температура газа в верхней части баллона во время реакции колеблется в пределах 90–110 °С, после завершения реакции — не более 50 °С.

Судя по графикам, рост температуры реагирующей смеси, как правило, опережает рост давления. Таким образом, в начальный период происходит частичное вскипание воды.

В летний период (в операторной 18–25 °С) при использовании ФС 75 наружная стенка нижней части баллона разогревается до 180–200 °С, ФСА 25 — до 165–185 °С (при сокращении объема воды вдвое — до 260 °С).

Как показывают данные [197], температура поверхности частиц сплава при высоком давлении значительно выше температуры раствора. Исходя из этого высокие температуры, зафиксированные автором работы [198] в начале процесса, связаны, по-видимому, с касанием слая термопары поверхности реагирующих частиц.

Тепло, выделяемое во время реакции, идет на прогрев продуктов взаимодействия, металла нижней части реактора и частичное испарение воды. Расчетная температура, определяемая для опытов с ФС 75 из теплового баланса, соответствует экспериментально найденной (290 °С в зимний период и 320 °С в летний).

Вторая серия экспериментов была нацелена на поиск режимов выгрузки продуктов реакции в зимний период при сокращенном расходе воды. В холодное время воду, подаваемую на реакцию, разогревают до 50–60°C, так как при заливе холодной воды (10–15°C) реакция не развивается.

Установлено, что продукты взаимодействия сплава ФСА 18 невозможно выгрузить из реактора (опыты № 2–7). По-видимому, данное обстоятельство частично связано со снижением температуры процесса. Продукты реакции сплавов ФСА 11 и ФСА 16, полученных восстановлением неорганической части угля, свободно удаляются из АВГ-45 (опыты № 8–10).

Методика обработки опытных данных

Скорость образования водорода в реакционном объеме равна:

$$W = \Delta V / (m \cdot \Delta \tau) \text{ и } W = \Delta V / (f_{\text{уд}} \cdot \Delta \tau) \quad (\text{III.28})$$

Обобщение опытных данных проведено по уравнению (III.27).

Объединив уравнения (III.27) и (III.28), можно записать

$$W = d\alpha / d\tau = LA, \quad (\text{III.29})$$

$$L = \Delta V / (f_{\text{уд}} \cdot \Delta \tau \cdot \Delta \mu). \quad (\text{III.30})$$

Значения коэффициента L для газогенератора АВГ-45 и кинетического стенда представлены в табл. 5, 6.

С повышением температуры с 363 К до 500 К скорость реакции значительно возрастает для кремния, ФС 75, но несколько снижается для алюминиевых сплавов и синтетических ФСА. Снижение скорости, по-видимому, связано с режимом размывания гидроксида алюминия, образующегося на поверхности частиц.

С ростом размеров аппаратов следует ожидать усиления неравномерности циркуляции потоков, что должно отразиться на интенсивности газовой выделения. В этом случае целесообразно представить коэффициент L в виде зависимости от критерия Re жидкости подъемного потока

$$L = k \cdot Re^n. \quad (\text{III.31})$$

В первом приближении значения критерия Re определяют по методу, разработанному для испарителей [50], а во втором — для газлифтов [152]. Зависимость коэффициента L от числа Re для баллонного газогенератора АВГ-45 и кинетического стенда представлены на рис. 34 (в том числе данные ИПМаш по испытанию реакторов 0,08 м³ и 0,2 м³ [50, 199]). Характеристики реакторов приведены в табл. 7.

Таблица 5

Термодинамические и кинетические данные реакций взаимодействия сплавов с водой и водным раствором щелочи в АВГ-45

Тип сплава	Удельная энергия Гиббса*, $-\Delta G_i$, кДж/кг	Максимальная скорость выделения водорода,		Коэффициент, $-L \cdot 10^8$, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{кДж})$
		$W \cdot 10^3$, $\text{м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с})$	$W \cdot 10^5$, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	
$t \approx 100^\circ\text{C}$ (373 K), $P \approx 0,1$ МПа				
ФСА 18	14598	1,38	2,77	0,19
ФСА 11	14465,2	5,93	11,85	0,82
ФС 75	14002,6	4,52	9,04	0,646
$t = 227^\circ\text{C}$ (500 K), $P \leq 5$ МПа				
САС-1	15225,7 (16212,5)	3,12	2,61	0,171 (0,161)
ФСА 25	14400,34 (15197,1)	1,74	3,04	0,211 (0,2)
ФСА 18	14237,5 (14996,8)	2,23	7,19	0,505 (0,48)
ФСА 16	14263,5 (15028,8)	2,76	6,91	0,33 (0,46)
ФСА 11	14156,73 (14897,4)	2,93	7,33	0,36 (0,491)
ФС 75	13875,65 (14551,6)	3,01	6,02	0,361 (0,414)
С (Si)	13860,6 (14533,1)	2,55	4,28	0,309 (0,295)

Таблица 6

Термодинамические и кинетические данные реакций взаимодействия сплавов с водой и водным раствором щелочи в реакторе кинетического стенда (объем реактора $1,13 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$)

Тип сплава	Удельная энергия Гиббса**, $-\Delta G_i$, кДж/кг	Максимальная скорость выделения водорода,		Коэффициент, $-L \cdot 10^8$, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{кДж})$
		$W \cdot 10^3$, $\text{м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с})$	$W \cdot 10^5$, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	
$t \approx 100^\circ\text{C}$ (373 K), $P \approx 0,1$ МПа				
ФСА 18	14598	6,95	13,9	0,952
ФСА 11	14465,2	21,6	43,2	2,987
ФС 75	14002,6	10,65	21,3	1,52
$t = 227^\circ\text{C}$ (500 K), $P \leq 5$ МПа				
ФСА 18	14237,5	2,44	9,76	0,686
ФСА 16	14263,5	8,81	29,4	2,06
ФСА 11	14156,73	5,7	19	1,34
ФС 75	13875,65	12,2	48,8	3,52
С (Si)	13860,6	8,25	33	2,38

* В скобках указаны значения величин в условиях газлифта (без кипения жидкости, $P > 2,6$ МПа).** В скобках указаны значения величин в условиях газлифта (без кипения жидкости, $P > 2,6$ МПа).

Характеристики реакторов

Объем, $V \cdot 10^3, \text{ м}^3$	Диаметр, $d, \text{ м}$	Длина, $l, \text{ м}$	Масса, $m, \text{ кг}$	Рабочее давление, $P, \text{ МПа}$	Высота уровня жидкости, $h, \text{ м}$
1,13	0,072	0,25	51	50	0,12
45	0,205	1,54	64	15	0,3
80	0,304	1,38	135	15	0,9

В ранее опубликованных работах приведены зависимости для сплавов: АГ5О5И5 (активированный алюминий) с водой (рис. 34 а, прямая 1):

$$L = 5,61 \cdot 10^{-6} \text{ Re}^{-0,11}. \quad (\text{III.32})$$

ФСА 25 с 10%-ным NaOH (рис. 34 а, прямая 2):

$$L = 0,153 \cdot 10^{-6} \text{ Re}^{-0,17}. \quad (\text{III.33})$$

ФС 75 с 25%-ным NaOH (рис. 34 а, прямая 3):

$$L = 0,245 \cdot 10^{-6} \text{ Re}^{-0,33}. \quad (\text{III.34})$$

В настоящей работе установлены зависимости для сплавов:

ФСА 11 с 16,6%-ным NaOH (рис. 34 б, прямая 5):

$$L = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ Re}^{-0,55}. \quad (\text{III.35})$$

ФС 75 с 15%-ным NaOH (рис. 34 б, прямая 6):

$$L = 6,24 \cdot 10^{-7} \text{ Re}^{-0,32}. \quad (\text{III.36})$$

ФСА 18 с 20%-ным NaOH (рис. 34 б, прямая 7):

$$L = 2,82 \cdot 10^{-5} \text{ Re}^{-0,82}. \quad (\text{III.37})$$

ФС 75 с 15%-ным NaOH (рис. 34 а, прямая 4):

$$L = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Re}^{-0,48}. \quad (\text{III.38})$$

Уравнение (III.32) рассчитано для условий $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ (373K), $P \leq 0,1 \text{ МПа}$ и справедливо в интервале $4 \cdot 10^4 < \text{Re} < 8 \cdot 10^5$, (III.38) — при $t = 227 \text{ }^\circ\text{C}$ (500K), $P \leq 1 \text{ МПа}$ и для чисел Рейнольдса $3 \cdot 10^5 < \text{Re} < 2 \cdot 10^6$.

Подтвержден факт снижения коэффициента L с ростом размеров аппарата для каждого типа реакции. Неравномерность циркуляции потоков усиливается с ростом плотности частиц сплава. За счет пульсации давления можно увеличить производительность реактора. Повышение давления в реакторе сопровождается ростом температуры смеси. Во время резкого снижения давления жидкость вскипает, что вызывает интенсивное перемешивание фаз.

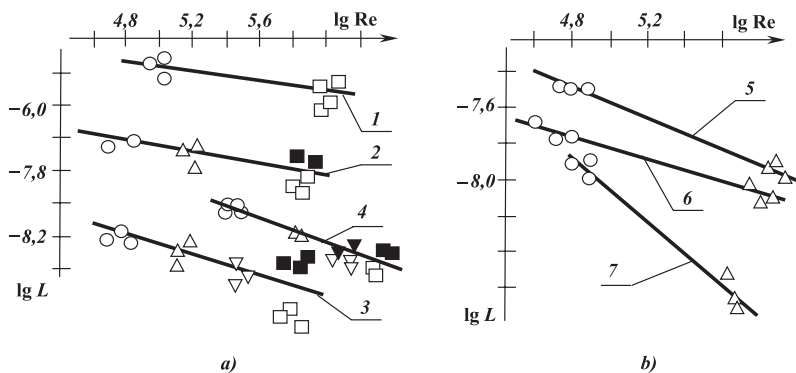


Рис. 34. Зависимость коэффициента L от числа Re жидкости подъемного потока для реакций

1 — АГ505И5 с водой; 2 — ФСА 25 с 10 %-ным NaOH; 3 — ФС 75 с 25 %-ным NaOH; 4 — ФС 75 с 15 %-ным NaOH; 5 — ФСА 11 с 16,6 %-ным NaOH; 6 — ФС 75 с 15 %-ным NaOH; 7 — ФСА 18 с 20 %-ным NaOH.

Прямые 1–3, 5–7 найдены для условий — $t = 100^\circ\text{C}$, $P \leq 0,1$ МПа; 4 — $t = 227^\circ\text{C}$, $P \leq 1$ МПа.

1–3 — данные ИПМаш; 4–7 — данные настоящей работы.

Реакторы: \circ — кинетический стенд — $1,13 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; \triangle — стандартный АВГ-45 — $0,045 \text{ м}^3$; ∇ — в составе УВР — $0,08 \text{ м}^3$, стационарный режим; \blacktriangledown — в составе УВР — $0,08 \text{ м}^3$, пульсирующий режим; \square — опытно-промышленный — $0,2 \text{ м}^3$, стационарный режим; \blacksquare — опытно-промышленный — $0,2 \text{ м}^3$, пульсирующий режим.

Судя по графику, наиболее оптимальным с точки зрения производительности и обеспечения устойчивости процесса является реактор объемом $0,08 \text{ м}^3$.

Для расчета аппарата найдены зависимости по теплообмену. Экспериментальные данные по исследованию теплообмена в реакторе АВГ45 представлены на рис. 35. Для сплава ФС 75 теплообмен подчиняется зависимости

$$Nu = 1,5 \cdot 10^{-17} Re^{3,7} Pr^{0,33}. \quad (\text{III.39})$$

Уравнение (III.39) рассчитано на полупериод реакции ($\alpha_r = 0,5$) и справедливо в интервале $7 \cdot 10^3 < Re < 2 \cdot 10^4$ ($t \cong 227^\circ\text{C}$ (500K); $P > 2,6$ МПа).

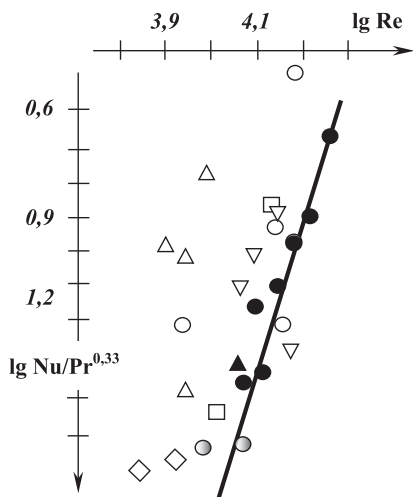
В данном случае значения критерия Re рассчитаны с учетом скольжения фаз по методике, изложенной в разделе 3.3.1.

В данном случае объем образующихся газов зависел от типа реагентов и, отчасти, от варьирования загружаемого количества.

На рис. 35 приведены значения критерия Нуссельта для чистого кремния сплавов ФСА 11, ФСА 18, ФСА 25 и ФС 75. Прямая линия на рис. 35 соответствует уравнению (III.39). Высокие значения степени Re свидетельствуют о значительной турбулизации пограничного слоя, контактирующего с реакционной поверхностью, потоком пузырьков образующегося водорода. Конкретные математические зависимости по интенсивности теплообмена для других сплавов могут быть рекомендованы по мере дальнейшего накопления статистических данных.

Полученные опытные и теоретические данные использованы при проектировании автоматизированной реакторной установки, представленной на рис. 31 [200]. В этой работе приведены уравнения химических реакций с участием щелочи.

Сравнивая результаты данного исследования с результатами предыдущего, где обнаружено противоположное влияние числа Рейнольдса, мы еще раз убеждаемся в том, что законы трения в трехфазных потоках неинвариантны относительно изменения пространственного масштаба систем, или, иначе говоря, преобразований подобия.



□ – ФСА 11; ▲ – ФСА 18; 20 % NaOH; ○ – ФС 75; 15 % NaOH; ◇ – C (Si); 13,3 % NaOH; ▽ – ФСА 25 – по данным настоящей работы; ● – ФС 75 – по данным [198]; □, ○, △, ▽ – загрузка реагентов значительно отличается от стандартной.

Рис. 35. Зависимость коэффициентов теплоотдачи порошков различных сплавов в стандартном газогенераторе АВГ-45 от числа Рейнольдса подъемного потока

При особо высоких давлениях значения энергии Гиббса следует уточнить по формуле

$$\Delta G_i = \Delta G_i \ln (P_2/P_1), \quad (\text{III.40})$$

где P_2, P_1 — конечное и начальное давления в аппарате.

Итак, проведенное исследование позволяет утверждать, что в пределах температур 0–400 °С не соблюдается строгая пропорциональность между движущей силой процесса и скоростью вытеснения водорода из воды сплавами алюминия, кремния и железа.

С увеличением диаметра аппарата тепломассообмен ухудшается.

Полученные данные могут служить ориентиром при оценке скорости подземных реакций.

3.4. СКОРОСТЬ ПОДЗЕМНЫХ РЕАКЦИЙ

В этом разделе воспользуемся нашими знаниями о физико-химических превращениях для вскрытия закономерностей подземных реакций.

Вначале выберем ориентир, по отношению к которому будем сравнивать возможные величины скорости подземных реакций. Достаточно надежным аналогом может служить скорость вытеснения водорода из воды сплавами алюминия. Например, при температуре 90°С скорость образования водорода при взаимодействии активированного алюминия с водой составляет

$$W_{H_2} \approx 0,04 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Предположим, что условия в глубине Земли позволяют сплавам кремния реагировать с водой со скоростью W_{H_2} . Подсчитаем, на какой период нам хватит воды, сосредоточенной в Мировом океане.

Мы знаем, что объем воды в океане составляет 1370 млн. км³, а поверхность океана занимает площадь 361,1 млн. км² [83].

Далее допустим, что площадь дна океана равна поверхности океана и соответствует величине реакционной поверхности. После несложных арифметических действий находим, что Мировой океан должен исчезнуть с лица Земли за 30 лет.

Скорость реакции, достигнутая в реакторах высокого давления при взаимодействии сплавов ФСА и кремния с водой, на два порядка ниже взятой нами в качестве аналога. Ориентируясь на эту скорость, мы лишь немногим повлияем на участь океана — он исчезнет за три тысячи лет. Между тем, за сотни миллионов лет своего существования океан крайне неохотно сдает свои позиции [95].

Разберемся с причинами такого поведения океана. Для этого проанализируем основные факторы, влияющие на скорость подземных реакций. Мы знаем, что с глубиной растут температура и давление. Одновременно увеличивается слой оксидов между океаном и толщиной кремниевых сплавов.

Займемся выяснением влияния температуры на скорость реакций. В предыдущем разделе мы обратили внимание на довольно высокие значения энергии активации процесса взаимодействия алюминия с водой [114]. Та же закономерность отмечена в реакциях кремния с водой и водяным паром [116, 201, 202]. То и другое относится к сравнительно низким температурам взаимодействующих сред.

Ситуация коренным образом изменяется при высоких температурах. В этом случае с повышением температуры скорость реакции уменьшается [203, 204]. Последнее обстоятельство говорит о том, что значения скорости реакции следуют за изменением величины энергии Гиббса, которая с повышением температуры снижается. Таким образом, с ростом температуры химическая стадия процесса не может создавать высокое сопротивление протеканию реакции. Заметим, что высокие температуры могут приводить к переходу кристаллических веществ в зоне реакции в расплавленное состояние.

Далее определим влияние стока тепла на скорость реакции. Теплопроводность сплава ФСА и сплавов кремния с магнием, составляющих основу нижележащих слоев Земли, почти в два раза превышает теплопроводность стали [116, 205]. Поэтому тепло сравнительно свободно перераспределяется в теле планеты. Отсюда фиксируемый тепловой поток из недр к поверхности имеет примерно равную величину в различных частях света.

Действующие температурные напоры связаны с зоной реакции и с ядром Земли.

Максимальная температура складывается в зоне контакта воды или водяного пара со сплавами кремния с магнием или алюминием. Нарастание температуры от поверхности Земли к этому слою происходит так же, как это наблюдалось в только что изученном нами случае с реагирующим куском активированного алюминия. Ниже фронта реакции по направлению к центру планеты должно наблюдаться менее существенное снижение температуры, чем это имело место в зафиксированных нами опытах. Дело в том, что ядро Земли хранит в себе тепло, возникшее в результате гравитационного сжатия. Кроме того, вполне возможно, что ему досталась часть тепла от Протосолнца. Очевидно, что сток тепла к полюсам идет как из зоны реакции сплава кремния с водой, так и из ядра Земли.

Судя по всему, выход тепла из зоны реакции не может каким-либо образом ограничить скорость реакции.

С процессом распространения тепла путем теплопроводности можно познакомиться более глубоко, изучив монографии [206, 207].

Остановимся на влиянии давления на рассматриваемый процесс.

Как показывают расчеты, давление, соответствующее найденной константе равновесия, может достигать многих миллиардов атмосфер. Это означает, что водород может преодолеть любые препятствия, возникающие на его пути из зоны реакции к поверхности Земли.

Отсюда можно сделать вывод, что рост давления с глубиной не в состоянии остановить реакцию или существенно изменить ее скорость.

Итак, мы подошли к основному сопротивлению процессу, а именно к препятствию, создаваемому оксидным слоем литосферы проникновению воды и водяного пара к реакционной поверхности. Кроме того, следует учитывать скорость испарения воды при подходе к этой поверхности и ее частичной конденсации в подъемных каналах.

Оценим силы, воздействующие на отслоение оксидного слоя.

Прежде всего отметим, что для земного шара, имеющего радиус 6371 км, слой литосферы в несколько десятков километров является всего лишь тонкой “пленкой”. Проследим за трансформированием этой “пленки” в ходе развития Земли.

Как известно, форма Земли — геоид: из-за вращения ее фигура близка к эллипсоидной, она сплюснута у полюсов и растянута в экваториальной зоне. В свое время жидкая Земля из-за быстрого вращения была более сплюснута, чем сейчас.

По мере остывания планеты выработка механической энергии ею снижалась, что сопровождалось уменьшением числа оборотов. Земля все больше и больше принимала шарообразную форму. Последнее обстоятельство привело к появлению широтных разломов в еще слабой земной коре. В тот же период еще до возникновения гор на поверхность Земли в образованные трещины излились тяжелые соединения, включая сплавы железа, марганца, никеля и других металлов. Это явление, кстати, говорит о крайней неравномерности продвижения фронта кристаллизации вглубь Земли. Эта неравномерность привела к образованию локальных зон жидких металлов в общей толще кристаллической массы.

По мере формирования Мирового океана и продвижения к центру Земли зоны реакций стали развиваться меридиональные разломы. Как уже упоминалось, кристаллизация Земли произошла в виде меридиональных волокон, раздвижение которых под воздействием глубинных сил явля-

ется наиболее вероятным процессом. В целом земная кора изначально должна иметь сеть меридиональных и широтных разломов.

Далее, не секрет, что твердое тело Земли испытывает приливные лунно-солнечные воздействия. Литосфера вздымается на десятки сантиметров, и волна вздутия каждые сутки обегает вокруг планеты. Самый большой подъем твердой оболочки Земли происходит так же, как и при морских приливах, при суммарном воздействии гравитационных сил Луны и Солнца [208].

Не меньшее влияние на отслоение оксидного слоя оказывают выполняемые на поверхности Земли взрывные работы, а также постоянные войны, терзающие нашу планету. Пожалуй, это влияние соизмеримо с воздействием на подземные реакции землетрясений.

За год на земном шаре в среднем происходят: одно мощное землетрясение, от 10 до 100 средних и более 10000 землетрясений малой мощности [82].

По сути дела, подземные реакции можно отнести к классу автокаталитических, поскольку землетрясения ускоряют их течение. Этот вопрос заслуживает отдельного обсуждения, поэтому остановимся на нем более подробно.

Но прежде чем приступить к обсуждению очередного глобального вопроса, позволим себе остановиться на ряде локальных данных, полученных, в частности, на Кольской сверхглубокой скважине [115].

Кольский полуостров был выбран потому, что Балтийский щит на протяжении сотен миллионов лет подвергался эрозии: разрушено, снесено водой и ледниками от 5 до 15 километров верхнего гранитного слоя. Поэтому геологический разрез Кольской скважины фактически соответствует глубинам 15–25 км. Возраст пород Балтийского щита — 1,5 миллиарда лет. На глубине 12 км — 3 млрд. лет, а возраст Земли — 4,5–5 млрд. лет. “Длина” скважины — полтора миллиарда лет — существенный период жизни нашей планеты.

На Кольской скважине впервые были получены прямые данные с глубины более 10 км. Перечислим некоторые наиболее важные результаты.

Подтверждена гипотеза В.И. Вернадского о существовании жизни в докембрийскую эпоху. Обнаружено более 17 видов микроорганизмов — прямых свидетелей того, что происходило на нашей планете 1,6–1,9 млрд. лет тому назад.

Проницаемость пород на глубине 6–8 км местами оказалась выше, чем вблизи поверхности Земли. Именно там обнаружены пористые, пронизанные трещинами, насыщенные водами слои. С этим связано уникаль-

ное явление, названное волноводом. Это зона с пониженными сейсмическими скоростями из-за пониженной плотности горных пород.

Много лет считалось, что так называемая граница Мохоровичича, на которой скачкообразно меняется скорость сейсмических волн, связана с границей между гранитным слоем и базальтовым. Кольская скважина пересекла границу “скачка”, но никакого базальта обнаружено не было. Скачок скоростей оказался связан с уменьшением плотности пород.

Выяснилось, что даже на глубине более 9,5 км принципиально возможны месторождения медных, свинцово-цинковых, никелевых руд.

На Кольской сверхглубокой впервые в мировой практике получены данные о глубинном “дыхании” Земли — потоке газов из мантии (азота, метана, благородных газов, паров ртути и т.д.). Предполагалось, что в Балтийском щите температура с глубиной растет незначительно — примерно на 8—10 °С на каждый километр. Однако на глубине 10 км она достигла 180 °С. Эти данные свидетельствуют о близости зоны реакции бескислородных соединений с водой. Впрочем, возможно также повышенное содержание радиоактивных элементов.

Намечаемое в перспективе сверхглубокое бурение позволит также оценить нефтегазоносность глубоких горизонтов. Сейчас нефть и газ в промышленных количествах открыты на достаточно больших глубинах (до 4,5—5 км). В последние годы доказано, что на глубинах более 7—8 км в условиях температур, превышающих 200 °С, может сохраняться не только газ, но и нефть.

В земных глубинах есть еще один нетрадиционный вид сырья — метан, растворенный в пластовых водах. Его запасы многократно перекрывают запасы традиционного газового сырья и практически неисчерпаемы, хотя пока не используются. Причины в том, что каждая скважина в отдельности дает слишком мало газа. Не исключено, что с глубиной содержание газа будет возрастать.

Совершенно очевидно, что данные Кольской скважины подтверждают необходимость введения в круг рассматриваемых процессов фильтрацию воды в пористых средах. Здесь мы можем опираться на сведения многочисленных монографий и, в частности, на изложенные в работах [209—212]. Анализ динамической ситуации в подземных коллекторах воды возможен лишь на основе конкретных характеристик пористых сред в том или ином изучаемом районе. В таком случае без глубинного бурения не обойтись.

Колебание материков под воздействием вращения Земли и сезонных ветров [213] обуславливает повышенную фильтрацию воды в зонах, ука-

занных на рис. 20. Геотермические станции целесообразно разместить именно в зонах наибольшей вулканической активности.

Нам же для понимания законов деформации земной коры и ее эволюции осталось познакомиться с особенностями горообразования и землетрясениями.

3.5. РОЖДЕНИЕ ГОР И ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Продолжим обсуждение необратимых процессов, протекающих в недрах Земли.

Вначале обратим внимание на характер рельефа земной поверхности. Формирование упорядоченных структур, каковыми являются горные хребты, свидетельствует о наличии мощного потока энергии из недр Земли в космос.

Здесь уместно было бы ввести геометрическую градацию горных структур, т.е., кроме расположения, учитываемого конфигурационной энтропией, еще учесть размеры и форму гор. Кроме того, следует принять во внимание временную градацию, сводящуюся к периодичности тех или иных явлений при горообразовании.

Поиск элементов симметрии в тектонических сдвигах начнем с рассмотрения процессов, происходящих в индивидуальных циркуляционных ячейках. Функциональное назначение ячеек — подавать воду в глубинные слои и отводить из них продукты реакции.

Нас больше всего интересуют потоки тепла, водорода и дислокаций,двигающихся из зон реакций к поверхности Земли. Поток дислокаций обеспечивает рассеяние потенциальной и кинетической энергий в толще Земли подобно теплу. Форма проявления этого потока — землетрясения. Речь идет о периодическом сбросе механической энергии в поверхностные слои.

Таким образом, мы имеем дело с одним из видов креационно-диссипативных структур, действующих на этот раз в твердых массивах Земли. Принцип возникновения этих структур мало чем отличается от изученного нами в текучих средах. Но, безусловно, имеются свои особенности, на которых мы сейчас остановимся.

Как нами уже установлено, возможность окисления металлов и металлоидов кислородом, входящим в состав воды, определяется свойствами покрывающих их оксидных пленок. Особенно это заметно в подземных условиях, когда капиллярные силы практически дозируют подачу воды к реакционной поверхности.

Согласно правилу Пиллинга и Бэджворса [214–216], если объем образующегося оксида меньше объема замещаемого им металла или металлоида, то пленка оксида имеет рыхлую, ячеистую структуру и не может надежно защитить металл или металлоид от дальнейшего окисления.

Если же отношение объема оксида к объему металла или металлоида больше единицы, то образующаяся пленка оксида имеет компактную сплошную структуру, надежно изолирует металл или металлоид от воздействия водяных паров или кислорода и, следовательно, препятствуют их дальнейшему окислению.

Коэффициент ϵ Пиллинга и Бэджворса вычисляется по формуле

$$\epsilon = \frac{M_{\text{ок}} \cdot \rho_{\text{ме}}}{\rho_{\text{ок}} \cdot A_{\text{ме}} \cdot n},$$

где $M_{\text{ок}}$ — молекулярный вес оксида;

$\rho_{\text{ок}}$ — плотность оксида;

$\rho_{\text{ме}}$ — плотность металла или металлоида;

$A_{\text{ме}}$ — атомный вес металла или металлоида;

n — число атомов металла или металлоида в формуле оксида.

В табл. 8 даются значения ϵ для различных металлов и кремния. Как видно из табл. 8, для легких металлов — щелочных, щелочноземельных и магния $\epsilon < 1$, для тяжелых металлов и алюминия $\epsilon > 1$. Как указывают Пиллинг и Бэджворс, значения ϵ определяет поведение металлов при коррозии: если $\epsilon < 1$, то металл легко и быстро корродирует. При $1,31 < \epsilon < 1,7$ пленка оксида надежно охраняет металл от коррозии. Именно поэтому порошок алюминия можно хранить в воде, хотя согласно термодинамическому расчету эта система должна взрываться.

Таблица 8

Отношение объема оксида к объему металла или металлоида (ϵ) по Пиллингу и Бэджворсу

Na	0,55	Al	1,45	Cu	1,70
K	0,45	Pb	1,31	Ti	1,73
Li	0,58	Cd	1,32	Fe	2,06
Sr	0,69	Sn	1,33	Mn	2,07
Ba	0,78	Zr	1,45	Co	2,10
Ca	0,64	Zn	1,59	Cr	3,92
Mg	0,81	Ni	1,68	Si	2,04

При $2,04 < \varepsilon < 3,92$ оксидный слой получает значительные напряжения, что может приводить к его разрушению.

В подземных условиях сплав кремния содержит массу примесей, что способствует образованию рыхлой пленки оксидов.

Судя по коэффициентам Пиллинга и Бэдворса, объем оксидов значительно превышает объем исходного сплава кремния с железом и алюминием. Следовательно, накапливающаяся масса оксидов должна выдавливать вышележащие слои, что в результате должно приводить к рождению гор.

Скорость роста гор варьируется в различных частях света. Например, сейчас на Алтае горы растут со скоростью один метр в год, хотя в среднем эта скорость не превышает один миллиметр в год.

Учитывая количество воды в Мировом океане, можно сказать, что горы нашей планеты должны существенно подрасти. Об этом же свидетельствует сравнение высоты гор Земли с горами Марса, где их высота достигает 25 км.

На данный момент имеются сведения о том, что именно подземные процессы привели к оттеснению Африки к Азии.

Явление горообразования не проходит безболезненно: как правило, при этом наблюдаются землетрясения.

Большинство землетрясений зарождается на глубине до 60 км, т.е. в пределах земной коры. Но в некоторых регионах велика доля землетрясений с очагами на глубине от 200 до 700 км.

На данный момент наука о землетрясениях и вулканах носит, в основном, описательный характер [217–219]. Но с появлением сведений о скорости подземных реакций и глубинной фильтрации воды становится возможной оценка периодов землетрясений.

Как известно, земная кора неоднородна, расчленена на блоки различного объема и формы, движение которых может быть автономно в различной степени. Под действием внутриземных напряжений в определенных местах происходит разрыв горных пород или их быстрое смещение, что, собственно, и порождает сейсмические волны и колебания. Естественно, для их расчета необходимо знать прочностные свойства пород в определенном конкретном районе.

В настоящее время существует значительное число вариантов проверки материалов на прочность. Среди них выделяются исследования, устанавливающие связь между термодинамикой и теорией упругости [220]. Поскольку упругая деформация обратима, свободная энергия упругодеформируемого тела F является функцией состояния, на основании чего

строится термодинамический формализм применительно к расчету прочности упругих тел [11].

Там, где нарушается прочность пород, возникают потоки дислокаций, оценка которых проводится также по хорошо известным методикам [221].

Скорость продвижения дислокаций к поверхности зависит от местных условий. В качестве примера приведем Ташкентское землетрясение 1966 г. Сила первого толчка составила 5,5 баллов, гипоцентр находился на глубине всего 8 км, а эпицентр пришелся на центральную часть города. Всего произошло 750 толчков постепенно убывающей силы. Глубина очагов при этом в общем уменьшалась с 8 до 2 км, хотя в отдельных случаях проявлялись и глубокофокусные толчки [122].

Таким образом, статистические сведения о землетрясениях в сочетании с данными о локальных характеристиках земной коры и скоростях течения глубинных реакций открывают возможность прогнозирования природных катаклизмов.

ВЫВОДЫ

В завершение выделим особенности фазовых и химических превращений, с которыми мы только что познакомимся.

Так, протекание близких к условиям равновесия процессов испарения и конденсации в значительной степени зависит от величины химического потенциала.

В связи с этим принятые методы расчета интенсивности теплообмена должны дополняться вычислениями, основанными на термодинамическом формализме.

Процесс испарения ограничивает температуру реакций сплавов с водой. Изучена термодинамика реакций взаимодействия алюминия, кремния и железа с водой в интервале температур $300 \text{ K} < T < 1000 \text{ K}$. Рассматриваемые реакции имеют крайне высокую вероятность.

Подтверждено положение о том, что реакции, сопровождающиеся образованием газа, идут до конца. Так при взаимодействии алюминия и кремния с водой полнота реакций равна единице. То же значение при низких температурах имеет реакция железа с водой, но с повышением температуры полнота этой реакции снижается до 0,72.

Кинетика взаимодействия сплавов алюминия, кремния и железа с водой исследована при температурах от $0 \text{ }^\circ\text{C}$ до $400 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении до 15,0 МПа.

Сравнение выбранных систем показало, что при равных температурных условиях скорость реакций симбатна изменению значений энергии Гиббса. Но в пределах каждой системы с повышением t значения W возрастают, несмотря на некоторое уменьшение величины $\sum v_i \mu_i$.

Как показывают ранее опубликованные данные, при температурах горения сплавов в кислороде или водяном паре значения скорости реакции следуют за изменением величин энергии Гиббса.

В исследованном интервале температур скорость взаимодействия активированного алюминия с водой примерно на два порядка выше, чем при взаимодействии с водой железоалюмокремниевых сплавов. Очевидно, что высокой активностью обладают сплавы с мелкокристаллической структурой.

Отслоение продуктов реакции является другим существенным фактором, влияющим на кинетику процесса газообразования. Об этом свидетельствует зависимость скорости реакции и теплообмена от гидродинамической обстановки, складывающейся в реакторах высокого давления.

Исследованные реакции могут служить аналогом реакций, протекающих в недрах Земли.

Ограничение скорости подземных реакций возникает на стадии фильтрации воды к зоне контакта со сплавами кремния при одновременном ее испарении, а также на стадии удаления твердых продуктов из зоны реакции.

На отслоение образующихся продуктов реакции (оксидов) существенно влияют: приливные волны, возникающие в земной коре в результате притяжения Луны и Солнца, землетрясения и взрывы на поверхности, а также неравномерное вращение Земли.

В случае если условия развития глубинных реакций приблизятся к тем, что наблюдаются в сосудах высокого давления, то Мировой океан должен исчезнуть с лица Земли в течение 3000 лет.

Более точные значения скорости подземных реакций можно получить лишь при исследовании фильтрующей способности глубинных коллекторов воды, как это было выполнено на Кольской сверхглубокой скважине.

Данные о скорости подземных реакций в конкретных районах земной коры в сочетании со статистическими сведениями о землетрясениях позволяют прогнозировать периоды возникновения переходных процессов в земных недрах.

ГЕОТЕРМИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

В этом разделе нам предстоит познакомиться с проблемой практического освоения потока тепла, поступающего из земных недр. История этой проблемы началась еще в прошлом веке с первых итальянских ГеоТЭС, но до сих пор не получила должного развития.

Как мы увидим, изучая состояние дел, имеются еще важные, нерешенные вопросы. Но дело никак нельзя считать безнадежным.

4.1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОЩНОСТЬ ПОДЗЕМНЫХ ОЧАГОВ ТЕПЛА

Тепловое состояние и тепловая история земных недр определяются совокупным воздействием внутрипланетных и космических процессов.

Внешнее воздействие на тепловой режим Земли оказывают Солнце, звезды и галактики, чью радиацию и различного типа излучения наша планета получает непрерывно. На примере процессов, протекающих в атмосфере и океане, мы смогли убедиться в том, что солнечная радиация воздействует лишь на тонкую оболочку Земли.

Однако с увеличением глубины, как это установлено при проходке шахт и бурении скважин, происходит рост температуры. Последнее обстоятельство свидетельствует о существовании источников энергии внутри Земли.

Крупномасштабное выделение тепла обеспечивают следующие процессы: распад радиоактивных элементов, химические и фазовые превращения, сопровождающиеся возникновением креационно-диссипативных структур, и, наконец, приливные явления.

Радиогенное генерирование тепловой энергии связано главным образом с распадом урана, тория и калия, сосредоточенных в верхних слоях Земли. Общее количество тепла, выделившегося за счет радиоактивного распада, оценивают в пределах $(0,6-2,0) \cdot 10^{31}$ Дж [222].

Примерно $1,2 \cdot 10^{31}$ Дж тепла могло выделиться в недрах Земли в результате химических и фазовых превращений [223].

Тектонические процессы, как мы знаем из предыдущих термодинамических расчетов, преобразуют в механическую энергию, а затем в тепло менее одного процента химической энергии взаимодействующих веществ.

Под воздействием притяжения Солнца и Луны происходит деформация Земли. Высвобождающаяся при этом энергия идет на разогрев планетного материала. Общее количество тепла, выделившегося в результате земных приливов за время существования Земли, составляет примерно 30 % от тепла радиогенного происхождения [78].

Мощность всего теплового потока, идущего из недр планеты, достигает 25 ТВт, что примерно в 8 раз превышает мощность электростанций Мира [10, 12, 78].

Тем не менее этот поток в четыре тысячи раз меньше того, что поступает на Землю от Солнца.

Плотность теплового потока в различных районах планеты неодинакова. Наименьшее ее значение фиксируется в областях развития древних кристаллических щитов; повышенные значения плотности теплового потока регистрируются, как правило, в относительно молодых складчатых районах, с которыми связан современный вулканизм. Для тектонически активных областей плотность достигает величины 0,1 Вт/м². Как уже говорилось, более точные значения теплового потока можно найти на основе оценки скорости химических и фазовых превращений.

Пальму первенства в развитии тектонических процессов необходимо отдать реакциям сплавов кремния с водой, проникающей в глубину сквозь земные разломы.

В самом деле, крайне трудно себе представить, что основная масса радиоактивных веществ сосредоточена именно в зонах тектонических сдвигов. Об этом же свидетельствует низкая радиоактивность магмы, изливающейся во время извержений вулканов.

Ориентируясь на опытные данные, можно сказать, что радиоактивные вещества, распавшись, повышают температуру недр и тем самым способствуют протеканию химических реакций.

Циркулирующая на больших глубинах вода нагревается до значительных температур и может быть выведена на поверхность по буровым скважинам. В вулканических районах термальные воды, поднимающиеся к поверхности по трещинам в земной коре, имеют наиболее высокую температуру. Иногда из гидротермальных источников поступают парожидкостные потоки с температурой 200–300 °С (Паужетское месторождение на Кам-

чатке, Большие Гейзеры в США, Уайракей в Новой Зеландии, Лардерелло в Италии и др.) [82].

Естественная циркуляция потоков выносит к земной поверхности лишь незначительную часть выделяющегося во время реакций тепла. Основная же его масса путем теплопроводности распространяется во всей толще Земли.

Надежду на освоение петротермальных источников многие связывают с проведением подземных термоядерных взрывов. Полагают, что таким способом можно добиться растрескивания горячих сухих горных пород. Затем через множество трещин собираются закачать воду, а образующийся пар отвести к энергоустановкам, расположенным на поверхности [224, 225].

В свете развиваемой здесь теории литосферных процессов реализация термоядерных взрывов приведет к тяжелым последствиям. Вполне возможно, что подземные взрывы интенсифицируют глубинные реакции, что, в конечном счете, будет сопровождаться возникновением горных хребтов. Появление этих сооружений в непредсказуемом месте изменит розу ветров. Дальнейший сценарий нам уже известен: компрессионный эффект затормозит вращение Земли, идвигающийся по инерции океан смочет города Европы, Среднего Востока и Западной Африки. Через многочисленные ущелья Кордильер вода проникнет на низменности Америки и затопит ее населенные пункты. Не поздоровиться и Австралии. Безопасным останется лишь одно место — Антарктида.

Вряд ли такая перспектива говорит в пользу подземных термоядерных взрывов. Единственной альтернативой подземным взрывам является глубинное бурение. При этом предстоит развить способы телескопического бурения, позволяющего объединить в глубине отдельные скважины коллекторами малого сечения. Возможно также стимулирование геотермических скважин с помощью химических взрывов невысокой мощности.

Прокачивая воду через сеть коллекторов с пористыми стенками, удастся снять значительные количества тепла.

В заключение данного раздела оценим энергетический потенциал земных недр. Основными зонами вулканической активности и геотермальных месторождений являются: Тихоокеанский пояс, тянущийся вдоль побережья Тихого океана, группа островов, расположенных в районе Срединно-Атлантического Хребта, рифтовая зона восточной Африки и Среднего Востока, а также пояс горообразования, простирающийся от Средиземноморского бассейна Европы через Азию к Тихому океану (рис. 20). Значительные площади геотермальных месторождений находятся на побережье Мексиканского залива США, в обширных областях Западной Сибири, в северной части Альп, в Карпатах, на Крымском полуострове.

Мы видим, что тектонически активные зоны занимают примерно десять процентов поверхности Земли и, следовательно, можно говорить об освоении в перспективе потока тепла мощностью 2,5–3 ТВт. С учетом КПД подземных генераторов тепла и наземного энергетического оборудования установочная мощность геотермических электростанций может составить 1,0–1,2 ТВт.

Ведется интенсивная разведка перспективных для строительства станций зон на Земле. Так, например, тепловая мощность шести районов Камчатки с активной вулканической деятельностью достаточна для постройки геотермических электростанций мощностью до 365 МВт, а при освоении месторождений до глубины 3 км запасы мощностей возрастают до 400–800 МВт [224, 226].

Рассматриваются аналогичные проекты для Сибири и Дальнего Востока. Здесь выявленные запасы термальных вод составляют 3,35 млн. м³/сутки. Использование этого ресурса позволило бы сэкономить 8,5 млн. т/год ценного топлива [227]. Ряд перспективных проектов предложен для Крыма и Карпат [228].

4.2. АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЦИКЛОВ ГЕОТЕРМИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Вначале проследим за динамикой производства электроэнергии на основе подземного тепла.

В 1972 г. мощность итальянских электростанций в Лардерелло достигала 390 МВт. После создания электростанции “Большие Гейзеры” США стали вырабатывать 300 МВт геотермальной энергии.

В Уайракей (Новая Зеландия) была введена в строй электростанция мощностью 160 МВт.

В Исландии построена геотермическая электростанция мощностью 3,4 МВт. В Японии завершено строительство двух электростанций общей мощностью 40 МВт.

Сооружение электростанции мощностью 5 МВт в районе Паужетки на юге Камчатки началось в 1964 г. и завершилось в 1967 г.

В начале 1973 г. в Серро-Прието в Нижней Калифорнии (Мексика) должна была вступить в строй электростанция мощностью 75 МВт [224]. В тот период энергетика на базе низкопотенциального тепла еще не составляла какой-либо конкуренции традиционной энергетике. Ситуация существенно изменилась спустя двадцать лет (табл. 9, 10). Как видим, значительно выросла мощность электростанций и расширился круг стран, осва-

Таблица 9

Геотермальные электростанции мира

(по данным Survey of Energy resource, World Energy conference, 1993, 578 pp)

Страна	Количество эксплуатируемых месторождений	Эксплуатируемые ГеоТЭС		Строящиеся ГеоТЭС		Общая мощность эксплуатируемых и строящихся ГеоТЭС, МВт	Мощность ГеоТЭС намеренных к строительству, МВт
		Количество единичных блоков	Мощность, МВт	Количество единичных блоков	Мощность, МВт		
США	17	91	2756	10	601,8	3357,8	3331
Филиппины	4	26	1041	-	-	1041	2266
Мексика	2	16	700	15	325	1025	1290
Италия	4	39	548	14	298	846	1400
Новая Зеландия	3	10	260	4	116	376	317
Япония	9	9	215	4	138	353	353
Индонезия	2	3	140	5	223	363	1272
Сальвадор	1	3	95	5	75	170	175
Кения	1	3	45	-	-	45	90
Исландия	3	5	41	1	30	71	71
Никарагуа	1	2	70	-	-	70	180
Турция	1	1	21	1	5	26	130
Китай	11	19	18	5	14	32	32
СССР	1	1	11	1	200	211	-
Франция (Гваделупа)	1	1	4	-	-	4	4

Продолжение табл. 9

Португалия (Азорские о-ва)	1	1	3	-	-	3	13
Греция	1	1	2	1	0,8	2,8	3
Аргентина	1	1	0,6	-	-	0,6	50
Румыния	1	1	0,6	-	-	0,6	1
Замбия	1	1	0,2	-	-	0,2	0,2
Коста-Рика	-	-	-	1	55	55	55
Гватемала	-	-	-	1	15	15	30
Эфиопия	-	-	-	1	3,5	3,5	3,5
Сент-Люсия	-	-	-	1	0,9	0,9	5
Таиланд	-	-	-	1	0,3	0,3	1
Индия	-	-	-	-	1	1	4
Другие страны	-	-	0,6	-	0,5	1,1	160
ВСЕГО	66	234	5972	72	2102	8074,8	11236,7

Использование геотермальных вод с температурой 60–90 °С
(по данным Survey of Energy resource, World Energy conference, 1993, 578 pp)

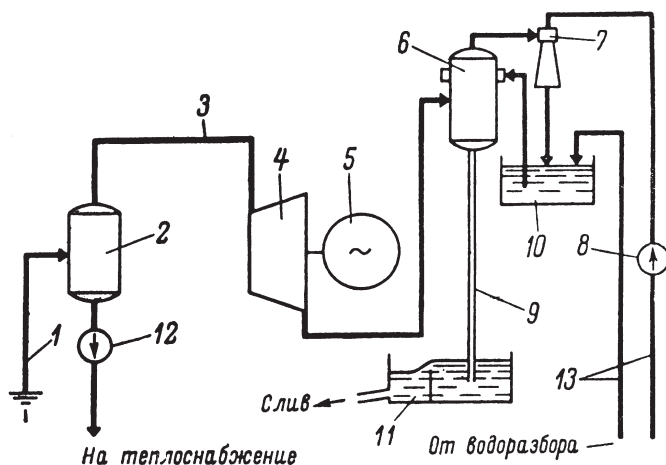
Страна	Теплоснабжение, тепловые насосы, горячее водоснабжение, МВт	Тепличное хозяйство, животноводство, земледелие, МВт	Нефтедобывающая промышленность, МВт	Бальнеология, МВт	Многоцелевое использование, МВт	Всего используется		Годовая экономия энергии, ТНЭ×10 ³
						включая бальнеологию, МВт	исключая бальнеологию, МВт	
1. Болгария	Нет данных	–	–	Нет данных	135	135	–	50
2. Китай								
3. Франция	660	16	–	Нет данных	–	676	–	266
4. Венгрия	75	565	70	581	289	1580	999	630
5. Исландия	945	77	75	209	–	1306	1097	650
6. Италия	131	94	30	76	–	631	55	240
7. Япония	49	50	38	4475	152	4764	289	1675
8. Новая Зеландия	42	2	105	26	1	176	150	111
9. Румыния	30	85	Нет данных	136	22	273	137	95
10. СССР	429	395	220	360	–	1404	1044	640
11. Турция	34	4	–	97	65	200	103	75
12. США	936	129	427	284	–	1776	1492	642
13. Югославия	14	111	–	2	–	127	125	45
14. Другие страны	68	55	4	103	59	289	186	111
ВСЕГО	3546	1729	1060	6674	723	13732	7058	5446

ивающих геотермические месторождения. Тот же темп роста наблюдается и в настоящее время.

ГеоТЭС имеют простое аппаратное оформление, что подтверждает схема на рис. 36. На ней представлена станция, расположенная в долине реки Паужетки на юге Камчатки в районе вулканов Кошелева и Камбального. Пароводяная смесь с теплосодержанием до 840 кДж/кг выводится буровыми скважинами на поверхность и направляется в сепарационные устройства, где при давлении 0,23 МН/м² пар отделяется от воды. Отсепарированный пар поступает в турбины, а горячая вода при температуре 120 °С используется для теплоснабжения населенных пунктов.

Первая очередь Паужетской ГеоТЭС имеет две турбины мощностью по 2,5 МВт. Поверхностные конденсаторы турбин заменены на смешивающие, а паровые эжекторы — на водоструйные. Система технического водоснабжения прямоточная, из реки Паужетки.

На ГеоТЭС нет котельного цеха, топливоподачи, золоулавливателей и многих других устройств, входящих в состав обычных тепловых электростанций. Стоимость энергии на этой станции в несколько раз ниже, чем на местных дизельных электростанциях [229, 230].



1 — скважина; 2 — сепаратор; 3 — паропровод; 4 — турбина; 5 — генератор; 6 — смешивающий конденсатор; 7 — водоструйный эжектор; 8 — эжекторный насос; 9 — барометрическая труба; 10 — бак охлаждающей воды; 11 — сливной колодец; 12 — насос горячей воды; 13 — трубопровод холодной воды.

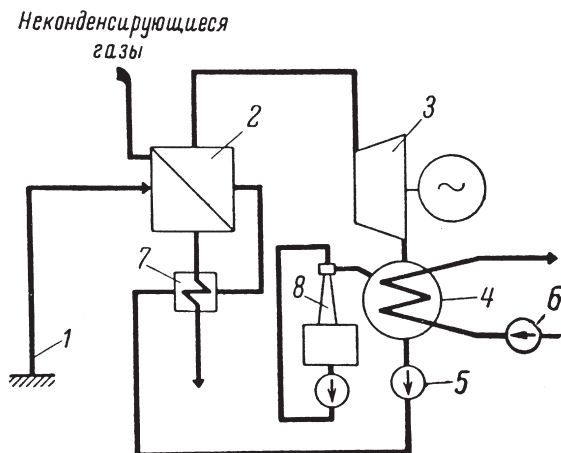
Рис. 36. Схема Паужетской геотермической электростанции

В 1998–1999 гг. в России была построена и введена в эксплуатацию Верхне-Мутновская ГеоТЭС мощностью 12 МВт. На основе результатов работы этой станции планируется создать серию ГеоТЭС на Мутновском гидротермальном месторождении [231].

Несколько электростанций в Италии работают с паропреобразователями, что объясняется высоким содержанием агрессивных по отношению к металлам газов в подземном паре. Среди этих газов имеются: углекислота, сероводород, борная кислота, аммиак.

Кроме защиты от коррозии, на ранней стадии развития геотермальной энергетики непреодолимое препятствие представляло собой удаление неконденсирующихся газов из конденсатора.

Использование природного пара в паропреобразователях, вырабатывающих чистый пар для турбин, удачно решало оба этих затруднения (рис. 37). Работа установки протекает следующим образом.



1 – скважина; 2 – паропреобразователь; 3 – конденсационная турбина; 4 – конденсатор поверхностного типа; 5 – конденсатно-питательный насос; 6 – насос охлаждающей воды; 7 – теплообменник; 8 – эжекторная группа.

Рис. 37. Схема геотермической электростанции с паропреобразователем

Пар из скважины 1 поступает в паропреобразователь 2, где отдает свое тепло вторичному теплоносителю, циркулирующему по замкнутому контуру: турбина — конденсатор — паропреобразователь — турбина. Подземный пар в паропреобразователе конденсируется, а неконденсирующиеся газы с избыточным давлением выбрасываются в атмосферу или

направляются на использование в химическое производство. Чистый вторичный пар, расширяясь, вращает турбину 3 и затем перетекает в конденсатор 4. Конденсат из аппарата 4 забирается насосом 5 и подается в паропреобразователь 2 через теплообменник 7. В теплообменнике 7 конденсат турбины подогревается за счет охлаждения конденсата подземного пара. Для удаления воздуха, проникшего в конденсационное устройство через неплотности, установлен водоструйный эжектор 8 [229].

Дальнейшее совершенствование ГеоТЭС идет по пути создания бинарных циклов и использования коррозионно-стойких материалов. Объясняется такой подход тем обстоятельством, что значительная доля из разведанных геотермальных ресурсов приходится на низкотемпературные источники, где температура воды не превышает 80–100 °С. При этом предполагается применение двухконтурных схем с использованием фреона в качестве рабочего тела.

Использование гидропарового цикла вместо фреонового не только исключит термодинамические потери, связанные с двухконтурной схемой, но также позволит отказаться от всех видов теплообменных аппаратов. Это обстоятельство может приобрести решающее значение, так как в условиях малых температурных перепадов поверхность теплообменников, отнесенная к полезной мощности, резко возрастает и составляет основную долю необходимых капиталовложений [232].

Анализ предельных циклов энергоустановок с паровыми и гидропаровыми турбинами показал, что выработка электроэнергии в последнем случае в 2,4 раза выше, чем в первом [10].

Крайне важно отметить, что Калужский турбинный завод и НПВП “Турбоконт” приступили к освоению гидропаровых турбин [228].

4.3. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗЕМНЫХ НЕДР

Для эксплуатации конкретных ГеоТЭС необходимо создать развитую систему скважин, трубопроводов, линий электропередач, дорог. Бурение скважин связано с завозом и хранением дизельного топлива, масел, запасных частей. Несомненно, что весь комплекс перечисленных работ должен выполняться с соблюдением установленных законодательством экологических требований.

Как уже говорилось, подземные воды выносят на поверхность Земли сероводород, аммиак, соединения ртути и другие вещества, неблагоприятно воздействующие на окружающую среду.

Для каждого гидротермального месторождения следует создавать свою систему утилизации или нейтрализации вредных веществ.

Возможно, что интенсификация естественной циркуляции потоков в районе действия ГеоТЭС повлечет за собой увеличение скорости подземных реакций, что будет сопровождаться землетрясениями. В таком случае необходимо строить сейсмостойкие здания и буровые вышки.

Выполнение требований защиты окружающей среды и техники безопасности обслуживающего персонала повлечет за собой удорожание вырабатываемой электроэнергии. Но, как правило, это повышение стоимости не столь существенное, если сравнивать его с тем, что имеет место у угольных ТЭС.

Обратим здесь внимание еще на одну проблему, связанную с эксплуатацией ГеоТЭС. Подземные коллекторы скважин будут постепенно закупориваться породой и отложениями. Данное явление вызвано, с одной стороны, наличием солей в подземных водах, а с другой — выдавливанием верхних слоев Земли твердыми продуктами подземных реакций. При оценке усилий, развивающихся в подземных условиях, мы можем воспользоваться богатым опытом, полученным в шахтном строительстве [233–235].

В любом случае предполагается профилактическое бурение для восстановления дееспособности геотермических источников.

ВЫВОДЫ

Освоение второго по значению источника энергии — тепла земных недр позволит получить от 1,0 до 1,2 ТВт электроэнергии.

Динамика развития геотермических станций свидетельствует о заинтересованности большинства стран в освоении подземной энергии.

Наиболее перспективным способом освоения геотермических месторождений является глубинное бурение.

Оптимальным тепловым двигателем для ГеоТЭС является гидропаровая турбина.

Поскольку ГеоТЭС располагаются, как правило, в районах активной вулканической деятельности, то здания, буровые вышки и оборудование должны соответствовать нормам, установленным для сейсмических районов.

ПОСЛЕСЛОВИЕ КО ВТОРОЙ ЧАСТИ КНИГИ

Здесь, как и в первой части книги, мы обсудим те мероприятия, что необходимо провести для освоения возобновляемых источников энергии.

Итак, рассмотрев наиболее вероятные космические процессы и переходные явления в период формирования Земли, мы составили представление о том, как сложена наша Земля и что происходит в ее недрах.

Не вызывает сомнения то, что ключ к расшифровке подземных процессов может быть найден лишь при вскрытии закономерностей естественной циркуляции потоков на больших глубинах. Именно естественная циркуляция воды в подземных условиях, сопровождающаяся ее частичным взаимодействием с кремниевыми сплавами, позволила Мировому океану поделиться своим водородом с месторождениями нефти и газа. Как видим, помимо освоения потоков тепла, необходимо заняться в ближайшее время освоением потоков водорода и метана, идущих из земных недр.

В рамках тематики данной книги невозможно подробно остановиться на столь обширной и захватывающей проблеме. Но все же позволим себе кратко сообщить о работах, проведенных в этом направлении.

Одним из вариантов образования нефти могли стать процессы высокотемпературного воздействия под высоким давлением на органический субстрат, возникший в результате жизнедеятельности водородокисляющих бактерий, о которых шла речь в первой части книги.

В качестве первого шага проверки данного предположения были проведены опыты по выращиванию бактерий на основе водорода, получаемого при взаимодействии активированного алюминия и кремниевых сплавов с водой.

Оказалось, что микробы прекрасно развиваются, потребляя водород от первой реакции, и несколько снижают скорость своего размножения во втором случае. В этом нет ничего удивительного, так как бактерии крайне чувствительны к различным примесям в водном растворе. Так, например, недостаток всего одной миллионной доли германия в составе используемых питательных веществ прекращает рост этих бактерий.

Можно также восхищаться производительностью процесса выращивания белка: масса бактерий в благоприятных условиях удваивается каждые четыре часа. Для сравнения скажем, что деревья в средней полосе нашей родины увеличивают свою массу в четыре раза в течение целого года. Так что создать месторождения с миллиардами тонн нефти бактериям не представляло никакого труда.

Для реализации программы освоения потоков водорода необходимо, прежде всего, вернуться к ранее предложенному проекту бурения земной коры в Тункинской впадине, примыкающей к котловине озера Байкал. Здесь на глубинах всего в шесть—восемь километров зафиксирована аномально высокая электропроводность земной коры. Предполагают, что это дают о себе знать поднявшиеся из земных недр бескислородные вещества, насыщенные водородом [236].

Необходимо также изучить поведение ряда вулканов и найти способ утилизации выбрасываемого ими водорода. Те же исследования позволяют, по-видимому, оценить мощность потока метана, поднимающегося из земных недр.

Сверхглубокое бурение, которое, как и космические программы, можно осуществить, объединив усилия наиболее развитых стран, откроет нам картину подземного мира и даст возможность более точно рассчитывать локальные потоки глубинного тепла. Одновременно удастся оценить величины напряжений и сжатий земной коры в зонах рифтогенеза, что необходимо для понимания закономерностей землетрясений.

Память о безвременно ушедших от нас многочисленных жертвах землетрясений настоятельно требует изучения механизма этого крайне разрушительного природного явления. Нам предстоит научиться не только предвидеть их возникновение, но и, по возможности, управлять ими. В преддверии этого следует принять международное соглашение об ограничении числа взрывов малой и средней мощности и полном запрещении ядерных и термоядерных испытаний. Сейчас нет никакой гарантии в том, что на месте очередного термоядерного взрыва не появится гряда гор высотой в десятки километров, на формирование которой будет израсходована большая часть воды Мирового океана.

Здесь еще раз хотелось бы обратить внимание на необходимость повышения знаний научной интеллигенции в области тепловых процессов. Это позволит найти решение многих проблем.

Например, при составлении моделей космических процессов на основе термодинамики исчезнут из обихода всевозможные фантастические проекты.

Как известно, в одной из формулировок второго закона термодинамики, предложенной Томпсоном, предлагалось рассматривать закон возрастания энтропии как закон рассеяния лучистой энергии.

Согласно этой формулировке, теплота нагретых тел рассеивается в мировом пространстве и не может существовать процессов, в результате которых она в состоянии сосредоточиться в каком-либо месте и начать активно функционировать [237].

Во всяком случае, нам до сих пор не известны условия, приводящие к эффекту концентрации лучистой энергии. Отсюда следует, что рост энтропии Вселенной есть непреложный факт. В связи с этим еще раз хотелось бы подчеркнуть, что при составлении моделей космических процессов нельзя отклоняться от законов термодинамики. В равной мере это относится к процессу формирования планет и, в частности, Земли. Определяющую роль при формировании планет играют креационно-диссипативные структуры, обеспечивающие перераспределение энергии в их оболочках.

Всестороннее овладение методами термодинамики позволит инженерам создать высокоэкономичные установки для использования низкопотенциального тепла.

Земля — наш родной дом, но, к сожалению, не такой большой, как хотелось бы: международная космическая станция облетает его всего за один час. Наивно думать, что столь малая планета обладает несметными запасами угля, нефти и газа. Скорее всего, эти запасы закончатся задолго до того, как наступит катастрофическое потепление, которым так обеспокоено большинство стран.

Выход из создавшегося положения один — нам необходимо научиться использовать возобновляемые источники энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амбарцумян В.А. Научные труды. В 2-х т. — Ереван: Изд. АН Армянской ССР, 1950. — Т.2. — 362 с.
2. Баранов В.И. Возраст и эволюция земного вещества. — М.: Наука, 1971. — 20 с.
3. Виноградов А.П. Происхождение оболочек Земли // Вестн. АН СССР, 1962. — № 9. — С. 16–29.
4. Хокинг С. От большого взрыва до черных дыр. — М.: Мир, 1990. — 168 с.
5. Паннекук А. История астрономии. — М.: Наука, 1966. — 592 с.
6. Воронцов-Вельяминов Б.А. Лаплас. — М.: Наука, 1985. — 288 с.
7. Альфвен Х., Аррениус Г. Структура и эволюционная история Солнечной системы. — К.: Наук. думка, 1981. — 332 с.
8. Новиков И.Д. Эволюция Вселенной. — М.: Наука, 1990. — 192 с.
9. Гуревич Л.Э., Чернин А.Д. Происхождение галактик и звезд. — М.: Наука, 1988. — 190 с.
10. Трошеникин Б.А. Возобновляемая энергия. В 2-х частях. — Ч.1. — Термодинамика атмосферы и океана. Океанические электростанции. — Харьков: Форт, 2003. — 104 с. (www.library.ulstu.ru/news/bulet/03_2004.doc, www.iitd.ernet.in/acad/library/services/recent/july04.html).
11. Физический энциклопедический справочник: В 5-ти т. — М.: Сов. энцикл., 1960–1966. — Т.1. — С. 367–370; Т.4. — С. 569–578; Т.5. — С. 262–264;
12. Большая советская энциклопедия: В 30-ти т. — М.: Сов. энцикл., 1970–1978. — Т.6. — С. 51–54, С. 323; Т.24. — С. 150–154.
13. Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. Курс общей астрономии. — М.: Наука, 1974. — 512 с.
14. Агемян Т.А. Звезды, галактики, Метагалактики. — М.: Наука, 1982. — 416 с.
15. Горбачкий В.Г. Введение в физику галактик и скоплений галактик. — М.: Наука, 1986. — 256 с.
16. Стратонов В.В. Солнце. Астрономическая популярная монография. — Тифлис: Изд. “Либерман и К^о”, 1910. — 248 с.
17. Вальдмайер М. Результаты и проблемы исследования Солнца. — М.: Иностр. лит., 1950. — 240 с.
18. Франк-Каменецкий Д.А. Физические процессы внутри звезд. — М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1959. — 544 с.
19. Шварцфильд М. Строение и эволюция звезд. — М.: Иностр. лит., 1961. — 192 с.

20. Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. Структура и эволюция Вселенной. — М.: Наука, 1975. — 736 с.
21. Тейлер Р. Структура и эволюция звезд. — М.: Мир, 1973. — 280 с.
22. Голицын Г.С. Введение в динамику планетных атмосфер. — Л.: Гидрометеоздат, 1973. — 104 с.
23. Открытие. Диплом № 274 (СССР). Свойство Солнца пульсировать / В.А. Котов, А.Б. Северный, Т.Т. Цап. — Опул. в Бюлл. откp. и изобр., 1963. — № 48. — С. 3.
24. Котов В.А., Северный А.Б., Цап Т.Т. Исследование глобальных колебаний Солнца // Изв. Крымской астрофизической обсерватории, 1983. — Т. 66. — С. 3.
25. Шкловский И.С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть. — М.: Наука, 1984. — 384 с.
26. Физика космоса: Маленькая энциклопедия. — М.: Сов. энциклопедия, 1986. — 783 с.
27. Вейль Г. Симметрия. — М.: Наука, 1968. — 192 с.
28. Вигнер Е. Этюды о симметрии. — М.: Мир, 1971. — 320 с.
29. Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. Основы кристаллофизики. — М.: Наука, 1979. — 640 с.
30. Желудев И.С. Симметрия и ее приложение. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 304 с.
31. Эллиот Дж., Добер П. Симметрия в физике. В 2-х т. — М.: Мир, 1983. — Т.1. — 366 с.; Т.2. — 412 с.
32. Астрофизика, кванты и теория относительности. — М.: Мир, 1982. — 560 с.
33. Харгиттаи Н., Харгиттаи М. Симметрия глазами химика. — М.: Мир, 1989. — 496 с.
34. Функциональные материалы для науки и техники. — Харьков: Институт монокристаллов, 2001. — 624 с.
35. Бейдер Р. Атомы в молекулах. — М.: Мир, 2001. — 534 с.
36. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. — М.: Мир, 1973. — 280 с.
37. Карери Дж. Порядок и беспорядок в структуре материи. — М.: Мир, 1985. — 230 с.
38. Климонтович Ю.Л. Турбулентное движение и структура хаоса. — М.: Наука, 1990. — 320 с.
39. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика от тепловых двигателей до диссипативных структур. — М.: Мир, 2002. — 462 с.
40. Альбом течений жидкости и газа / Сост. М. Ван-Дайк. — М.: Мир, 1986. — 184 с.

41. Дикерсон Р., Грей Г., Хейт Дж. Основные законы химии. В 2-х т. — М.: Мир, 1982. — Т.1. — 652 с; Т.2. — 620 с.

42. Ерофеев Б.А. Обобщенное уравнение химической кинетики и его применение к реакциям с участием твердых веществ. — Докл. АН СССР, 1946. — 12. — № 6. — С. 515–518.

43. Лепинь Л.К., Тетере А., Шмидт А. О взаимодействии алюминия с водой. — Докл. АН СССР, 1953. — 88. — № 5. — С. 871–874.

44. Трошенькин Б.А., Долгих Т.Н. Термодинамика и кинетика взаимодействия сплавов алюминия с водой. — Вопр. атом. науки и техники. Сер. Атомно-водород. энергетика, 1982. — Вып. 3. — С. 51–52.

45. Вилля Г. Теория вихрей. — Л. — М.: ОНТИ НКТП, 1936. — 200 с.

46. Современная гидродинамика. — М.: Мир, 1984. — 502 с.

47. История механики. — М.: Наука, 1972. — 414 с.

48. Taylor G.I. Diffusion by continuous movements. — Proc. Lond. Math. Soc., 1921. — V. 20. — P. 196.

49. Колмогоров А.Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой жидкости при очень больших числах Рейнольдса. — Докл. АН СССР, 1941. — Т.30. — С. 299–303.

50. Трошенькин Б.А. Циркуляционные и пленочные испарители и водородные реакторы. — Киев: Наук. думка, 1984. — 174 с. (www.eugene980.narod.ru/lit.htm)

51. А.с. 4356625 (СССР). Пленочный выпарной аппарат / Б.А. Трошенькин, Ю.Н. Пискунов, В.Г. Пономаренко и др. — Оpubл. в Б.И., 1974, № 133.

52. Пат. 367132 Швеция, МКИ в01 d1/22. Пленочный выпарной аппарат / Б.А. Трошенькин, Г.И. Соловьева, Ю.Н. Пискунов и др. (СССР). — Оpubл. 29.08.74.

53. Пат. 3880702 США, МКИ в01 d1/22. Пленочный выпарной аппарат / Б.А. Трошенькин, Г.И. Соловьева, Ю.Н. Пискунов и др. (СССР). — Оpubл. 29.04.75.

54. Пат. 1415441 Англия, МКИ в01 d1/22. Пленочный выпарной аппарат / Б.А. Трошенькин, Г.И. Соловьева, Ю.Н. Пискунов и др. (СССР). — Оpubл. 26.11.75.

55. Пат. 994227 Канада, МКИ в01 d1/22. Пленочный выпарной аппарат / Б.А. Трошенькин, Г.И. Соловьева, Ю.Н. Пискунов и др. (СССР). — Оpubл. 03.08.76.

56. Пат. 7326211 Франция, МКИ в01 d1/22. Пленочный выпарной аппарат / Б.А. Трошенькин, Г.И. Соловьева, Ю.Н. Пискунов и др. (СССР). — Оpubл. 09.09.77.

57. Пат. 54232 Финляндия, МКИ в01 d1/22. Пленочный выпарной аппарат / Б.А. Трошенькин, Г.И. Соловьева, Ю.Н. Пискунов и др. (СССР). — Оpubл. 31.07.78.

58. Пат. 2333885 ФРГ, МКИ в 01 d1/22. Пленочный выпарной аппарат / Б.А. Трошенькин, Г.И. Соловьева, Ю.Н. Пискунов и др. (СССР). — Оpubл. 18.01.79.

59. Пат. 12282 Япония, МКИ в 01 d1/22. Пленочный выпарной аппарат / Б.А. Трошенькин, Г.И. Соловьева, Ю.Н. Пискунов и др. (СССР). — Оpubл. 21.10.80.

60. А.с. 324038 (СССР). Распределительное устройство / Б.А. Трошенькин. — Оpubл. в Б.И., 1972, № 35.

61. А.с. 636003 (СССР). МКИ в 01 d1/22. Пленочный выпарной аппарат / Б.А. Трошенькин, Г.И. Соловьева. — Оpubл. в Б.И., 1978, № 45.

62. А.с. 247248 (СССР). Пневматический пульсатор / С.М. Корпачева, В.М. Муратов, Л.С. Рачинский и др. — Оpubл. в Б.И., 1970, № 35.

63. Голубенцов А.А. Термодинамика процессов производства. — Киев: Техніка, 1969. — 160 с.

64. Трошенькин Б.А., Золотов Г.Л. Выбор аппаратов для выпаривания содо-поташных растворов. — М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1969. — Информ. листок. — Сер. ХМ-1, № 9. — 4 с.

65. Чирва В.И., Головченко О.А. Исследование гидравлического контура выпарного аппарата // Хим. технология, 1973. — Вып. 2. — С. 32–33.

66. Математическая энциклопедия: В 5-ти т. — М.: Сов. энцикл., 1977–1985. — Т.2. — С. 466.

67. Бутусов К.П. Золотое сечение в Солнечной системе. // Сб. “Астрометрия и небесная механика”. — М.-Л., 1978. — С. 475–500.

68. Зигель Ф.Ю. Астрономическая мозаика. — М.: Наука, 1987. — 176 с.

69. Идлис Г.М. Революции в астрономии, физике и космологии. — М.: Наука, 1985. — 232 с.

70. Кембел Дж. Современная общая химия. В 3-х т. — М.: Мир, 1975. — Т.1. — 552 с.

71. Риман Б. Сочинения. — М., Л.: Гос. издат. технико-теорет. лит., 1948. — 279 с.

72. Математика в современном мире. — М.: Мир, 1967. — 206 с.

73. Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения. — М., Л.: Гос. издат. технико-теорет. лит., 1950. — 472 с.

74. Четаев Н.Г. Устойчивость движения. — М.: Наука, 1990. — 176 с.

75. Лангвайлер Х. К вопросу о максимальных скоростях пули, достижимых с помощью порохов вышибного заряда // Zeitschrift für technische Physik, 1938. — 11. — S. 416–421.

76. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях / Под ред. Н.А. Златина, Г.И. Мишина. — М.: Наука, 1974. — 344 с.

77. Штернфельд А.А. Парадоксы космонавтики. — М.: Наука, 1991. — 160 с.

78. Ботт М. Внутреннее строение Земли. — М.: Мир, 1974. — 374 с.

79. Болт Б. В глубинах Земли. — М.: Мир, 1984. — 189 с.

80. Хэллем Э. Великие геологические споры. — М.: Мир, 1985. — 216 с.

81. Холенд Х. Химическая эволюция океанов и атмосферы. — М.: Мир, 1989. — 552 с.

82. Горная энциклопедия: В 5-ти т. — М.: Сов. энциклопедия, 1984–1991. — Т.1. — С. 452–454; Т.2. — С. 371–386; Т.5. — С. 133–134.

83. Физическая энциклопедия: В 3-х т. — М.: Сов. энциклопедия, 1989–1991. — Т.2. — С. 78–80.

84. Фурмарье П. Проблема дрейфа континентов. — М.: Недра, 1971. — С. 83.

85. Шолпо В.Н. Структура Земли: упорядоченность или беспорядок? — М.: Наука, 1986. — 160 с.

86. Трошенькин В.Б. Совершенствование процесса и реактора по производству водорода из воды при помощи сплавов, получаемых из неорганической части углей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Харьков: Харьковский гос. политехн. ун-т., 1999. — 16 с.

87. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание в 4-х т. — М.: Наука, 1978. — Т.1. — Кн. 2. — 328 с.; Т.2. — Кн. 2. — 344 с.; Т.3. — Кн. 2. — 400 с.; Т.4. — Кн. 2. — 560 с.

88. Маров М.Я. Планеты Солнечной системы. — М.: Наука, 1981. — 256 с.

89. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. — М.: Наука, 1983. — 416 с.

90. Физико-химические свойства окислов. Справочник. — М.: Металлургия, 1978. — 472 с.

91. Пеликан А. Плавленые камни. — М.: Металлургиздат, 1959. — 288 с.

92. Ершов Г.С., Черняков В.А. Строение и свойства жидких и твердых металлов: — М.: Металлургия, 1978. — 248 с.

93. Беляев А.Н., Раппопорт М.Б., Фирсанова Л.А. Электрометаллургия алюминия. — М.: Metallurgizdat, 1953. — 720 с.
94. Справочник металлурга по цветным металлам. — М.: Metallurgiya, 1971. — 560 с.
95. Тугаринов А.И. Общая геохимия. — М.: Атомиздат, 1973. — 288 с.
96. Мархинин Е.К. Вулканы и жизнь. — М.: Мысль, 1980. — 198 с.
97. Вернадский В.И., Курбатов С.М. Земные силикаты, алюмосиликаты и их аналоги. — Л., М.: ОНТИ НКТП, Главная редакция геолого-разведочной и геодезической лит., 1937. — 376 с.
98. Друянов В.А. Загадочная биография Земли. — М.: Недра, 1989. — 160 с.
99. Докембрий Канады, Гренландии, Британских островов и Шпицбергена. — М.: Мир, 1968. — 384 с.
100. Энергетическое топливо СССР. Справочник. — М.: Энергия, 1979. — 128 с.
101. Шпирт М.Я., Клер В.Р., Перциков И.З. Неорганические компоненты твердых топлив. — М.: Химия, 1990. — 240 с.
102. Справочник по содержанию малых элементов в товарной продукции угледобывающих и углеобогачительных предприятий Донецкого бассейна. — Днепропетровск: Украинский гос. ин-т минеральных ресурсов ДО, 1994. — 188 с.
103. Литвиненко А.И., Громов В.А., Янко С.В., Кабанов А.И., Трошенькин Б.А. Требования к углеотходам, применяемым для выплавки ферросиликоалюминия // *Металлургия*. Тр. Запорожской гос. инженерной академии, 2003. — Вып. 7. — С. 38–40.
104. Литвиненко О.І., Громов В.А., Янко С.В., Чуприна Е.С., Трошенькин Б.А. Виплавлення ферросілікоалюмінію з відходів збагачення вугілля // *Металлургия*. Тр. Запорожской гос. инженерной академии, 2004. — Вып. 10. — С. 33–37.
105. Байсанов С.О., Толымбеков М.Ж., Такенов Т.Д. и др. Освоение технологии электротермической выплавки ферросиликоалюминия из углеотходов в ОАО “Испат-Кармет” // *Сталь*. — 2000. — № 7. — С. 28–30.
106. Байсанов С.О., Толымбеков М.Ж., Ахметов А.Б. и др. Получение ферросиликоалюминия из высокозольных углистых пород // *Современные проблемы металлургии (Научные труды Ин-та черн. металлургии)*. — Днепропетровск: ИЧМ НАН Украины, 2001. — Т. 2. — С. 248–251.
107. Захаров М.В., Захаров А.М. Жаропрочные сплавы. — М.: Металлургия, 1972. — 384 с.

108. Исследование при высоких температурах. — М.: Иностранная литература, 1962. — 480 с.
109. Куликов И.С. Термодинамика карбидов и нитридов. Справочник. — Челябинск: Металлургия, 1988. — 320 с.
110. Петров В.П. Магма и генезис магматических пород. — М.: Недра, 1972. — 136 с.
111. Вопросы атомной науки и техники. — Харьков: Научный центр «Харьковский физико-технический институт», 1999. — 140 с.
112. Краткий справочник по геохимии. — М.: Недра, 1977. — 184 с.
113. Химия и технология редких и рассеянных элементов. В 3-х ч.: — М.: Высшая школа, 1976. — Ч.1. — 368 с.; Ч.2. — 360 с.; Ч.3. — 320 с.
114. Козин Л.В., Волков С.В. Химия и технология высокочистых металлов и металлоидов. В 2-х т. — Киев: Наук. думка, 2002. — Т.1. — 542 с.; Т.2. — 352 с.
115. Кольская сверхглубокая. — М.: Недра, 1984. — 490 с.
116. Кремний. Сборник статей. — М.: Иностранная литература, 1960. — 436 с.
117. Гольд П.В., Рябов Р.А. Водород в металлах и сплавах. — М.: Металлургия, 1974. — 272 с.
118. Гидриды переходных металлов. — М.: Мир, 1975. — 312 с.
119. Газы и окислы в алюминиевых сплавах. — М.: Металлургия, 1975. — 264 с.
120. Константы взаимодействия металлов с газами. Справочник. — М.: Металлургия, 1987. — 368 с.
121. Бастеев А.В., Оболенский М.А., Соловей В.В. Активация водорода и водородсодержащих энергоносителей. — Киев: Наук. думка, 1993. — 164 с.
122. Дерпгольц В.Ф. Вода во Вселенной. — Л.: Недра, 1971. — 224 с.
123. Гаррелс Р.М. Круговорот углерода, кислорода и серы в течение геологического времени. — М.: Наука, 1975. — 48 с.
124. Латимер В.М. Окислительные состояния элементов и их потенциалы в водных растворах. — М.: Иностранная литература, 1954. — 400 с.
125. Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия. — М.: Мир, 1968. — 368 с.
126. Геология и геохимия рудных месторождений. — М.: Мир, 1971. — 272 с.
127. Кириллин В.А., Шейндлин А.Е., Шпильрайн Э.Э. Термодинамика растворов. — М.: Энергия, 1980. — 288 с.
128. Некрасов Б.В. Основы общей химии. В 2-х т. — М.: Химия, 1974. — Т.1. — 656 с.; Т.2. — 688 с.

129. Nusselt W. Die Oberflächenkondensation der Wasserdampfes – Z. Ver. Dtsch. Ing., 1916, 60, № 27, S. 541–546; № 28, S. 569–573.
130. Тен-Бош. Теплопередача. – М.: Нефт. изд-во, 1930. – 220 с.
131. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973. – 320 с.
132. Аппараты выпарные трубчатые вертикального общего назначения. Каталог-справочник. – М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1965. – 52 с.
133. Трошенькин Б.А., Герасименко А.В. Интенсификация процесса выпаривания черного сульфатного щелока в восходящей пленке. – В кн.: Химическое машиностроение. К.: Техніка, 1969. – С. 72–74.
134. Редукционно-охладительные установки. Каталог-справочник. – М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1964. – 14 с.
135. Ильин А.К., Скачков А.М. Впрыскивающие пароохладители в судовых установках. – Л.: Судостроение, 1968. – 112 с.
136. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. – 418 с.
137. Исаченко В.П., Саломзода Ф., Шалахов А.А. Исследование теплообмена при капельной конденсации водяного пара в вертикальной трубе // Теплоэнергетика, – 1980. – № 4. – С. 13–16.
138. Ястржембский А.С. Техническая термодинамика. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 495 с.
139. Гухман А.А. Об основаниях термодинамики. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 384 с.
140. РТМ 26-01-71–75. Испарители со стекающей пленкой: Методика теплового и гидромех. расчета / Б.А. Трошенькин. – М.: Минхиммаш, 1975. – 58 с.
141. Трошенькин Б.А. РТМ 26-01-71–75. Испарители со стекающей пленкой: Методика теплового и гидромех. расчета. – Хим. и нефтеперерабатывающее машиностроение, 1975. – № 5. – С. 4–5.
142. Дж. В. Гиббс. Термодинамические работы. – М.; Л.: Госиздат. технико-теорет. лит., 1950. – 492 с.
143. Льюис и Рендалл. Химическая термодинамика. – Л.: ОНТИ ХИМТЕОРЕТ, 1936. – 532 с.
144. Summary analysis of the questionnaire on the use of hydrogen for meteorological purposes. СИМО-VIII/Doc. 33, Appendix, 1982. – 12 p.
145. Kostron H. Aluminium und Gas // Z. Metallk., 1952. – 43. – № 8. – S. 269–284.
146. Журавлев В.А., Захаров А.П. Окисление алюминия в воде при различных температурах // Докл. АН СССР, 1980. – Т. 252. – № 5. – С. 1162–1166.

147. А.с. 535364 СССР, МКл С22, С21/00. Сплав на основе алюминия для получения водорода / Сокольский Д.В., Козин Л.Ф., Бармин В.П. и др. — Оpubл. в Б.И., 1976, № 42.

148. Трошенькин Б.А. Теплообмен при выделении водорода в реакциях алюмокремниевых сплавов с водой // Теплообмен ММФ-92: Тр. Минского междунар. форума по теплообмену (Минск, 1992) Минск: АНК ИТМО АНБ, Т.3. — С. 89—92.

149. Трошенькин Б.А., Трошенькин В.Б. Теплообмен при выделении водорода в реакциях аморфно-кристаллических сплавов с водой // Инж.-физ. журн. — 1996. — Т.69. — № 6. — С. 1006—1008.

150. Соколов Е.А., Зингер А.М. Струйные аппараты. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 351 с.

151. Пороло Л.В. Воздушно-газовые подъемники жидкости (эргазлифты). — М.: Машиностроение, 1969. — 160 с.

152. Акопян Б.А. Разработка методики расчета режимов работы периодического газлифта: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: Моск. ин-т нефти и газа, 1989. — 24 с.

153. Кумотос, Мойсис, Спиридонос. Исследование отрыва пузырьков в кипящей жидкости при вынужденной конвекции // Теплопередача, 1968. — 80. — № 2. — С. 44—52.

154. Идельчик И.Е. Некоторые интересные эффекты и парадоксы в аэродинамике и гидравлике. — М.: Машиностроение, 1982. — 96 с.

155. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. — Новосибирск: Наука, 1970. — 660 с.

156. Трошенькин В.Б. Теплообмен при взаимодействии активированного алюминия с водой. — Сб. научн. тр.: Вестник Харьк. политехн. ун-та, 1999. — Вып. 49. — С. 14—18.

157. Лыков А.В. Теория сушки. — М.: Энергия, 1968. — 472 с.

158. Трошенькин В.Б. Метод расчета реакторов для производства водорода из воды с помощью сплавов кремния и алюминия // Экология химической техники и биотехнологии. Юбил. сб. тр. каф. хим. технологии и пром. экологии. — Сб. науч. тр. Харьк. политехн. ун-та, 1996. — Т.1. — С. 107—111.

159. Эйринг Г., Лин С.Г., Лин С.М. Основы химической кинетики / Пер. с англ. Е.Л. Розенберга под ред. А.М. Бродского. — М.: Мир, 1983. — 528 с.

160. Трошенькин Б.А., Трошенькин В.Б. Теплообмен при выделении водорода в реакции активированного алюминия с водой // Теплообмен ММФ-2000: Тр. Минского междунар. форума по теплообмену

(Минск, 2000) Минск: АНК ИТМО АНБ, Т.4. — С.246–254. ([www.relay.itmo.by/jepter/mif4/volume 4/246.pdf](http://www.relay.itmo.by/jepter/mif4/volume%204/246.pdf)).

161. Avrami M. Kinetics of Phase Change // J. Chem. Phys. — 1939. — 7. № 12. — P. 1103–1112.

162. Mampel K.L. Zeitumsatzformeln für heterogene Reaktionen an Phasengrenzen fester Körper // Z. Phys. Chem. — 1940. — 187. — 4. — S. 235–249.

163. Prout E.G., Tompkins F.G. The thermal decomposition of potassium permanganate // Trans. Faraday Soc. — 1944. — 40. — № 274. — P. 488–498.

164. Болдырев В.В. Влияние дефектов в кристаллах на скорость термического разложения твердых веществ. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1963. — 246 с.

165. Янг Д. Кинетика разложения твердых веществ. — М.: Мир, 1969. — 264 с.

166. Дельмон Б. Кинетика гетерогенных реакций. — М.: Мир, 1972. — 556 с.

167. Барре П. Кинетика гетерогенных процессов. — М.: Мир, 1976. — 400 с.

168. Розовский А.Я. Гетерогенные химические реакции. — М.: Наука, 1980. — 324 с.

169. Браун М., Доллимор Д., Галвей А. Реакции твердых тел. — М.: Мир, 1983. — 360 с.

170. Бретшнайдер С., Кавецкий В., Лейко Я. и др. Общие основы химической технологии. — Л.: Химия, 1977. — 504 с.

171. А.с. 1108773 (СССР). Сплав на основе алюминия для получения водорода / Л.Ф. Козин, В.А. Сахаренко, Б.А. Трошенькин. — Оpubл. в Б.И., 1984, № 30.

172. Козин Л.Ф., Волков С.В. Водородная энергетика и экология. — К.: Наук. думка, 2002. — 336 с.

173. Лебедев В.В. Физико-химические основы процессов получения водорода из воды. — М.: Наука, 1969. — 135 с.

174. Бенсон С. Термохимическая кинетика. — М.: Мир, 1971. — 308 с.

175. Дзисько В.А., Карнаухова А.П., Тарасова Д.В. Физико-химические основы синтеза окисных катализаторов. — Новосибирск: Наука, 1978. — 384 с.

176. Torkar K., Krischner H. Untersuchungen über Aluminium – hydroxide und oxide. Das Zustands – diagram Al_2O_3/H_2O // Monatshefte Chem., — 1960. — 91, — № 4. — S. 764–773.

177. Абрамов В.Я., Стельмахова Г.Д., Николаев И.В. Физико-химические основы комплексной переработки алюминиевого сырья (щелочные способы). — М.: Металлургия, 1985. — 288 с.

178. Структура и коррозия металлов и сплавов: Атлас. Справ. изд. / Сокол И.Я., Ульянин Е.А., Фельдгандлер Э.Г. — М.: Металлургия, 1989. — 400 с.

179. Справочник по элементарной химии / Под общ. ред. А. Т. Пилипенко. — Киев: Наук. думка, 1978. — 544 с.

180. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. — Л.: Химия, 1970. — 624 с.

181. Трошенькин В.Б. Исследование процесса получения водорода в газогенераторе АВГ-45 / Теплообмен в химико-технологических устройствах: Тез. докл. и сообщ. V Минск. междунар. форума по тепло- и массообмену. — Ин-т теплообмена им. А.В. Лыкова НАНБ. — Минск, 2004. — X. — Т.2. — С. 451–452. (<http://www.itmo.by/forum/mif5/S10/10-27.pdf>).

182. Onsager L. Reciprocal relations in irreversible processes // Phys. Rev. 1931. — 37. — P. 405–407; 38. — P. 2265–2267.

183. Onsager L., Fuoss J. Reciprocal relations in irreversible processes // Phys. Chem. 1932. — 36. — P. 2289–2293.

184. Де Донде Т., Ван Риссельберг П. Термодинамическая теория срoдства (книга принципов). — М.: Металлургия, 1984. — 136 с.

185. Зубарев Д.Н. Неравновесная статистическая термодинамика. — М.: Наука, 1971. — 416 с.

186. Дьярмати И. Неравновесная термодинамика (теория поля и вариационные принципы). — М.: Мир, 1974. — 304 с.

187. Фольмер М. Кинетика образования новой фазы. — М.: Наука, 1986. — 208 с.

188. Мюнстер А. Химическая термодинамика. — М.: Мир, 1971. — 296 с.

189. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. — 536 с.

190. Булатов Н.К., Лундин А.Б. Термодинамика необратимых физико-химических процессов. — М.: Химия, 1984. — 336 с.

191. Джонсон Д. Термодинамические аспекты неорганической химии. — М.: Мир, 1985. — 328 с.

192. Базаров И.П., Геворкян Э.В., Николаев П.Н. Неравновесная термодинамика и физическая кинетика. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. — 240 с.

193. Трошенькин Б.А., Долгих Т.Н., Олейник Т.Б. Теплообмен при выделении водорода в реакциях бурогибрида натрия и алюминиевых сплавов с водой // Теплообмен в химически реагирующих системах: Избранные докл. Минск. междунар. форума: — Ин-т теплообмена АНБ, 1989. — III. — С. 153–160.

194. Трошенькин В.Б., Ткач Г.А., Трошенькин Б.А. Теплообмен сплавов с водой при производстве водорода в баллонных реакторах // Теплообмен в химически реагирующих системах: Избранные докл. III Минск. междунар. форума: — Ин-т теплообмена АНБ, 1996. — XI. — С. 237–240.

195. Трошенькин В.Б. Влияние температуры на скорость вытеснения водорода из воды сплавами кремния и алюминия // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Тр. междунар. науч.-техн. конф. — Х.: Харьк. гос. политехн. ун-т, 1997. — Ч.4. — С. 430–432.

196. Инструкция по безопасной эксплуатации баллонных газогенераторов АВГ-45 и баллонов с водородом. — М.: Гидрометеиздат, 1978. — 32 с.

197. Трошенькин В.Б., Ткач Г.А., Трошенькин Б.А., Зубарев Б.Н. Производство водорода из воды с использованием сплава ферросиликоалюминия. — Харьков, 1996. — 28 с. (Препринт АН УССР, Ин-т проблем машиностроения, № 396).

198. Рыбаков Е.Т. Измерение температуры внутри газогенератора АВГ-45 // Тр. Главн. геофизич. обсерватории, 1961. — Вып. 106. — С. 69–74.

199. Варшавский И.Л., Трошенькин Б.А., Редько В.В. Опыт эксплуатации реактора периодического действия для получения водорода из воды с помощью ферросилиция // Пробл. машиностроения. — 1981. — Вып. 11. — С. 106–111. (<http://www.thesa.ru/chemprom/2003/09-03/pro-3.pdf>).

200. Jurmanov V.A., Troshenkin B.A. Automatic facility for generation of hydrogen from water using aluminium/silicic fussion // WMO Techn. Conf. on Instruments and Meth. of Observ. (TECO-92) — Vienna, Austria, 1992, No. 462, Rep. 49.

201. Колобов Н.А., Старицын В.К. Кинетика ускоренного гидротермального окисления кремния // Электронная промышленность. — 1982. — Вып. 7 (113). — С. 44–47.

202. Маслов В.П., Данилов В.Г., Волосов К.А. Математическое моделирование процессов теплообмена. Эволюция диссипативных структур. — М.: Наука, 1987. — 352 с.

203. Душин Ю.А. Работа теплозащитных материалов в горячих газовых потоках. — Л.: Химия, 1968. — 224 с.
204. Панкратов Б.М., Полежаев Ю.В., Рудько А.К. Взаимодействие материалов с газовыми потоками. — М.: Машиностроение, 1976. — 224 с.
205. Зубов В.Л., Гасик М.И. Электрометаллургия ферросилиция. Днепропетровск: Системные технологии, 2002. — 704 с.
206. Карслоу Г.С. Теория теплопроводности. — М., Л: ОГИЗ, 1947. — 286 с.
207. Мацевитый Ю.М. Обратные задачи теплопроводности в 2-х т. — К.: Наук. думка, 2002. — Т.1. — 408 с.; Т.2. — 392 с.
208. Альтшулер В., Гурвич В. Лунные ритмы. — Л: Гидрометеоиздат, 1981. — 128 с.
209. Гаттенбергер. Гидрогеология и гидродинамика подземных вод. — М.: Недра, 1971. — 184 с.
210. Гавриленко Е.С. и др. Глубинная гидросфера Земли. — К.: Наук. думка, 1971. — 272 с.
211. Гавич Н.К. Гидрогеодинамика. — М.: Недра, 1988. — 350 с.
212. Ляшко И.И., Демченко Л.И., Мистецкий Г.Е. Численное решение задач тепло- и массопереноса в пористых средах. — К.: Наук. думка, 1991. — 264 с.
213. Павлов Н.Н. Изменение скорости вращения Земли, деформации земной коры и солнечной активности // Известия главной астрономической обсерватории в Пулковско. — 1968. — № 183. — С. 1–23.
214. Шидловский А.А. Основы пиротехники. — М.: Машиностроение, 1964. — 338 с.
215. Pilling H.V., Bedworth R.E. Окисление металлов при высоких температурах / J. Inst. Metals, 1923. — 29. — P. 529–591.
216. Brzustowski T.A. О горении добавок металлов в ракетных двигателях твердого топлива. / Canad. Aeron. a Space Journal, 1963. — 9. — No 5. — P. 141–149.
217. Кропоткин П.Н., Трапезников П.А. Вариации угловой скорости вращения Земли, колебания полюса и скорости дрейфа геомагнитного поля, и их возможная связь с геотектоническими процессами // Известия АН СССР. Серия геологическая. — 1963. — № 11. — С. 32–51.
218. Тазиев Г. Когда Земля дрожит. — М.: Мир, 1968. — 252 с.
219. Дж. А. Эйби. Землетрясения. — М.: Недра, 1982. — 264 с.
220. Ястржембский А.С. Термодинамика и история ее развития. — М.; Л: Энергия, 1966. — 668 с.

221. История учения о химическом процессе. Всеобщая история химии. — М.: Наука, 1981. — 448 с.
222. Виноградов Л.П. Химическая эволюция Земли. — М.: Изд-во АН СССР, 1959. — С. 17–24.
223. Мангушев К.И. Проблемы развития геоэнергетики Мира. — М.: Наука, 1981. — 184 с.
224. Геотермальная энергия. Ресурсы, разработка, использование. — М.: Мир, 1975. — 356 с.
225. Капица П.Л. Эксперимент, теория, практика. — М.: Наука, 1981. — 496 с.
226. Забальный Г.Н., Пашкевич Р.И., Гайдаров Г.М. Математические модели теплопереноса при фильтрации в теплоизолированных проницаемых средах. — Петропавловск-Камчатский, 1992. — 57 с.
227. Васен Н., Блинов Ю.П., Виссарионов В.И. и др. Использование источников энергии в Сибири и на Дальнем Востоке для улучшения качества окружающей среды // Возобновляемая энергия, 2003. — Июль. — С. 14–16.
228. Нетрадиционная энергетика в XXI веке: Доклады III Международной конференции. Крым, Судак, 9–15 сент. — Киев: Ин-т техн. теплофизики, 2002. — 232 с.
229. Выморков Б.М. Геотермальные электростанции. — М.; Л.: Энергия, 1966. — 112 с.
230. Дворов И.М. Глубинное тепло Земли. — М.: Наука, 1972. — 206 с.
231. Поваров О.А., Лузин В.Е., Никольский А.И. и др. Опыт создания и эксплуатации Верхне-Мутновской ГЕОЭС (Камчатка) // Нетрадиционная энергетика в XXI веке: Доклады II Международной конференции. Крым, Ялта, 17–22 сент. — Киев: Ин-т техн. теплофизики, 2001. — С. 16–17.
232. Вскипающие адиабатные потоки / Под ред. В.А. Зысина. — М.: Атомиздат, 1976. — 152 с.
233. Алексеев А.Д., Ревва В.Н., Рязанцев Н.А. Разрушение горных пород в объемном поле сжимающих напряжений. — К.: Наук. думка, 1989. — 142 с.
234. Калфакчян А.П., Александров В.Г., Воробьев Е.А. и др. Совершенствование средств и способов поддержания подготовительных работ на шахтах центрального района Донбасса. — Днепропетровск: Січ, 1994. — 208 с.

235. Лозовский С.П. Исследование процесса пучения почвы на шахте “Комсомолец Донбасса” // Сб. науч. трудов Национ. горного ун-та. — Днепропетровск. — 2003. — Т. 2. — № 17. — С. 70–74.

236. Ефремова Н. Обогрей нас, Земля // Рабочая трибуна, 1990. — 1 янв. — С. 4.

237. Тринчер К.С. Биология и информация. Элементы биологической термодинамики. — М.: Наука, 1965. — 140 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Переход вещества Земли из звездного в планетное состояние.....	8
1.1. Распределение и циркуляция потоков в оболочке протоядра Галактики и на Солнце.....	10
1.1.1. Предполагаемая структура потоков в оболочке протоядра Галактики.....	11
1.1.2. Солнечная газодинамика	12
1.2. Термодинамика регулярных потоков	16
1.2.1. Гравитационно-диссипативные структуры.....	18
1.2.2. Ротационно-диссипативные структуры	22
1.2.3. Испаритель с пульсирующим распределительным устройством	24
1.2.4. Испаритель с тангенциальным вводом потока в сепаратор	33
1.3. Причины взрыва небесных тел	35
1.4. Распределение момента количества движения и массы вещества при взрыве небесного тела	35
1.5. Неравновесная термодинамика переходных процессов	41
1.6. Оценка момента количества движения Протоземли.....	43
Выводы.....	49
Глава 2. Переход Земли из жидкого состояния в кристаллическое.....	51
2.1. Формирование лито- и гидросферы	52
2.2. Образование материков	56
2.3. Стратификация элементов в недрах Земли.....	61
2.3.1. Разделение сплава ферросиликоалюминия (ФСА)	62
2.3.2. Центробежное расслоение жидкой Земли	65
Выводы.....	69
Глава 3. Фазовые и химические превращения в недрах Земли	70
3.1. Теплообмен в испарителе с поднимающейся пленкой	70
3.2. Физико-химические основы процессов кипения и конденсации....	78
3.3. Закономерности гетерогенных реакций.....	84
3.3.1. Взаимодействие активированного алюминия с водой	84
3.3.2. Термодинамика образования водорода в реакциях алюминия, кремния и железа с водой	93
3.3.3. Испытания водородных реакторов высокого давления	99
3.4. Скорость подземных реакций	112
3.5. Рождение гор и возникновение землетрясений	117
Выводы	121

Глава 4. Геотермические электростанции	123
4.1. Энергетическая мощность подземных очагов тепла	123
4.2. Анализ предельных циклов геотермических электростанций.....	126
4.3. Экологические проблемы эксплуатации земных недр	132
Выводы	134
Послесловие ко второй части книги.....	135
Список литературы	138

Отзывы и пожелания направляйте по адресу:

*ИПМаш им. А.Н. Подгорного НАН Украины
ул. Дмитрия Пожарского, 2/10
61046, Харьков
Украина, Ukraine*

*По этому же адресу Вы можете заказать
дополнительные экземпляры книги.
Книги высылаются по предоплате.*

*При оформлении книги использованы фотографии с Internet-сайтов:
На первой странице обложки — <http://nature.espot.ru/vulcans/2/img1.jpg>;
На последней странице обложки — <http://images.myweb.ru/1152x864.jpg>.*

Наукове видання

Б.О. Трошенькін
Термодинаміка літосфери. Геотермічні електростанції
(російською мовою)

Відповідальний за випуск *Г.Є. Лискова*

Підписано до друку 10.12.2004 р.
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Друк різнографічний. Гарнітура Літературна.
Ум.друк.арк. 9,07. Обл.-вид.арк. 7,8. Тираж 1000 прим. Зам. №

ТОВ “Видавництво “Форт”.
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців
ДК № 333 від 09.02.2001 р.
61023, м. Харків, а/с 10325. Тел. (057) 714-09-08