

А.В. ОСТРИК

ФРАГМЕНТЫ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

(образцы рефератов)



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СЕРВИСА
КОРОЛЕВСКИЙ ИНСТИТУТ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОНОМИКИ И СОЦИОЛОГИИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ХИМИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ РАН

А.В. ОСТРИК

**ФРАГМЕНТЫ
СОВРЕМЕННОГО
ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ**

(образцы рефератов)

МОСКВА – 1997–2007

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
I. Основные законы биологии	8
1.1. Концепции науки о жизни	8
1.2. Характерные особенности живого.....	10
1.3. Физико-химические процессы в живых организмах.....	13
1.4. Наследственность.....	14
1.5. Отличие живой природы от неживой.....	16
II. Природа фундаментальных взаимодействий и единство законов во Вселенной	20
2.1. Гравитация.....	20
2.2. Электромагнетизм.....	22
2.3. Слабое взаимодействие.....	23
2.4. Сильное взаимодействие.....	24
2.5. Связь фундаментальных взаимодействий и единство Вселенной.....	25
III. Классическая механика и космонавтика	30
3.1. Реактивный принцип движения. Двигательные системы для космических полётов.....	30
3.2. Основы теории ракетных двигателей.....	31
3.3. Краткая характеристика ракетных двигателей.....	38
3.4. Элементы космодинамики спутников.....	39
3.5. Экспедиция на Луну.....	43
3.6. Пути развития космонавтики.....	46
IV. Проблема астероидной опасности	49
4.1. Оценка угрозы	49
4.2. Общая картина последствий столкновения.....	52
4.3. Механизмы разрушения космического тела в атмосфере.....	56
4.4. Космический патруль.....	60
4.5. Перехват, отклонение и разрушение опасных объектов.....	62
V. Уравнение состояния вещества	68
5.1. Общее понятие об уравнениях состояния и требования к ним.....	69
5.2. Простейшие уравнения состояния.....	71
5.3. Физические модели сильно сжатого вещества.....	87
5.4. Полуэмпирические уравнения состояния.....	90
VI. Список тем курсовых работ	96

ПРЕДИСЛОВИЕ

При изучении естественно научных дисциплин для развития у студентов умения творчески работать с научно - технической литературой кроме лекционных и практических занятий каждому из них предлагается в течение семестра написать курсовую работу или реферат на заданную тему.

В настоящем учебном пособии приводятся примеры таких рефератов, взятые из различных областей естествознания. Рефераты расположены в порядке возрастания их научного уровня.

Совершенно понятно, что в большинстве случаев, как и вообще во всей учебной литературе, автор не претендует на авторство. Его основной целью является обучение студентов, используя любые источники знаний, а не поиски тех, кто впервые высказал те или иные мысли, излагаемые далее. Тем не менее, следует отметить, что основные мысли были заимствованы из тех книг, которые приводятся в конце каждого из примеров реферата.

В заключительной части учебного пособия приводится примерный список тем рефератов. При их написании советуем студентам обратиться к следующей литературе.

ЛИТЕРАТУРА

История и философия естествознания

1. Ансельм А.И. очерки развития физической теорий в первой трети XX века. –М.: Наука, 1986.
2. Борн М. Физика в жизни моего поколения. –М.: Изд-во ин. Литературы, 1963.
3. Будрейко Н. Философия, физика, химия. –М.: Наука, 1964
4. Дорфман Я.Г. Всемирная история физики с начала XIX века до середины XX века. –М.: Наука, 1979.
5. Карнап Р. Философские основания физики. –М.: «Прогресс», 1971.
6. Лауэ М. фон. История физики. –М.: Наука, 1956
7. Льюис М. История физики. –М.: Мир, 1972
8. Спасский Б.И. Физика для философов –М.: Изд-во МГУ, 1989.
9. Степин В.С. Философская антропология и философия науки. –М.: «Высшая школа», 1992.
10. Фейнберг Е.Л. Две культуры. Интуиция и логика в искусстве и науке. –М.: Наука, 1992.

Естествознание

1. Горелов А.А. Концепции современного естествознания. —М.: Центр, 1991.
2. Калашников Н.П., Смондырев М.М. Основы современного естествознания. –М.: Изд-во МАСИ, 1995.
3. Карпенко С.Х., Концепции современного естествознания. –М.: «Культура и спорт», ЮНИТИ, 1997.
4. Кузнецов В.И., Идлис Г.М., Гутина В.Н. Естествознание. –М.: «Агар», 1996.
5. Острик А.В., Острик В.М., Соколов И.П. Физико-химические основы естествознания. – М.: ГАСБУ, 1998.
6. Самыгин С.И и др. Концепции современного естествознания. Ростов-на-Дону: «Феникс», 1997.

Физика

1. Блохинцев Д.И.. Основы квантовой механики. –М.: Наука, 1976.
2. Боулер М. Гравитация и относительность. –М.: Мир, 1979
3. Бреховских Л.М., Гончаров В.В., Введение в механику сплошных сред. –М.: Наука, 1982
4. Гольдин Л.Л., Новикова Г.И. Введение в атомную физику. –М.: Физматлит, 1969.
5. Готтфриц К., Вайскопф В. Концепции физики элементарных частиц. –М.: Мир, 1988.
6. Девис П. Суперсила. –М.: Мир, 1989.
7. Донской А.Д., Острик А.В., Острик В.М. Основные законы физики. В 2-х частях. (Учебное пособие для студентов) –М.: ГАСБУ, 1997г. 163с.
8. Займан Дж. Принципы теория твердого тела. –М.: Мир, 1966.
9. Иванов Б.Н. Принципы современной физики –М.: Наука, 1973.
10. Иоффе А.Ф. Основные представления современной физики. –М.: ГИТЛ, 1949
11. Иродов И.Е. Основные законы механики –М.: «Высшая Школа», 1975.
12. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. –М.: «Высшая Школа», 1983
13. Кикоин И.К., Кикоин А.К. Молекулярная физика. –М.: Физматлит, 1963.
14. Китайгородский А.И Введение в физику. –М.: Наука, 1973.
15. Коганов М.И. Электроны, фотоны, магноны. –И.: Наука, 1979
16. Компанеев А.С. Симметрия в микро- и макромире. –М.: Наука, 1978.
17. Кристи Р., Питти А. Строение вещества: введение в современную физику. –М.: Физматлит, 1969.
18. Кузнецов Б.Г. Основы теории относительности и квантовой механики. –М.: Изд-во АН СССР, 1957.
19. Кузнецов Б.Г. Принципы классической физики. –М.: Изд-во АН СССР, 1957.
20. Леулвей. Фундаментальная структура материй. –М.: Мир, 1984
21. Мерион Дж. Б. Физика и физический мир. –М.: Мир, 1975.
22. Месси Г. Новая эра в физике. –М.: Госатомиздат, 1963.
23. Нерсесов Э.А. Основные законы атомной и ядерной физики. –М.: Высшая школа, 1988.
24. Окунь Л.Б. Элементарное введение в физику элементарных частиц. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2006.
25. Острик А.В. Механика. –М.: ГАСБУ, 1996
26. Пригожин И. От существующего к возникающему. Время и сложность в физических науках. –М.: Наука, 1985.
27. Пригожин И., Стенгерс И. Время, Хаос и Квант. –М.: «Прогресс», 1994
28. Савельев И.В.. Курс общей физики. тт. 1-3, –М.: Физматлит, 1962-1984
29. Сивухин Д.В. Общий курс физики. тт. 1-5, –М.: Наука, 19
30. Суханов А.Д. Фундаментальный курс физики. –М.: «Агар», 1996
31. Фейнберг Дж. Из чего сделан мир? –М.: Мир, 1981.
32. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 1-9. –М.: Мир, 1965-1967
33. Фейнман Р. Характер физических законов. –М.: Мир, 1968.
34. Шпольский Э.В.. Атомная физика. –М. –Л.: 1944.

Химия

1. Афанасьев В.А., Зайков Г.Е. В мире катализа. –М.: Наука, 1977.
2. Глинка Н.Л. Общая химия. –М.: Госхимиздат, 1949.
3. Дмитриев И.С. Симметрия в мире молекул. –Л.: Химия, 1976.
4. Зимон А.Д. Занимательная коллоидная химия. –М.: «Радэкон», 1997.
5. Кедров Б.М., Трифонов Д.К. Закон периодичности и химические элементы. Открытия и хронология. –М.: Наука, 1969.

6. Николаев Л.А. Неорганическая химия. –М.: «Просвещение», 1982.
7. Овчинников К.В., Семенов И.Н., Богданов Р.В, От атома к молекуле. –Л.: «Химия», 1973.
8. Трифонов Д.К. Структура и границы периодической системы. –М.: Атомиздат, 1969

Специальные вопросы физики и химии

1. Альтшулер Л.В. Применение ударных волн в физике высоких давлений // Успехи физических наук. 1965. т 85, №2.
2. Бушман А.В., Фортов В.Е. Модели уравнения состояния вещества // УФН. 1983. т. 140, №2.
3. Гинзбург В.Л. О физике и астрофизике. –М.: Наука, 1980.
4. Григорян С.С. О движении и разрушений метеоритов в атмосферах планет // Космические исследования. 1979. т. 0511, вып. 6.
5. Девис П. Случайная Вселенная. –М.: Мир, 1985.
6. Делоне Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. –М.: Наука, 1976.
7. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных явлений. – М.: Наука, 1966.
8. Зельдович Я.Б. и др. Физические основы строения и эволюции звезд. –М.: Изд-во МГУ, 1981.
9. Капра Ф. Дао физики. С. Петербург. «Орис», 1994.
10. Кесслер Ядерная энергетика. –М.: Наука. 1986.
11. Клумов Б.А., Кондауров В.И., Фортов В.Е. и др. Столкновение кометы Шумейкера–Леви 9 с Юпитером: что мы увидели? // Успехи физических наук. 1994. т. 164, №6.
12. Клумов Б.А., Ивлев А.В., Фортов В.Е. и др. Столкновение кометы Шумейкера–Леви 9 с Юпитером: что мы увидели? // Успехи физических наук. 1994. т. 166, №4.
13. Князев В.М., Курдюмов С.П. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. – М.: Наука, 1994.
14. Левантовский В.И. Механика космического полета в элементарном изложении. - М.: Наука, 1974
15. Немчинов И.В., Лосева Т.В., Шувалов В.В. Динамические процессы в атмосфере Земли при падении космических тел. В сб. научных трудов ИДГ РАН "Динамические процессы в геосферах". — М.:1994.
16. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. - М.: Мир, 1990.
17. Острик А.В. Термомеханическое действие рентгеновского излучения на многослойные гетерогенные преграды в воздухе.–М.: НТЦ «Информтехника», 2003.– 160с.
18. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: Мир, 1969.
19. Ребане К.К. Энергия, энтропия, среда обитания. - М.: Наука, 1985
20. Силк Дж. Большой взрыв. — М. : Мир. 1982.
21. Фаворский Н.О., Фишгойт В.В. Янтовский Е.М. Основы теории космических электро-реактивных двигательных установок - М.: «Высшая школа», 1978.
22. Феодосьев В.И. Основы техники ракетного полета. — М.: Наука. 1976.
23. Ханен Г. Синергетика. - М.: Мир. 1980.
24. Шкловский И.С. Вселенная, жизнь, разум. - М.. Наука. 1980.
25. Квант. — М.: Научно-популярный физико-математический журнал.

Науки о природе Земли, жизни и человеке

1. Албертс Б., Брей Д., Льюис Дж. Рэфф М., Робертс К., Уотсон Дж. Молекулярная биология клетки тт. 1-3, — М.: Мир, 1994.
2. Афанасьев В.Г. Мир живого. - М.. "Полит. литература". 1986.
3. Брода Э. Эволюция биоэнергетических процессов. - М.: 1978
4. Вернадский В.И. Живое вещество. - М.: Наука. 1978.
5. Вернадский В.И. Начало и вечность жизни. - М.: «Советская Россия". 1989.

6. Вилли К. Биология. -М. Мир, 1968.
7. Волькенштейн М.В. Биофизика. - М.: Наука, 1988
8. Волькенштейн М.В. Перекрестки науки. - М.: Наука, 1972.
9. Гудожник Г.С., Елисеева В.С. Глобальные проблемы в истории человечества. -М.: "Знание". 1988.
10. Иванов С.М. Абсолютное зеркало. — М.. "Знание". 1986
11. Кемп П., Армс К. Введение в биологию. — М.: Мир, 1986.
12. Крушинский Л.В. Биологические основы рассудочной деятельности. -М.: Изд-во МГУ, 1977.
13. Лапин В.Л., Мартинсен А.Г., Попов В.М. Основы экологических знаний инженера. - М.: Экология, 1996.
14. Медников Б.М. Аксиомы биологии. — М.: Знание, 1986.
15. Медников Б.М. Дарвинизм в 20-ом веке. - М.: Знание, 1975.
16. Мечников И.И. Пессимизм и оптимизм. — М.: "Советская Россия", 1989.
17. Моисеев Н.Н. Воздействие гелио- и геофизических факторов на организм человека. — Л.: 1986
18. Мониин А.С. Шишкин Ю.А. Глобальные экологические проблемы. – М.: 1990.
19. Назаретян А.П. Интеллект во Вселенной. – М.: Недра, 1991.
20. Небел Б. Наука об окружающей среде. тт. 1-2, - М.: Мир. 1993.
21. Николаев Л.А. Основы физической химии биологических процессов. - М.: "Высшая школа". 1971.
22. Опарин А.В. Жизнь, её природа, происхождение и развитие. – М.: Изд-во АН СССР, 1960.
23. Тушинский А.В. Космос и ритм природы Земли. - М.: 1966.
24. Чижевский А.Л. Космический пульс жизни. – М.: Мысль, 1995.
25. Шарден П.Т. Феномен человека. - М.: 1987.
26. Шредингер Э. Что такое жизнь с точки зрения физика. - М.: Наука, 1972.
27. Шноль Э.С. Физико-химические факторы биологической эволюции. - М.: Наука, 1979.
28. Шопвиль Ф., Энни А.Л. Биосинтез белка. - М.: Мир. 1977.

I. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ БИОЛОГИИ

Современная биология базируется на том, что явления жизни в значительной степени можно объяснить посредством законов химии и физики, не привлекая для этого таинственной жизненной силы. Также, как в физике и химии, в биологии существуют широкие обобщения, гипотезы, теории и законы. Они являются итогом тщательного изучения и обобщения отдельных наблюдений.

1.1 Концепции науки о жизни

Пожалуй, основной концепцией науки о жизни - биологии - можно считать то, что живые системы подчиняются физическим законам. Хотя еще до недавнего времени была распространена гипотеза Дриша о существовании трансцендентного регулирующего начала – энтелии, которая якобы управляет явлениями жизни и развития. Доводы Дриша были построены на экспериментах, показавших, что изолированные бластоляры зародышей морского ежа развиваются в полных личинок, то есть часть дает начало целому.

Другой основной концепцией является биогенез - обобщение, согласно которому «все живое происходит только от живого». Эксперименты Пастера еще 100 лет назад доказали, что даже микроорганизмы, например, бактерии, не могут возникать из неживого вещества путем самозарождения.

Основным обобщением биологии является и клеточная теория, которая утверждает, что:

- клетка – элементарная единица живого, способная к самообновлению, саморегуляции, самовоспроизведению, и являющаяся единицей строения, функционирования и развития всех живых организмов;
- клетки всех живых организмов сходны по строению, химическому составу и основным проявлениям жизнедеятельности;
- размножение клеток происходит путем деления исходной материнской клетки;
- в многоклеточном организме клетки специализируются по функциям и образуют ткани, из которых построены органы и их системы, связанные между собой межклеточными, гуморальными и нервными формами регуляции.

Авторами клеточной теории можно считать сразу нескольких ученых: немецкого зоолога и физиолога Т. Шванна, немецкого ботаника М. Шлейдена, французского биолога А. Дютроше, английского ботаника Р. Броуна. Каждый из них в своей области исследований обнаружил клеточное строение живых структур.

Еще одно крупнейшее обобщение в биологии, подвергающееся в последнее время существенному пересмотру, это концепция эволюции органического мира, согласно которой все современные формы растений и животных не были созданы сразу, а произошли от

существовавших ранее более простых организмов путём постепенных изменений, накапливающихся в поколениях. Сформулирована она была в 1859 году в книге Чарльза Дарвина «Происхождение видов». В ней показано как путем естественного отбора могла бы происходить эволюция.

Изучение развития разнообразных животных и растений от момента оплодотворения до взрослой особи привело к генной теории. Она даёт ответ на вопрос, каким путем передаются потомкам признаки родителей. Начало теории заложил в 1889 году немецкий зоолог А. Вейсман, предположив, что половые (зародышевые) клетки происходят от родительских половых клеток, а не от клеток тела данного индивидуума. Таким образом, ещё в то время, когда не были известны ни хромосомы, ни гены, А. Вейсман осознал, что наследственность связана с передачей дискретных молекулярных комплексов от одного поколения другому.

Обобщения относительно механизма наследственности принадлежат к наиболее точным биологическим теориям, ибо они позволяют предсказывать, какова вероятность того, что потомство двух данных родителей будет обладать тем или иным определенным признаком. Эти законы сформулировал австрийский аббат Мендель в 1865 году на основании опытов по скрещиванию гороха. Удивительно, что он сумел на основе таких простых опытов, не зная деталей строения хромосом, мейоза и оплодотворения, сделать такие обобщения (впрочем, как и всем великим людям, ему повезло: он наткнулся на особенно удобное растение – горох, который наследует признаки просто и ясно). Позже, когда накопились генетические и цитологические данные, Сэттон и Морган сформулировали концепцию о линейном расположении единиц наследственности в хромосомах.

Одно из характерных свойств живых организмов состоит в их способности к обмену веществ и осуществлению множества химических реакций. Основа этих представлений была заложена еще в 1780 году, когда Лавуазье и Лаплас пришли к выводу, что дыхание есть особая форма горения на основе простых опытов по потреблению кислорода и образованию углекислоты животными и горящими свечами. Затем опытами Кирхгофа, Либиха, Пастера и Бюхнера (1897 г.) было показано, что обмен веществ у всех живых организмов осуществляется при помощи ферментов, синтезируемых живыми клетками. Ферменты регулируют скорость и специфичность всех химических реакций, протекающих в живых организмах

Обменные реакции самых различных организмов – растений, животных, бактерий – оказались поразительно сходными во многих отношениях. Первоисточником всякой энергии, используемой живыми организмами, служит солнечный свет. Энергия света, преобразуемая зелеными растениями в энергию химических соединений при фотосинтезе, в ре-

зультате дальнейших процессов метаболизма становится доступной для ее использования этими растениями. В частности, она может оказаться использованной растительными животными. При этом процессы обмена веществ регулируются таким образом, чтобы внутренняя среда клеток оказалась как можно более постоянной. Внешние условия стремятся вызвать изменения, а живые организмы непрерывно приспосабливаются к ним, стремясь поддержать постоянство внутренней среды (гомеостаз).

В 1941 году Биллом и Татумом было показано, что каждая биохимическая реакция в процессе обмена и жизнедеятельности организма контролируется особым ферментом, а он, в свою очередь, контролируется единичным геном.

В изучении генов большой шаг вперед был сделан в 1953 году Уотсоном и Криком, сформулировавших гипотезу о структуре гена - молекулы ДНК, которая позволила объяснить свойства гена, его способность к точному самовоспроизведению, к передаче информации и мутациям.

Приведенный здесь перечень основных биологических законов не является исчерпывающим. Он просто показывает, что в своей основе биологическая наука – едина, а взаимоотношения между живыми организмами и природой строятся на законах физики и химии.

1.2. Характерные особенности живого

Всеим живым организмам в большей или меньшей степени свойственны определённые размеры и форма, обмен веществ, рост и размножение, приспособляемость, подвижность и раздражимость. Граница между живыми и неживыми объектами довольно условна, неживые объекты могут обладать некоторыми из перечисленных свойств, но не могут всеми одновременно.

Каждый род живых организмов обладает характерными для него формой и внешним видом. Неживые объекты обычно имеют гораздо менее постоянные размеры и форму. Живые организмы не гомогенны, а состоят из различных частей, выполняющих специальные функции, и поэтому для них характерна специфически сложная организация. Структурной и функциональной единицей как растительных, так и животных организмов служит клетка – наиболее простая частица живого вещества, способная существовать самостоятельно. Но и сама клетка имеет специфическую организацию.

Тела высших животных и растений имеют ряд последовательно усложняющихся уровней организации: клетки организованы в ткани, ткани - в органы, а органы - в системы органов.

Протоплазма каждой клетки непрерывно изменяется: она поглощает новые вещества, подвергает их изменениям, превращает в тепло (в конечном итоге) энергию белков,

жиров и углеводов по мере того, как они переходят в более простые соединения. Это постоянное расходование энергии представляет собой одну из особенностей живого. Некоторые типы протоплазмы отличаются высокой интенсивностью обмена (бактерии), другие типы (семена, споры) имеют столь низкий уровень обмена, что его с трудом можно обнаружить.

Подвижность большинства животных совершенно очевидна: они ползают, бегают или летают. У растений движения гораздо более медленные. Некоторые животные - губки, кораллы - не передвигаются с места на место, но имеют реснички или жгутики, приводящие в движение окружающую их жидкую среду, доставляющую им все необходимое для жизни.

Живые организмы обладают раздражимостью, т.е. реагируют на физические или химические изменения в непосредственно окружающей их среде. Это могут быть изменения цвета, интенсивности или направления световых лучей, температуры, давления, силы и высоты звука.

Следующая особенность живых организмов – рост – представляет собой прирост массы протоплазмы за счет увеличения размеров отдельных клеток или за счёт увеличения числа клеток, или того и другого. Большинство животных имеет ограниченный период роста, при этом всякий растущий орган продолжает функционировать.

Совершенно обязательным атрибутом жизни надо считать размножение. Так, простые вирусы лишены обмена веществ, не двигаются и не растут, но поскольку способны воспроизводить сами себя, большинство биологов склонны считать их живыми организмами. Процесс размножения может сводиться к простому разделению одного индивидуума на два. Однако у большей части животных и растений он связан с образованием специализированных яйцевых и семенных клеток, которые, соединяясь между собой, образуют оплодотворённое яйцо, развивающееся в новый организм.

Способность растения или животного приспособляться к окружающим условиям позволяет ему выживать в мире, полном неожиданных перемен. Адаптация может происходить либо путем немедленного изменения, основанного на раздражимости протоплазмы, либо путем длительного мутирования и отбора.

Уникальное свойство протоплазмы – ее живое состояние – не обусловлено присутствием какого-то редкого, ей одного присущего химического элемента. Около 96% веса человеческого тела составляют четыре элемента: углерод, кислород, водород и азот. Еще 3% составляют четыре других элемента: кальций, фосфор, калий и сера. Перечень завершают содержащиеся в небольших количествах элементы: йод, железо, натрий, хлор, маг-

ний, медь, марганец, кобальт, цинк и еще несколько других. Все эти элементы встречаются и в неживой природе, в атмосфере, земной коре, морях и океанах.

Значительную часть протоплазмы составляет вода – вещество, обладающее в силу своего строения (наличия водородных связей между молекулами) уникальными физическими свойствами. У человека количество воды в протоплазме различных тканей варьирует от 20% (в кости) до 85% (в клетках головного мозга). Вода выполняет множество функций. В ней растворяется большинство содержащихся в протоплазме веществ, и поэтому они могут реагировать между собой (благодаря аномально большому значению коэффициента диэлектрической проницаемости воды). Вода обладает способностью поглощать тепло с минимальным изменением собственной температуры (имеет высокую теплоемкость). Воде требуется сравнительно большое количество тепла для перехода из жидкого состояния в газообразное (обладает большой теплотой испарения из-за наличия сильного взаимодействия между молекулами H_2O), что предоставляет возможность организму освобождаться от перегрева путем испарения воды. Характерная для воды высокая теплопроводность создает возможность равномерного распределения тепла между тканями тела. Наконец, вода служит незаменимым смазочным материалом, присутствуя в тех местах, где один орган трется о поверхность другого, например, в суставах.

Соединения, встречающиеся в клетках, можно разделить на органические и неорганические. Некогда считали, что органические вещества – это вещества особого рода, которые могут синтезироваться только в живых организмах. Но в 1929 году немецкий химик Ф. Велер впервые искусственно синтезировал мочевины. С тех пор тысячи органических веществ были получены синтетическим путем.

Важнейшие типы органических соединений, встречающихся в протоплазме – это углеводы, белки, жиры, нуклеиновые кислоты и стероиды. Некоторые из них обеспечивают структурную целостность клетки, другие доставляют энергию, третьи регулируют внутриклеточный обмен. Типы веществ и даже их относительные количества удивительно сходны в клетках различных органов и разных животных. Как в печёночной ткани человека, так и протоплазме амебы содержится 80% воды, 12% белка, 2% нуклеиновых кислот, 5% жира, 1%, углевода и доли процентов стероидов и других веществ. Некоторые специализированные клетки, конечно, имеют специфический химический состав: так головной мозг человека богат жироподобными веществами определенных типов.

Каждая клетка содержит сотни разных белков, и клетки каждого типа обладают некоторыми белками, свойственными только им одним. Степень различия между белками двух видов организмов зависит от степени эволюционного родства данных форм. Менее родственные между собой организмы обладают менее сходными белками. Белки – веще-

ства чрезвычайно сложные, молекулы их являются весьма крупными и содержат тысячи атомов.

Итак, живое вещество состоит из воды, минеральных солей и органических веществ – белков, углеводов и жиров, а также многих других соединений. Углеводы и жиры играют лишь небольшую роль в структуре клеток, но важны как источники энергии. Углеводы служат легко используемым топливом, а жиры – более долговременным запасом энергетического материала. Белки являются самыми важными структурными и функциональными компонентами клеток. Организм в известных пределах способен превращать вещества каждой из этих групп в вещества других групп.

1.3. Физике - химические процессы в живых организмах

Одним из основных процессов, происходящих в живом организме, является преобразование энергии. В живых клетках имеются чрезвычайно сложные и эффективные преобразователи энергии. При фотосинтезе лучистая энергия солнца превращается в химическую энергию. Химическая энергия пищевых веществ преобразуется в процессе дыхания в «биологически полезную» энергию. Эта энергия используется клетками для выполнения механической, осмотической, электрической или химической работы. Превращения энергии происходят в полном соответствии с законами термодинамики.

Полученная энергия используется для выполнения клетками механической работы – при мышечном сокращении, электрической – при проведении нервного импульса, осмотической – при перемещении молекул против градиента концентрации, химической – при росте. Во всех процессах энергия в конце концов переходит во внешнюю среду в бесполезной для организма форме: в виде тепловой энергии (согласно второму началу термодинамики этот вид энергии наиболее неэффективен). У растений и животных в ходе эволюции выработался для осуществления этих процессов ряд замечательных преобразователей энергии, а также эффективные системы для их регуляции.

Другим физическим процессом, играющим большую роль в жизнедеятельности, является диффузия. С ее помощью происходит движение молекул кислорода и питательных веществ. Каждая клетка окружена мембраной, через которую и диффундируют все пищевые вещества и продукты. В жидкости почти каждой живой клетки растворены соль, сахара и другие вещества, благодаря которым эта жидкость обладает определенным осмотическим давлением. Перенос воды или растворённых веществ в клетку и из клетки против градиента концентрации представляет собой физическую работу и требует затрат энергии.

Химическая деятельность клеток, обеспечивающая их существование, рост, возбудимость, подвижность и воспроизведение, называется обменом веществ или метаболизмом. Метаболические функции животных, растительных и бактериальных клеток по-

разительно сходны, несмотря на внешнее несходство соответствующих организмов. Химические реакции в протоплазме протекают под действием ферментов белковых катализаторов, регулирующих скорость и специфичность тысяч химических реакций.

Общее количество протоплазмы всех живых существ, населявших Землю на протяжении примерно миллиарда лет со времени появления на ней жизни, во много раз превышает массу углерода и азота на всей планете. Каждый элемент – углерод, водород, кислород и другие – воспринимается из окружающей среды, входит в состав живой протоплазмы и, наконец, через ряд других организмов возвращается в окружающую среду, чтобы использоваться повторно.

Первичными продуктами в органическом мире являются зеленые растения и протисты. Благодаря свойствам хлорофилла растения способны использовать энергию солнечного света для синтеза богатых энергией соединений из воды и углекислого газа, не представляющих физиологической ценности как горючее. Этот физический процесс – фотосинтез – единственный биологический путь улавливания солнечной энергии и использования ее для жизни на нашей планете. Как показывает рассмотрение превращений энергии, без зеленых растений жизнь на Земле совершенно исчезла бы.

1.4. Наследственность.

В вопросе о наследственности и происхождении жизни наиболее ярко проявляются отличия законов живой природы от неживой.

Сущность наследственности заключается в порождении нового поколения потомков, сходных с родительским поколением. Это процесс, который очевидным образом связан с передачей биологической информации новому поколению через яйцеклетку и сперматозоид.

Попытки улучшения домашних животных и растений делались уже на протяжении многих веков, а такие селекционные приемы, как искусственное опыление финиковой пальмы, применялись в Египте и Месопотамии за сотни лет до нашей эры. Однако научное понимание процесса наследственности и изменчивости достигнуто лишь благодаря достижениям современной генетики.

На протяжении XVIII и XIX веков многие исследователи пытались установить, как передаются признаки из поколения в поколение. Можно отметить опыты ботаника И. Кельрейтера (1760 г.) по скрещиванию двух видов табака и, конечно, опыты Г. Менделя по скрещиванию гороха. Мендель значительно дальше продвинулся в изучении закономерностей, т.к., в отличие от Кельрейтера, не пытался следить за наследованием всех признаков одновременно, а выбрал один (окраска или покрытие семян гороха). Поэтому, когда в 1960 году были открыты детали процессов митоза, мейоза и оплодотворения, три

исследователя – де Фриз в Голландии, Коррекс в Германии и Чермак в Австрии - независимо друг от друга пришли к законам наследственности, сформулированным Менделем.

Рост каждого растения или животного происходит в результате деления и увеличения размеров клеток, составляющих организм. Этот упорядоченный процесс деления называется митозом. В ядре каждой делящейся клетки содержатся продолговатые темноокрашенные тельца, называемые хромосомами, в основе которых лежит центральная нить (хрономера). Когда хрономеры были впервые открыты, многие биологи сочли их за гены – наследственные факторы, которые, как показывали опыты по скрещиванию, лежат в хромосомах в определенном порядке. Однако дальнейшие исследования показали, что между хромосомами и генами нет полного соответствия.

Постоянство числа хромосом в последовательных поколениях обеспечивается процессом мейоза, происходящим при созревании гамет – яйцеклеток и сперматозоидов. Мейоз состоит из двух клеточных делений, при которых число хромосом уменьшается вдвое. Когда две гаметы соединяются при оплодотворении, то восстанавливается нормальное число хромосом.

Законы наследственности непосредственно вытекают из поведения хромосом в митозе, мейозе и процессе оплодотворения. В каждой хромосоме содержатся многочисленные наследственные факторы, которые называются генами; каждый ген контролирует наследование одного или нескольких признаков. Хромосомы в клетках тела парные, поэтому каждая клетка тела содержит по два гена каждого сорта. Поскольку хромосомы расходятся в мейозе и перекомбинируются при оплодотворении, то и гены при этом перекомбинируются. Гены определенных признаков лежат в определённых местах хромосомы, называемых локусами. В мейозе каждая точка хромосомы соприкасается с соответствующей точкой гомологичной хромосомы, а, каждый ген – с соответствующим геном.

Попытки открыть действительные физические и химические механизмы, участвующие в передаче признаков по наследству, привели к созданию в XX веке самостоятельной науки - биохимической генетики. Она изучает химическую и физическую природу генетического материала и механизмы, при помощи которых гены регулируют развитие организма и его жизнедеятельность.

В настоящее время показано, что гены состоят из ДНК (дезоксирибонуклеиновой кислоты), молекула которой представляет собой две комплементарные цепи, свернутые вместе в правильную двойную спираль и скрепленные специфическими водородными связями. При репликации (удвоении) молекулы ДНК две её цепи разделяются, и каждая из них служит матрицей для синтеза новой цепи.

Последовательность нуклеотидов в ДНК, составляющей данный ген, отличается от их последовательности в ДНК любого другого гена. С ДНК - гена информация передаётся на особого рода РНК (рибонуклеиновую кислоту), называемую информационной РНК. Эта РНК синтезируется в ядре и переходит на рибосомы эндоплазматической сети. Она присоединяется к рибосомам и служит матрицей для синтеза фермента или иного специфического белка.

Белки синтезируются на рибосомах следующим образом. Сначала аминокислоты присоединяются к специфическим «адаптерам» – молекулам транспортной РНК, в определённом участке которых находится триплетная кодовая структура. После этого аминокислоты располагаются в определенном порядке, диктуемом комплементарностью структуры нуклеотидных триплетов в кодонах информационной РНК и в антикодонах транспортной РНК. В результате, информация, первоначально закодированная в специфической последовательности нуклеотидов ДНК, переводится в специфическую последовательность нуклеотидов информационной РНК, а затем – в определённую последовательность аминокислот в белковой молекуле.

Таким образом, каждый белок обладает уникальной молекулярной структурой, которая определяется специфической линейной последовательностью аминокислот, информация о расположении которых содержится в генах.

1.5. Отличие живой природы от неживой

Всё изложенное свидетельствует о том, что деятельность живого организма нельзя свести только к проявлению обычных законов физики или химии. Развёртывание событий в жизненном цикле организма обнаруживает удивительную регулярность и упорядоченность, не имеющую себе равных среди всего, с чем мы сталкиваемся при исследовании неживой материи.

Организм контролируется в высшей степени хорошо упорядоченной группой атомов, которая составляет только очень незначительную часть общей массы каждой клетки. Более того, изучая механизм мутаций, мы приходим к заключению, что перемещение всего лишь немногих атомов внутри группы «управляющих» атомов зародышевой клетки достаточно для того, чтобы вызвать весьма определенное изменение наследственных признаков большого масштаба.

Удивительная способность организма концентрировать на себе, «поток порядка», избегая свойственной неживой природе неупорядоченности, связана с присутствием аperiodических твердых тел – хромосомных молекул. Последние представляют собой наивысшую степень упорядоченности среди известных нам ассоциаций атомов из-за той индивидуальной роли каждого атома и каждого радикала, которую они здесь играют.

В то же время в неживой природе, описываемой законами физики, положение дел обстоит иначе. Все физические и химические законы, отвечающие за поведение систем, состоящих из большого числа частиц, являются статистическими. Течение событий в таких системах, как правило, есть результат не управляющего воздействия небольшой упорядоченной группы атомов, а статистический средний результат наложения огромного числа неупорядоченного поведения большой группы атомов.

Что же является характерной особенностью жизни? Если неживую систему изолировать или поместить в однородные условия, всякое движение обычно скоро прекращается в результате разного рода диссипативных процессов: система переходит в состояние термодинамического равновесия с максимальной энтропией. Живой же организм избегает перехода к равновесию, благодаря тому, что он питается, дышит и (в случае растений) ассимилирует. Конечно, в результате жизнедеятельности организм непрерывно увеличивает свою энтропию, но равновесного состояния с максимальной её значением не достигает, извлекая из окружающей среды низкоэнтропийные вещества. Это как раз те вещества, которыми организм питается, т.е. он непрерывно извлекает порядок из, вообще говоря, неупорядоченного мира, содержащего однако в силу своей неоднородности и весьма упорядоченные структуры (сложные органические соединения).

Работа организма возможна лишь в рамках соблюдения физических законов, поэтому и сам организм должен быть упорядочен (т.е. состоять из большого числа атомов) и мир, в котором он живёт – тоже. Если бы организм состоял из небольшого количества атомов и был чувствителен к воздействиям одного или немногих атомов, то события не могли бы иметь действительно закономерные черты. Именно поэтому атомы так малы. Только при наличии огромного числа атомов статистические законы начинают действовать с достаточной точностью и обеспечивают организму возможность наслаждаться благодеянием их вполне точного выполнения, как в своей внутренней жизни, так и при взаимодействии с внешним миром. В этом отношении мы обнаруживаем единство между живым организмом и окружающей его неживой природой.

Но в механизме наследственности лежит совсем другой принцип. Малые группы атомов, слишком малые, чтобы отклонения от статистических средних величин были незначительными, играют главенствующую роль в весьма упорядоченных и закономерных процессах внутри каждого организма. Размеры гена, определённые по генетическим и цитологическим данным, составляют около 300А. Каждый ген содержит около миллиона атомов, и это количество явно не может обеспечить упорядоченное и закономерное поведение. Ген – большая белковая молекула, где каждый атом играет свою индивидуальную роль.

Устойчивость генной структуры – известна, однако существуют скачкообразные мутации. Дарвин ошибался, когда считал, что материалом, на основе которого действует естественный отбор, являются небольшие непрерывные случайные изменения. Около 60 лет назад голландец де Фриз открыл, что между неизменными особями и немногими измененными нет промежуточных форм. Де Фриз назвал это мутацией. Физику она напоминает квантовую теорию, где также не существует промежуточных состояний между двумя соседними энергетическими уровнями атома. При этом происходит квантовый переход – переход от одной относительно устойчивой конфигурации к другой.

Ген совершенно точно можно назвать аperiодическим кристаллом или твердым телом, в котором разнообразие возможных изомерных комбинаций достаточно велико, чтобы заключать в себе сложную систему детерминации в пределах минимального пространства. Таким образом, чтобы примирить высокую устойчивость носителей наследственности с их малыми размерами, природе пришлось «изобрести» необычайно большую молекулу, которая стала образцом высокодифференцированной упорядоченности, охраняемой квантовой теорией.

Таким образом, жизнь - это упорядоченное и закономерное поведение материи, основанное не только на одной тенденции переходить от упорядоченности к неупорядоченности, но и частично на существовании упорядоченности, которая динамически поддерживается в течение жизни организма. Современная биология, впитав в себя все достижения физики и химии, пытается всё дальше проникнуть в тайны живого, ответить на один из самых основных вопросов естествознания: о происхождении жизни и разума на нашей планете.

Литература

1. Вилли К. Биология. -М. "Мир", 1968.
2. Шредингер Э. Что такое жизнь с точки зрения физика. -М. : "Наука", 1972.
3. Медников Г.М. Дарвинизм в 20-ом веке. -М. : 1975.
4. Шоприль Ф., Энни А. Л. Биосинтез белка. -М. : "Мир", 1977.
5. Шкловский И.О. Вселенная, жизнь, разум. -М. : "Наука", 1 980.
6. Афанасьев В. Г. Мир живого. -М. : "Полит. литература", 1986.
7. Кемп П., Арме К. Введение в биологию. -М. : "Мир", 1986.
8. Медников Б.М. Аксиомы биологии. -М. : "Знание", 1986.
9. Шарден П. Т. Феномен человека. -М. : 1987.
10. Волькенштейн М. В. Биофизика. -М. : "Наука", 1988.
11. Н.А. Лемеза Л.В. Камлюк Н.Д. Лисов Пособие по биологии для поступающих в ВУЗы
12. Острик А.В., Острик В.М., Соколов И.П. Физико-химические основы естествознания. -М.: ГАСБУ, 1998.

II. ПРИРОДА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И ЕДИНСТВО ЗАКОНОВ ВО ВСЕЛЕННОЙ

Еще в древности людей интересовал вопрос, какие причины вызывают изменения в природе? В представлениях древних, силы, сотворившие мир и изменяющие его, были магического свойства. Систематическое изучение процессов изменения и движения начали древнегреческие философы. Так, Аристотель утверждал, что ключом к пониманию движения является сопротивление, заметив, что в плотных средах тела движутся медленнее, чем в разреженных. Он отвергал идею атомистов о частицах, свободно движущихся в пустоте, т.к. пустота не могла бы оказывать сопротивления движению, и скорость частиц стала бы бесконечной, что абсурдно.

Великим достижением Ньютона стало осознание того, что движение не требует приложения силы. Сила требуется только для отклонения от равномерного прямолинейного движения. При этом загадка движения Земли вокруг Солнца объясняется искривлением её траектории впоследствии солнечного притяжения.

Механика Ньютона быстро получила признание, с нею связаны все технические расчеты, опирающиеся на связь сил и движения. Однако она ничего не говорит о происхождении сил, вызывающих движение, а эти силы очень многообразны и могут действовать как на расстоянии, так и при контакте с телами. Современная наука сводит всё многообразие сил природы к четырём фундаментальным взаимодействиям, каждое из которых имеет своё отличие.

2.1. Гравитация

Гравитация первой из четырёх фундаментальных взаимодействий стала предметом научного изучения. До Ньютона она неразрывно связывалась с Землей посредством понятий "верха" и "низа", смешиваясь с космологическими представлениями. Так, Аристотель усматривал в стремлении тел падать на землю проявление общего принципа, согласно которому все тела имеют "естественное" место в мире. Массивные тела стремятся вниз, а газообразные воспаряют вверх к небесным сферам.

В средние века стало понятно, что гравитация не ограничена лишь Землёю и что гравитационные силы действуют между всеми планетами. Убедительным подтверждением универсального характера гравитации явилось объяснение Ньютоном океанских приливов действием гравитационного притяжения Луны. Это было примером дальнедействующей природы гравитации: хотя интенсивность гравитационного взаимодействия и убывает с расстоянием по закону обратных квадратов, оно распространяется в пространстве и может сказываться на далеко удаленных от источника телах. Благодаря гравитации звезды связываются в галактики, и Вселенная не разваливается на части.

Важная особенность гравитации – её универсальность. Ничто во Вселенной не избавлено от неё, каждая частица участвует в гравитационном взаимодействии. Сила гравитации – всегда сила притяжения (в настоящее время выдвинута гипотеза о существовании темной энергии, испытывающей антигравитацию). Гравитационному отталкиванию должна была бы соответствовать отрицательная энергия. Но энергия покоя, запасенная в любой частице, связана с её положительной массой и сама всегда положительна.

Другой особенностью гравитации является её малая интенсивность. Величина гравитационного взаимодействия между компонентами атома водорода (протоном и электроном) составляет 10^{-20} от силы взаимодействия электрических зарядов. Если бы размеры атома водорода определялись бы гравитацией, а не электрическим взаимодействием между зарядами, то самая близкая орбита электрона превосходила бы по размерам наблюдаемую нами область Вселенной (Метагалактику). В мире субатомных частиц гравитацией пренебрегают.

Гравитация остается незаметной и в мире макроскопических объектов. Первое лабораторное наблюдение притяжения между двумя телами потребовало постановки специального опыта. В 1797 году Генри Кавендиш поставил этот знаменитый эксперимент, измерив незначительную силу притяжения между двумя шариками, прикрепленными на концах горизонтально подвешенного деревянного стержня, и двумя большими свинцовыми шарами. Как же столь слабая сила может оказаться основной во Вселенной? Ответ кроется в универсальности гравитации. Действие гравитационного притяжения одного электрона или протона пренебрежимо мало, но их результирующая может оказаться значительной.

Гравитацию следует рассматривать как поле. Каждая частица является источником поля, окружающего её. Другая частица, находящаяся в этом поле, испытывает на себе действие силы. Причем, поле не просто способ описания, оно обладает массой, энергией, импульсом и моментом импульса, в нем могут существовать волны.

Ньютоновская теория гравитации просуществовала более 200 лет и была уточнена физикой XX века. Эта теория не могла объяснить результаты наблюдений орбиты планеты Меркурий – её прецессию на 4,3 секунды в столетие. Она оказалась также несовместимой и с теорией относительности. Согласно Ньютону, гравитационное взаимодействие между двумя телами передаётся через пространство мгновенно, а согласно Эйнштейну, невозможно распространение физического сигнала со скоростью выше скорости света. Пытаясь расширить свою теорию, чтобы включить в нее гравитацию, Эйнштейн создал в 1915 г общую теорию относительности, в которой гравитация – не сила, а проявление искривления пространства – времени. У него гравитация обусловлена геометрией, и тела

следуют по искривленным траекториям не из-за силы гравитации, а просто выбирают кратчайший путь в искривленном пространстве.

При этом теория гравитации Ньютона осталась применимой во всех практических приложениях. Непригодна она только для гравитационных полей большой силы (например, нейтронных звезд или чёрных дыр).

2.2. Электромагнетизм

Электрические и магнитные явления люди наблюдали с давних времён (молнии, полярные сияния). Уже древнегреческий философ Фалес знал, что янтарь, потёртый о мех или шёлк, начинает притягивать окружающие предметы. Само слово "электричество" происходит от слова янтарь, которое по-гречески означает электрон. В средние века Гильберт установил, что явление электризации присуще и другим веществам. Затем французский учёный Дюре показал существование двух зарядов: положительного и отрицательного.

В XVII-XIX веках природа электричества частично прояснилась после экспериментов Б. Франклина и М. Фарадея. Выяснилось, что электрические заряды одного знака отталкиваются, а заряды противоположных знаков притягиваются, причём электрические силы ослабевают по закону обратных квадратов, который сформулировал ранее Ньютон для гравитации. Однако электрические силы, в отличие от гравитационных, можно легко наблюдать для тел обычных размеров.

Работы Фарадея по исследованию электролиза навели на мысль, что электричество сокрыто в атоме, но существование электрона было установлено твёрдо лишь после того, как Дж. Дж. Томсон открыл катодные лучи. Стало понятно, что если вещество состоит из атомов и, следовательно, дискретно, то дискретен и электрический заряд, т.е. заряд любой частицы всегда кратен некоторой фундаментальной величине. Однако не все материальные частицы оказались электрически заряженными. В этом отношении электричество отличается от гравитации. Гравитационное поле создают все материальные частицы, тогда как электрическое поле генерируют только заряженные частицы.

Магнетизм, так же, как и электричество, обнаружили в природе древние греки. Действие кусков магнитного железняка друг на друга было им известно в VI веке до н.э. Через пять веков китайцы изобрели компас, воспользовавшись способностью магнитного железняка ориентироваться в пространстве определенным образом. К концу XVI века У. Гильберт, личный врач английской императрицы Елизаветы - I, доказал, что Земля ведет себя как большой магнит и что существуют две разновидности магнетизма, которые в соответствии с магнетизмом Земли получили название северного и южного полюсов. Как и электрические заряды, одноименные магнитные полюса отталкиваются, а разноименные –

притягиваются. Однако в отличие от электрических зарядов, магнитные полюса встречаются не по отдельности, а парами – северный и южный полюс. В обычном магните (стержне) один конец действует, как северный полюс, а другой – как южный. Если его разрезать пополам, то на месте разреза возникнут новые северный и южный полюса. Все попытки получить изолированный магнитный полюс – монополюс окончились неудачей.

Взаимодействие магнитных полюсов так же, как и в случае электрических или гравитационных сил, подчиняется закону обратных квадратов. Электрические и магнитные силы – дальнедействующие и проявляются далеко от источника.

В начале XX века выяснилось, что между электричеством и магнетизмом существует глубокая связь. Датский физик Х.К. Эрстед открыл, что электрический ток создает вокруг себя магнитное поле, а М. Фарадей показал, что переменное магнитное поле индуцирует в проводнике электрический ток. Решающий шаг в познании электричества сделал в 50^{ые} годы XX века Дж. К. Максвелл, объединивший электричество и магнетизм единой теорией электромагнитного поля.

2.3. Слабое взаимодействие

Человечество наблюдало проявление слабого взаимодействия в незапамятные времена, не осознавая этого. Так, в 1054 г. китайские астрономы зафиксировали появление новой яркой голубой звезды, светившей несколько недель. Современная физика считает эту вспышку взрывом сверхновой – гигантским взрывом старой звезды, вызванным коллапсом его ядра, сопровождающимся испусканием ливня нейтрино. Обладающие только слабым взаимодействием, эти нейтрино образовали облака расширяющегося газа. Ныне сверхновая 1054 г. наблюдается в виде туманного пятнышка в созвездии Тельца. Сверхновые – редкий случай зримого проявления слабого взаимодействия. Оно значительно уступает по величине всем взаимодействиям, кроме гравитационного, и обычно его эффекты оказываются в тени электромагнитного и сильного взаимодействий.

Систематическое изучение слабого взаимодействия началось после 1896 г., после того как А. Беккерелем по почернению фотопластинки кристаллами сульфата урана была открыта радиоактивность. Затем, исследования Э. Резерфорда показали, что радиоактивные атомы испускают частицы двух типов, которые назвали альфа - и бета - излучениями. В деталях бета - радиоактивность оставалась не до конца понятной вплоть до 30-х годов. Казалось, что в этом распаде нарушается фундаментальный закон природы – закон сохранения энергии. Часть энергии исчезала. Закон сохранения энергии "спас" В. Паули, предположив, что вместе с электроном при бета - распаде вылетает ещё одна частица – нейтральная и обладающая высокой проникающей способностью. Эту частицу, уносящую недостающую энергию, Э. Ферми назвал нейтрино.

Однако загадочность не исчезала. Электроны и нейтрино испускались нестабильными ядрами, но физики были уверены, что внутри ядер таких частиц нет. Откуда же они возникали? Ферми предположил, что электроны и нейтрино не существуют в ядре в "готовом виде", а образуются непосредственно перед вылетом за счёт энергии, запасенной радиоактивным ядром. Было показано, что нейтроны могут распадаться на протон, электрон и нейтрино. Известные силы не могли привести к такому распаду. Бета - распад вызывался какой-то иной силой. Измерения скорости бета - распадов показали, что соответствующее этой силе взаимодействие слабое: гораздо слабее электромагнитного, хотя и сильнее гравитационного.

С открытием нестабильных субъядерных частиц физики обнаружили, что слабое взаимодействие вызывает множество других превращений. Большинство известных частиц участвуют в слабом взаимодействии. Для неуловимого нейтрино слабое взаимодействие – единственный способ проявить себя.

По своему характеру слабое взаимодействие совершенно не похоже на гравитационное или электромагнитное. Во-первых, если не считать таких явлений, как взрыв сверхновых, оно не создает "тянущих" или "толкающих" усилий, как в механике. Тем не менее, слабое взаимодействие вызывает превращения одних частиц в другие, часто приводя продукты реакции в движение с высокими скоростями. Во-вторых, оно ощутимо только в областях пространства чрезвычайно малой протяженности. Сначала считали, что слабое взаимодействие вообще точечное, но в начале 80-х годов был измерен его радиус действия: $\sim 10^{-16}$ см. Поскольку на больших расстояниях слабое взаимодействие прекращается, в отличие от дальнедействующих сил гравитации и электромагнетизма, то оно не может влиять на макроскопические частицы, а проявляется лишь на субатомном уровне.

Теория слабых взаимодействий, разработанная Э. Ферми совместно с сотрудниками в начале 30^{ых} годов, продолжает непрерывно совершенствоваться, включая в себя новейшие достижения физики высоких энергий.

2.4. Сильное взаимодействие

Представления о сильном взаимодействии постепенно складывались по мере того, как прояснялась структура атомного ядра. Что-то должно было удерживать протоны в ядре, не позволяя им разлетаться под действием электростатического отталкивания (гравитация для этого слишком слаба). За пределами ядра сильное ядерное притяжение не ощущается, поэтому радиус действия новой силы должен быть очень мал. Действительно, сильное взаимодействие падает на расстоянии от протона или нейтрона, превышающем 10^{-13} см. Поэтому, хотя по своей величине сильное взаимодействие существенно превос-

ходит все остальные фундаментальные взаимодействия, оно не может непосредственно проявляться в макроскопических явлениях.

Сильному взаимодействию подвластны протоны и нейтроны, а электрон, нейтрино и фотоны – нет. Вообще в сильном взаимодействии участвуют только более тяжёлые частицы (андроны). Проявляется оно не только, как обычное притяжение, не позволяющее разваливаться ядру, но и как сила, вызывающая распад некоторых нестабильных частиц. Сильное взаимодействие является источником огромной энергии. Термоядерные реакции, протекающие в недрах Солнца и звёзд, ядерная энергетика, взрыв водородной бомбы – примеры энергии, освобождаемой при сильном взаимодействии.

Математическое описание сильного взаимодействия связано с большими трудностями. Зависимость его от расстояния оказалась весьма сложной и требовала введения множества произвольных параметров. Казалось даже, что сильное взаимодействие является просто сплавом различных взаимодействий с резко отличающимися свойствами.

В начале 60^{ых} годов была предложена кварковая модель, в которой нейтроны и протоны рассматриваются не как элементарные частицы, а как составные системы, построенные из трёх кварков (сейчас их уже открыто пять и ожидается шестой). Чтобы они не распадались, необходима удерживающая сила, некий "клей". Оказалось, что результирующее взаимодействие между нейтронами и протонами представляет собой остаточный эффект более мощного взаимодействия между кварками. Это объяснило, почему сильное взаимодействие оказывается столь сложным. Ведь, когда протон «прилипает» к нейтрону или другому протону, во взаимодействии участвуют шесть кварков, каждый из которых взаимодействует с остальными. Как только удалось понять физическую природу сильного взаимодействия, его стало легче моделировать математически.

2.5. Связь фундаментальных взаимодействий и единство Вселенной

Уже более столетия физики ясно осознают единую природу четырёх фундаментальных взаимодействий, совместно и согласованно управляющих Вселенной. В чем же это единство заключается?

Если бы взаимодействия отсутствовали, то частицы материи двигались бы независимо, не подозревая о существовании других. Благодаря взаимодействиям, частицы обретают способность распознавать другие частицы и реагировать на них. Взаимодействия и частицы связаны друг с другом, и понять природу одних без должного понимания природы других просто невозможно.

С увеличением масштаба относительное значение каждого из четырёх взаимодействий меняется. На уровне кварков и атомных ядер доминируют два ядерных взаимодействия: сильное и слабое. При этом сильное взаимодействие связывает кварки в протоны и

нейтроны и не позволяет атомным ядрам разваливаться. На уровне атомов преобладает электромагнитное взаимодействие, связывающее электроны с ядрами и обеспечивающее объединение атомов в молекулы. Большая часть сил, с которыми мы имеем дело в нашей повседневной жизни (толчок от удара мячом, натяжение проволоки и т.д.), – это примеры макроскопического проявления электромагнитного взаимодействия. В астрономических масштабах господствующим становится гравитационное взаимодействие. Таким образом, каждое взаимодействие вступает в свои права, начиная с определенного уровня масштаба, и играет важную роль в формировании характерных особенностей природы этого уровня.

Особенно важно то, что сами взаимодействия оказываются универсальными. Так, силу электромагнитного взаимодействия в удалённых квазарах можно определить по их оптическим спектрам, и оказывается, что заметного различия с электромагнитными взаимодействиями, наблюдаемыми в лабораторных условиях, нет.

Более того, современные естествоиспытатели все более склоняются к мысли, что все четыре взаимодействия являются различными проявлениями единой суперсилы. Представления о различной природе четырёх сил сложилось потому, что мы обычно имеем дело с миром относительно низких энергий, а лишь с увеличением энергии взаимодействия объединяются. Прежде всего, объединяются электромагнитное и слабое взаимодействия. Это происходит при энергиях, эквивалентных примерно 90 массам протона, что соответствует (конечно, условно) температуре примерно 10^{14} К. Существующие ускорители как раз позволяют достичь таких энергий. Последующее объединение электрослабого и сильного взаимодействий, а, в конечном счёте, и гравитации невозможно, пока не будут получены более высокие энергии. Для этого необходима энергия масштабов массы, в триллионы раз превышающей масштаб электрослабого взаимодействия.

С этой точки зрения ранняя Вселенная представляла собой гигантскую лабораторию, в которой энергия, высвободившаяся в результате Большого взрыва, пробудила физические процессы, не воспроизводимые в земных условиях. Тепловая энергия оказалась достаточной для рождения всех известных частиц и античастиц. Вещество, по-видимому, представляло собой на этой стадии "кварковую" жидкость, в которой кварки двигались довольно независимо. Падение температуры вызвало затем своеобразные "фазовые" превращения. Возникают известные нам частицы – электроны, нейтрино, фотоны и кварки, которые уже различимы. Электромагнитное взаимодействие начинает при этом отличаться от слабого.

Дальнейшая эволюция приводит к возникновению протонов, нейтронов, мезонов и других сильновзаимодействующих частиц, в которых кварки уже объединены. В резуль-

тате вещество превращается в знакомую нам смесь протонов, нейтронов, электронов, нейтрино и фотонов, и открывается прямой путь для синтеза гелия.

Все более тяжелые элементы нашей природы постепенно образовывались на последующих стадиях ядерного синтеза. Этим объясняется, почему тяжелые ядра так редки (90% космического вещества приходится на долю водорода, затем почти 10% составляет гелий – простейший после водорода элемент, а на долю всех остальных химических элементов, вместе взятых, приходится менее 1%). Реакции ядерного синтеза могут протекать только при температурах, при которых преодолимо отталкивание электрически заряженных ядер. Чем больше протонов в ядре, тем сильнее отталкивание между ядрами.

Так понимание процесса образования химических элементов и взаимодействий между частицами различного рода открывает перед нами тайну образования материи. Вселенная предстает перед нами, как единое, самосогласованное и однородное целое, в котором царит единый универсальный закон взаимодействия, проявляющийся при низких энергиях частиц в четырех облициях (четырёх видах фундаментальных взаимодействий).

Пространственный и временной порядок – также, конечно, неслучайные особенности мира, оба этих порядка присущи фундаментальным физическим законам. Именно законы, а не конкретные физические системы заключают в себе поразительную упорядоченность природы. Порядок, заключающийся в простоте и симметрии, проявляется и в пространстве, и во времени. Кристаллическая решетка является классическим примером пространственного порядка. В основе кристаллической структуры лежит атомная ячейка определенного типа, отражающаяся в симметричной форме. Другим примером пространственного порядка является строение Солнечной системы, в которой планеты почти сферической формы обращаются по почти круговым орбитам вокруг почти сферического Солнца.

В обоих этих примерах причины пространственного порядка лежат в симметрии законов физики. Одной из причин высокой степени простоты и симметрии природы является то, что сложные состояния неустойчивы. Например, состояние атома водорода с наименьшей энергией сферически симметрично, тогда как возбужденные состояния не обладают этим свойством. Аналогично, под действием гравитации тело принимает в состоянии равновесия форму идеального шара. Физические системы стремятся занять положение с минимальной энергией: если система обладает избытком энергии, то включаются разнообразные механизмы, стремящиеся избавиться её от этого избытка и перейти в состояние с наименьшей энергией, которое, как правило, является простейшим. По этой причине пространственный порядок представляет собой общее свойство нашего мира. Мы видим, что он обусловлен пространственным порядком, присущим законам физики. Если бы, напри-

мер, сила тяжести оказалась бы более сложной и зависела бы не только от расстояния между телами, но и от их взаимной ориентации, то планеты двигались бы по гораздо более запутанным орбитам (на самом деле для запутанности орбит достаточна любая зависимость отличная от обратно квадратичной, но именно эта единственная "простая" зависимость и имеет место в гравитации).

Обратимся теперь к временному порядку. Его можно увидеть во многих процессах: тиканье часов, смена дня и ночи, колебания волн. Причины подобной регулярности опять же скрыты в законах физики, которые часто допускают в качестве единственно возможного (устойчивого) динамического состояния только простое периодическое поведение. Повторяемость представляет собой, наверное, самый распространенный в физике пример временного порядка. Волны с периодическим изменением в пространстве и времени составляют основу описания квантовых систем, электромагнитные волны переносят теплоту и свет во Вселенной, планеты и звёзды движутся в пространстве по замкнутым (и потому повторяющимся) орбитам.

Еще более глубокое проявление порядка заключено в самом существовании фундаментальных законов природы, которые потому и фундаментальные, что не зависят от места и времени их действия. Благодаря этому обеспечивается самосогласованная последовательность эволюции Вселенной. Земля движется вокруг Солнца так же, как раньше, хотя уже и солнечная система в другом месте Вселенной и времени прошло больше пяти миллиардов лет. Не будь такой устойчивой стабильности, разве смогла бы возникнуть такая легко уязвимая и удивительно глубоко упорядоченная структура, как земная цивилизация?

Анализ фундаментальных взаимодействий показывает, что между реальностями микро- и макромира существует определенная связь. Нельзя отделять квантовую реальность от структуры всей Вселенной, и состояние отдельной частицы имеет смысл только, когда она рассматривается в рамках единого целого. Большое и малое, глобальное и локальное, космос и атом – все это взаимосвязанные и неразделимые стороны единого целого. Вселенная это не просто сумма своих частей. Она обладает единством, гораздо более глубоким, чем, например, простое утверждение об однородности Вселенной. Новая физика отвергла лапласовский детерминизм: попытку свести все разнообразие природы к предсказуемому в классическом смысле движению миллиардов атомов. К счастью, природа оказалась значительно интересней: она и сама не знает, когда возбуждённый атом излучит фотон, поскольку виновник этого излучения – электрон сначала "советуется" со всей Вселенной, "чувствуя её", а уже затем переходит в своё основное состояние. Очевид-

но, что в так устроенном мире только подход к системе как целому даёт возможность познать тайны макро - и микромиров.

Литература

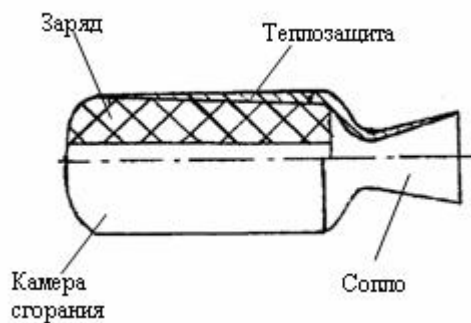
1. *Девис П.* Случайная Вселенная. –М.: Мир, 1985.
2. *Девис П.* Суперсила. –М.: Мир, 1989.
3. *Кузнецов Б.Г.* Основы теории относительности и квантовой механики. –М.: Изд-во АН СССР, 1957.
4. *Леулвей.* Фундаментальная структура материй. –М.: Мир, 1984
5. *Мерион Дж. Б.* Физика и физический мир. –М.: Мир, 1975.
6. *Месси Г.* Новая эра в физике. –М.: Госатомиздат, 1963.
7. *Нерсесов Э.А.* Основные законы атомной и ядерной физики. –М.: Высшая школа, 1988.
8. *Окунь Л.Б.* Элементарное введение в физику элементарных частиц. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2006.
9. *Фейнман Р.* Характер физических законов. –М.: Мир, 1968.

III. КЛАССИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА И КОСМОНАВТИКА

Выход человека в космос и его полёт к другим планетам (пока только посещение Луны) навсегда остались бы в области несбыточных мечтаний без предварительного построения человечеством удивительно стройной и логически завершённой теории механического движения абсолютно твердых тел и деформируемых сред со скоростями, малыми по сравнению со скоростью света (классической механики). Практически решения всех основных проблем, которые возникают при осуществлении космических путешествий, так или иначе, используют результаты этой теории. Некоторые из наиболее характерных примеров такого использования и предполагается рассмотреть при дальнейшем кратком изложении основ космонавтики. **Космонавтика** представляет собой совокупность различных областей науки и техники, обеспечивающих исследование и освоение космического пространства с помощью космических летательных аппаратов. Основой космонавтики являются **космодинамика** (часть небесной механики, занимающаяся теорией движения космических кораблей) и **ракетная техника**. Далее будут затронуты вопросы лишь этих двух основных разделов космонавтики. Вне рассмотрения останутся очень важные для космонавтики, но менее близкие к классической механике проблемы космической медицины и биологии, космической связи, жизнеобеспечения космического корабля, а также многие другие вопросы и задачи.

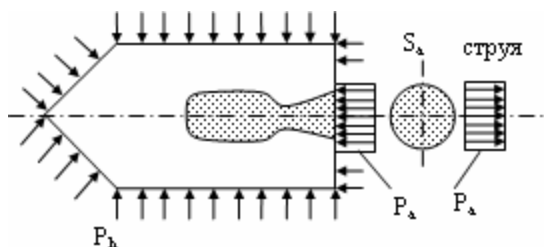
3.1. Реактивный принцип движения. Двигательные системы для космических полётов

Во всех привычных для нас видах транспорта окружающая среда участвует в обеспечении движения. Вертолёт отталкивается винтом от воздуха, самолёт использует подъёмную силу, возникающую при обтекании воздухом крыла, автомобиль стремится оттолкнуть колесами грунт, т.е. реализуется на практике третий закон Ньютона – сила, приложенная к "опоре" равна по величине и обратна по направлению силе реакции "опоры". Во всех случаях между преобразователем энергии – **двигателем** – и отбрасываемой массой (воздухом, грунтом, водой и т.д.) мы имеем промежуточный передаточный элемент или **движитель** – винт, крыло, колесо. Но как поступить, если окружающей среды, или "опоры" нет? Тогда для создания силы, действующей на средство передвижения, остается лишь один путь – использовать все тот же третий закон Ньютона, отбрасывая часть массы самого средства передвижения, создавая силу, действующую на его оставшуюся часть. Это реализуется в ракетном двигателе: на борту запасается расходуемая в дальнейшем



масса вещества – топлива, химическая энергия которого при сгорании преобразуется в потенциальную энергию высокотемпературных продуктов сгорания, переходящую, в свою очередь, в кинетическую энергию истекающей струи газа. Этот газ, или **рабочее тело**, и является той самой отбрасываемой массой, действующей с некоторой силой на транспортное средство и обеспечивающей его передвижение. Равнодействующая всех внешних поверхностных сил, приложенных к двигателю, называется **силой тяги**. Простейшим вариантом реализации реактивного принципа движения является пороховая ракета, представляющая собой полужамкнутую камеру, в которой при горении пороха образуются газы, истекающие (создавая при этом силу тяги) через специальным образом спроектированный раструб, именуемый соплом Лавалья. Рабочим телом могут служить не только пороховые газы, но и продукты сгорания жидкого топлива, продукты каталитического разложения веществ, ионы металлов, плазма и др.

3.2. Основы теории ракетных двигателей



Если мысленно отбросить струю истекающих газов за пределами крайнего среза-сопла и заменить ее некоторой силой, то, суммируя все силы давления, действующие на внутреннюю и внешнюю поверхность камеры сгорания, получим выражение для тяги двигателя

ражение для тяги двигателя

$$P = \int_S p ds \cos(\mathbf{n}, \mathbf{x}) = \frac{dm}{dt} u_a + S_a (p_a - p_h), \quad (1.1)$$

где $\frac{dm}{dt}$ - количество массы, отбрасываемой в единицу времени, или массовый расход топлива; u_a - скорость истечения продуктов сгорания; S_a - площадь крайнего среза сопла; p_h , p_a - наружное давление на высоте h и давление продуктов сгорания на срезе сопла (см. рисунок).

Нетрудно заметить, что при фиксированном массовом расходе топлива и постоянной скорости истечения тяга двигателя увеличивается с уменьшением давления окружающей среды (увеличением высоты полёта). Зависимость тяги двигателя от высоты, называемая высотной характеристикой, описывается соотношением (1.1). При старте с Земли тяга имеет наименьшее значение, с ростом высоты полёта она, постепенно увеличиваясь на 10...15%, достигает в пределах своего пустотного значения и далее остается постоянной. Определяющую роль в высотной характеристике играет степень расширения газа в сопле.

Зависимость тяги двигателя от секундного весового расхода топлива $G = g_0 \frac{dm}{dt}$

при прочих неизменных параметрах называется **дроссельной характеристикой**. Эту зависимость можно получить из уравнения для тяги (1.1), полагая, неизменными наружное давление и размеры площади среза сопла, а также приняв во внимание тот факт, что давление в камере пропорционально расходу. В соответствии с полётным заданием или для компенсации внешних возмущений, приводящих к отклонению скорости ракеты от заданной, возникает необходимость изменения тяги. Основой для такого рода регулирования как раз и является дроссельная характеристика.

В качестве интегрального параметра, характеризующего степень совершенства двигателя, служит пустотная удельная тяга ($p_h = 0$):

$$P_{yn} = \frac{P}{G} = \frac{u_a}{g_0} + \frac{S_a P_a}{G}$$

Следует отметить, что пустотная удельная тяга существенно зависит от компонентов топлива двигателя. Так, для твердых топлив его величина составляет 290с-340с, для углеводородных горючих в сочетании с азотным тетраоксидом или жидким кислородом – 350с-370с, для жидкого водорода и жидкого кислорода – 450 с.

Ещё Ньютон рассчитал, что для движения по замкнутой орбите вокруг нашей планеты снаряду нужно сообщить весьма значительную по земным масштабам первую космическую скорость, равную почти 8 км/с. Её можно достичь с помощью ракетного двигателя, сжигая находящееся на борту топливо и отбрасывая его с некоторой скоростью. Движение ракеты, как тела переменной массы, описывается хорошо известным уравнением Мещерского. Если пренебречь действием внешних сил (идеальные условия полета), то интегрируя это уравнение в случае постоянной скорости отбрасываемой массы u_a , можно получить **первую формулу Циолковского**, определяющую конечную скорость ракеты V:

$$V_k = u_a \ln \left(\frac{M_o}{M_k} \right) = -u_a \ln (m_k),$$

где M_o - начальная масса ракеты; M_k - конечная масса ракеты; $m_k = M_k / M_o$ - относительная конечная масса.

Из формулы Циолковского следует, что для достижения возможно большей скорости ракеты V_k значительно эффективнее увеличивать относительную скорость отбрасываемой массы, чем наращивать запасы топлива или стартовую массу ракеты (логарифм растёт медленнее линейной функции). Однако когда все возможности по увеличению скорости отбрасывания массы исчерпаны, приходится использовать второй путь, обеспечи-

вающий рост конечной скорости, – уменьшение пассивной массы, т.е. массы конструкции. Для оценки массового качества конструкции часто используется безразмерный коэффициент массового качества a_k , определяемый как отношение:

$$a_k = \frac{M_k - M_{nz}}{M_o - M_{nz}} = \frac{m_k - m_{nz}}{1 - m_{nz}},$$

где M_{nz} , m_{nz} – абсолютная и относительная массы полезного груза. Уменьшение a_k является одной из основных задач конструкторов ракет, его значение определяется не только их опытом и конструкторским мастерством, но и общим уровнем науки и техники того государства, в котором разрабатывается ракета-носитель (РН). Например, для первой немецкой ракеты "Фау-2" $m_k = 0,3$ и $a_k = 0,25$, а для современных ракет коэффициент массового качества достигает значений $a_k = 0,06 - 0,08$ (величина $a_k = 0,05$ в настоящее время рассматривается как верхний, практически недостижимый предел). Значение m_k зависит от задачи, выполняемой РН (в частности, массы полезного груза), и для существующих одноступенчатых ракет меняется в диапазоне. 0,15 - 0,35. Если скорость истечения принять равной 4400 м/с (это значение соответствует предельным энергетическим возможностям химических ракетных топлив), то при самой малой требуемой относительной массе полезного груза ($m_k = 0,15$) из формулы Циолковского получаем:

$$V_k = -u_a \ln(m_k) = 4400 \text{ м/с} \times \ln(0,15) \approx 8350 \text{ м/с}.$$

Хотя полученная величина конечной скорости даже несколько больше первой космической, но, с учётом возможных потерь на тяготение и аэродинамическое сопротивление (при выводе формулы Циолковского действием внешних сил пренебрегалось), можно сделать вывод, что задача запуска искусственного спутника Земли находится на пределе возможностей одноступенчатых РН с реактивными двигателями на химическом топливе.

Основной недостаток одноступенчатой РН заключается в необходимости сообщения заданной скорости не только полезному грузу, но и всей конструкции в целом, включая и те её части, которые уже своё функциональное назначение выполнили. По техническим соображениям избавляться от отработавших частей конструкции приходится дискретно, путём сброса опорожненных топливных баков (конечно, более эффективно было бы производить эту операцию непрерывно, как это имеет место, например, в лазерной ракете, разгоняемой в результате её испарения по действием лазерного излучения посылаемого от внешнего источника (например, с Земли или самолета)). Под многоступенчатой РН, вообще говоря, и понимается ракета, производящая в процессе своего полёта частичный сброс топливных баков и двигателей, выполнивших свою функцию. Каждая после-

дующая ступень даёт увеличение скорости согласно формуле Циолковского, но написанной уже только для оставшейся части:

$$V_k = -u_{a1} \ln(m_{k1}) - u_{a2} \ln(m_{k2}) - u_{a3} \ln(m_{k3}) - \dots - u_{an} \ln(m_{kn}),$$

где n - число ступеней ракеты; $u_{a1}, u_{a2}, u_{a3}, \dots, u_{an}$ - скорости истечения для двигателей соответствующих ступеней; $m_{k1}, m_{k2}, m_{k3}, \dots, m_{kn}$ - отношение массы соответствующей ступени без топлива для двигателя этой ступени к полной массе ступени. В частном случае для двухступенчатой РН с $m_{k1} = m_{k2} = m$ и $u_{a1} = u_{a2} = u$ получаем

$$V_{k2} = -2u \ln(m).$$

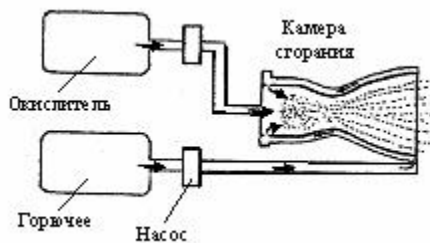
Если массу не отбрасывать, то, выражая конечную скорость одноступенчатой РН V_{k1} через u и m , находим

$$V_{k1} = -2u \ln \left(m \sqrt{\frac{k}{1 + (k-1)m}} \right)$$

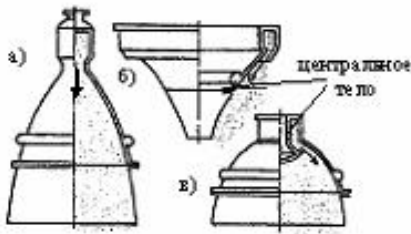
где k - коэффициент уменьшения сухой (без топлива) массы ракеты после разделения ступеней (при $k = 1$ масса не отбрасывается). Следовательно, в этом частном случае увеличение скорости при переходе от одноступенчатой РН к двухступенчатой составляет

$$\frac{V_{k2}}{V_{k1}} = \frac{\ln(m)}{\ln \left(m \sqrt{\frac{k}{1 + (k-1)m}} \right)}$$

В пределе при $k \rightarrow \infty$ получаем наибольший возможный выигрыш в скорости $V_{k2}/V_{k1} = 2$. Поэтому, в отличие от одноступенчатой ракеты, составная РН на химическом топливе достаточно просто решает задачу выведения спутника на околоземную орбиту (первый искусственный спутник Земли был выведен в 1957г. именно двухступенчатой РН).



Рассмотрим теперь пути повышения скорости истечения u_a применительно к наиболее распространенным в настоящее время жидкостным ракетным двигателям (ЖРД), преобразующим химическую энергию жидкого топлива в кинетическую энергию продуктов его сгорания. Принципиальная схема ЖРД приведена на рисунке. Для ускорения продуктов сгорания обычно используется круглое профилированное сопло Лавала, обеспечивающее разгон газа до сверхзвуковых скоростей в несколько тысяч метров в секунду. Возможно, применение различных вариантов сопел с центральным телом, позволяющих существенно



Основные типы камер ЖРД:
 а) обычная с соплом Лавали; б) кольцевая с соплом кольцевого расширения; в) кольцевая с соплом внутреннего расширения

уменьшить размеры двигателя, но обладающих рядом конструктивных и технологических недостатков (см. рисунок).

При адиабатическом движении вдоль струйки в сопле Лавали увеличение кинетической энергии единицы массы газа происходит лишь благодаря уменьшению его энтальпии I и их сумма сохраняется

$$I + \frac{V^2}{2} = const.$$

(3.2)

В свою очередь, уменьшение энтальпии сопровождается падением температуры (в случае идеального газа температура и энтальпия вообще пропорциональны), что согласуется с теоремой Карно, в соответствии с которой для получения наибольшего КПД тепловой машины (каковой, безусловно, является и химический ракетный двигатель) необходимо обеспечить максимальную разность температур (в данном случае температуры в камере сгорания и температуры покидающих сопло газов). Для идеального газа из (3.2) следует формула для скорости истечения газа из сопла

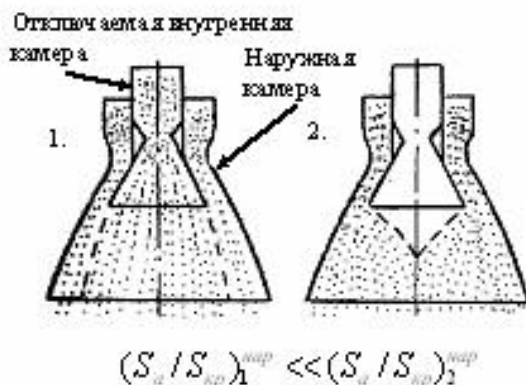
$$u_a = \sqrt{2 \frac{g}{g-1} \frac{R}{m} T_k \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_k} \right)^{\frac{g-1}{g}} \right]}, \quad (3.3)$$

где $g = \frac{C_p}{C_v}$ – показатель адиабаты; $\frac{R}{m}$ – газовая

постоянная; T_k – температура газа в камере; p_k , p_a – давление газа в камере и на срезе сопла.

Согласно (3.3) рост скорости истечения продуктов сгорания может быть достигнут путём увеличения степени расширения газа p_k / p_a . Как

показывают расчёты на основе соотношений механики сплошных сред, степень расширения



определяется отношением площади выходного сечения сопла к его минимальной площади сечения (площади критического сечения) и растёт с увеличением S_a / S_{kp} . Однако увеличение площади выходного сечения сопла S_a (от S_{kp} зависит давление, которое устанавливается в камере сгорания, и оно задаётся из других условий) ограничено по конструктив-

ными соображениям. Сейчас рассматривается возможность создания так называемых двухконтурных двигателей. Их главным достоинством является обеспечение значительной степени расширения газов при отключении внутренней камеры сгорания (после выработки топлива на начальном этапе выведения, см. рисунок).

Второй путь увеличения скорости истечения газа – повышение температуры T_k в камере сгорания (см. формулу (3.3)). В современных двигателях температура газа в камере сгорания в зависимости от вида топлива и соотношения компонентов достигает $3500...4000^\circ \text{К}$. Очевидно, без специальных способов охлаждения невозможно обеспечить не только прочность (давление в камере достигает 250 атм.), но и существование большинства материалов в твердом состоянии. Напрашивается единственный выход – охлаждение, и его можно осуществить аккумуляцией тепла в массе конструкции, изготовленной из материала с большим коэффициентом теплопроводности I (большая величина I требуется для обеспечения теплоотвода от нагреваемой газами поверхности, т. к. по закону Фурье тепловой поток q определяется произведением I на скоростью изменения температуры в направлении её наибольшего роста $\frac{\partial T}{\partial n}$: $q = -I \frac{\partial T}{\partial n}$; при этом в наиболее теплонапряженных частях сопла q достигает величины $\sim 50 \text{ МВт/м}^2$). Но способ охлаждения посредством аккумуляции применим лишь в отношении небольших двигателей с малым временем работы (в силу сильных ограничений по массе конструкции). Другой способ охлаждения, имеющий большое распространение не только в ракетной технике – проточное охлаждение стенок камеры какой-либо жидкостью. В жидкостных ракетных двигателях для этого, как правило, используется один из компонентов топлива, имеющий большую температуру кипения.

До сих пор мы рассматривали внутриводительные процессы, определяющие, в той или иной мере, конечную скорость ракеты. Теперь остановимся на внешних по отношению к ракете силовых факторах, обуславливающих потерю конечной скорости.

Приведенное выше уравнение Циолковского записано для случая отсутствия внешних сил, в частности, гравитационных. При учёте гравитации из уравнения Мещерского получается **вторая формула Циолковского**:

$$V = u_a \left(1 - \frac{g}{a_o} \right) \ln(m_k),$$

где a_o – ускорение ракеты, предполагаемое постоянным $(-u_a \frac{1}{m} \frac{dm}{dt} = a_o)$.

Видно, что конечная скорость ракеты, движущейся в гравитационном поле Земли, тем больше, чем больше её ускорение, определяемое величиной тяги двигателей. Поэтому

увеличение тяги двигателей необходимо для достижения максимально возможной конечной скорости. В то же время рост начальных перегрузок приводит к увеличению действующих на ракету в полёте нагрузок, что требует повышения прочности конструкции и, как следствие, росту пассивной массы. Оптимальной начальной перегрузкой для существующих пилотируемых РН (где накладываются дополнительные ограничения по допустимым для экипажа перегрузкам) считается диапазон $a_o / g = 1,3...1,6$.

Рассмотрим еще одну силу, действующую на ракету в полете – аэродинамическую, точнее, её основную составляющую – силу лобового сопротивления, складывающуюся из суммы сил трения и давления. Их величина зависит от плотности воздуха, скорости полета ракеты и конструктивных особенностей (формы) РН:

$$X_{mp} = \int_s p_{mp} \sin(\alpha) dS = c_{xmp} \frac{\rho v^2}{2} S,$$

$$X_d = \int_s p_d \cos(\alpha) dS = c_{xd} \frac{\rho v^2}{2} S,$$

где p_{mp} , p_d - отнесенные к единице площади поверхности силы трения и давления; c_{xmp} , c_{xd} - безразмерные коэффициенты лобового сопротивления, зависящие от формы РН; ρ - плотность воздуха; v - скорость ракеты; S - площадь проекции ракеты на плоскость, перпендикулярную её оси симметрии (миделево сечение). Силы давления, действующие на ракету, легко записываются в виде суммы статического давления атмосферы и некоторого избыточного давления, определяемого из уравнения Бернулли. Максимальное действие аэродинамических сил имеет место на высоте 15...20 км. Трудно себе представить, как выдерживает полётные нагрузки ракета среднего класса (РН типа "Союз", "Зенит", "Сатурн", "Ариан-4", выводящие на околоземную орбиту полезную нагрузку 5...12 тонн), если её стартовая масса 300...500 тонн и на неё действуют в осевом направлении с одной стороны сила тяги двигателей (в несколько раз превышающая вес ракеты на старте), а с другой – силы аэродинамического сопротивления в десятки тонн. Здесь встаёт сложнейшая задача механики деформируемых сред, по обеспечению устойчивости и прочности такой цилиндрической достаточно протяженной (похожей на полый стержень с длиной около 50 метров, и диаметром 3,5...6,5 метров) конструкции при условии, что толщина стенок, как правило, не превышает 5 мм!

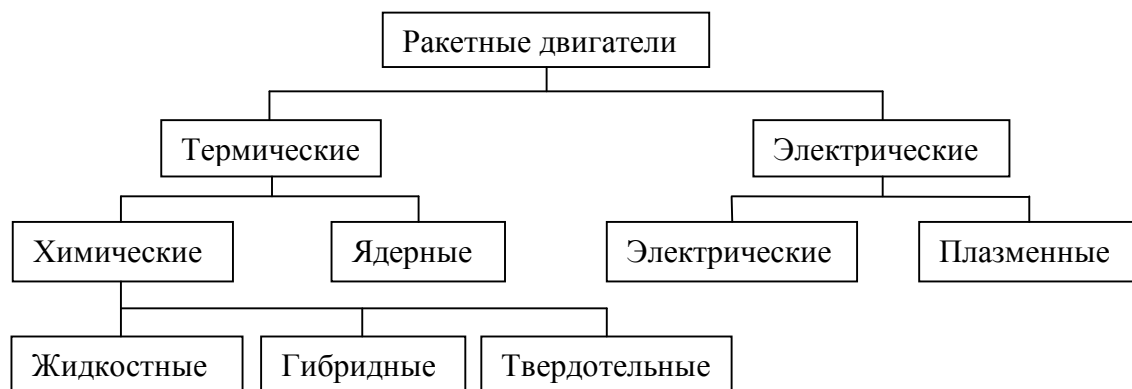
Достаточно общим критерием, по которому можно в целом судить о степени совершенства ракеты-носителя, является относительная масса полезного груза, выводимого на низкую околоземную круговую орбиту ($h = 200\text{км}$)

$$m_{nz}^{200} = \frac{M_{nz}}{M_o}$$

Для большинства существующих ракетных систем этот показатель находится в области 1,5...3 %. Наиболее совершенной РН остаётся американская ракета "Сатурн-5", позволившая совершить вояж на поверхность Луны при относительной массе полезного груза $m_{nz}^{200} = 4,7\%$. Для сравнения эта величина составляет для РН: "Космос" – 1,417%, "Союз" – 2,21%, "Зенит" – 2,7%, "Протон" – 2,96%, "Энергия" – 4,2%, "Сатурн - 1" – 2%, "Ариан-4" – 2%

3.3. Краткая характеристика ракетных двигателей.

На современном техническом уровне в ракетных двигателях (РД) может быть использована энергия, запасенная в ядерной, электрической, тепловой или химической формах. Подавляющее большинство применяемых на практике двигателей используют химическую энергию – химическое топливо в жидком (жидкостные РД), твердом (твердотопливные РД) или комбинированном (гибридные РД) виде. Общая классификация двигателей представлена на рисунке.



Химические двигатели считаются достаточно хорошо отработанными элементами ракетно-космических систем. Их неоспоримым достоинством является малая по отношению к создаваемой тяге масса конструкции. Это чрезвычайно важно для РН, чья главная задача – создать максимальную тягу, чтобы преодолеть поле тяжести Земли и вывести на орбиту возможно большую полезную нагрузку. В соответствии с этой задачей химические РД создают реактивные ускорения, в несколько раз превышающее ускорение свободного падения. Но для целей длительных межпланетных путешествий они оказываются малоэффективными и даже вообще непригодными. Дело в том, что такого рода путешествия не требуют больших тяг двигателей в течение короткого промежутка времени. Действуя долго и с малой тягой, нехимические РД в состоянии разогнать до больших скоростей массу с весом $P = mg_o$ значительно превышающим величину этой тяги. Химические двигатели в

условиях невесомости проигрывают, поскольку имеют принципиальные ограничения на скорость истечения, определяющую эффективность применения РД в космосе.

Ядерные тепловые двигатели по принципу действия практически не отличаются от химических. Рабочее тело нагревается за счет тепла, выделяющегося в результате внутриядерной реакции. Скорость истечения примерно обратно пропорциональна молекулярному весу рабочего тела m (см. формулу (3.3)) и поэтому превосходные результаты были получены в опытах с водородом и водой. Скорость истечения достигала $8...10$ км/с.

Гелиотермический двигатель использует в качестве источника энергии Солнце. Его лучи, концентрируемые с помощью зеркал, используются для нагрева рабочего тела, скорость истечения которого возможно достигнет 15 км/с. Другим внешним источником энергии может быть мощный наземный лазер, посылающий направленное излучение в определенное место космического аппарата, например теплообменник. Рабочим телом (в случае использования РД на средстве выведения) может служить даже окружающая атмосфера.

В **электротермических двигателях** нагретое до высокой температуры рабочее тело (водород) превращается в электрически нейтральную смесь положительных ионов и электронов – плазму. Нагрев может осуществляться, например, электрическим разрядом или в электрической дуге. Скорость истечения достигает $15...20$ км/с.

Ионные двигатели не имеют температурных ограничений, поскольку для создания тяги используют разгоняемые до больших скоростей (сотни км/с) частицы легко ионизируемых металлов, например, рубидия или цезия. Успешные испытания двигателей этого типа проводились в СССР и США.

1.4. Элементы космодинамики спутников

До сих пор мы говорили о физических вопросах, связанных с обеспечением возможности движения, т.е. о ракетной технике. Теперь рассмотрим само движение выведенного на орбиту космического аппарата (КА) – спутника. При неработающих РД движение КА описывается решением **кеплеровой задачи** (кеплеровой называют задачу о движении планет вокруг Солнца, в нашем случае роль Солнца играет Земля, а КА заменяет планету). Для получения этого решения воспользуемся законами сохранения полной механической энергии и момента импульса КА в потенциальном, центральном поле тяжести Земли. Поскольку радиус-вектор КА \vec{r} (его начало совпадает с центром Земли) перпендикулярен вектору момента импульса \vec{L} , который неподвижен в пространстве (благодаря закону сохранения момента импульса КА относительно центра Земли), то движение в кеплеровой задаче оказывается плоским. В полярных координатах (r, j) на плоскости движения зако-

ны сохранения записываются в виде (E , L -сохраняющиеся значения полной энергии и импульса; M , m – массы Земли и КА):

$$\begin{cases} \frac{m}{2} \left(\left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + r^2 \left(\frac{dj}{dt} \right)^2 \right) - g \frac{mM}{r} = E, \\ mr^2 \frac{dj}{dt} = L. \end{cases} \quad (3.4)$$

Исключая из системы уравнений время t и решая получившееся после исключения дифференциальное уравнение, можно найти зависимость $r = r(j)$, описывающую траекторию КА (при получении решения принималось., что угол j отсчитывается от положения радиус-вектора \vec{r} , при котором r имеет минимум; A - произвольная константа определяемая из начальных условий)

$$r = \frac{L^2}{g m^2 M} \left(1 + \frac{AL^2}{g m^2 M} \cos(j) \right)^{-1}. \quad (3.5)$$

Сравним (3.5) с уравнением конических сечений в полярных координатах с центром в фокусе (a - большая полуось; e - эксцентриситет)

$$r = a(1 - e^2)(1 + e \cos(j))^{-1}.$$

Они совпадают, если положить:

$$\frac{L^2}{g m^2 M} = a(1 - e^2), \quad A = \frac{e}{a(1 - e^2)}.$$

Следовательно, траекторией КА в поле тяжести Земли является коническое сечение (первый закон Кеплера). Из решения также получается, что при $E < 0$ коническое сечение будет эллипсом, при $E = 0$ – параболой, а при $E > 0$ – гиперболой. Итак, для любого спутника Земли его полная механическая энергия отрицательна и, как показывают вычисления, она зависит только от большой полуоси его орбиты, в то время как момент импульса определяется обоими параметрами эллипса e и a :

$$E = -g \frac{mM}{2a}, \quad L^2 = g m^2 M a (1 - e^2). \quad (3.6)$$

Легко сказать, что площадь заметаемая радиусом-вектором КА в единицу времени $\frac{dS}{dt}$ (секториальная скорость КА) находится по формуле:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{2} r^2 \frac{dj}{dt} = \frac{L}{2m}. \quad (3.7)$$

Поскольку согласно закону сохранения момента импульса $L = const$, то из (3.7) следует постоянство секториальной скорости $\frac{dS}{dt} = const$ (второй закон Кеплера).

За полный период обращения T радиус-вектор опишет всю площадь эллипса, которая может быть вычислена по-разному (используются соотношения (3.6), (3.7)):

$$S = p ab = p a^2 \sqrt{1 - e^2},$$

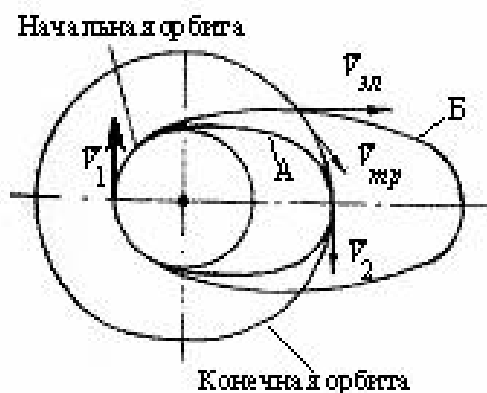
$$S = \frac{dS}{dt} T = \frac{LT}{2m} = \frac{T \sqrt{g M a (1 - e^2)}}{2}.$$

Приравнявая найденные для S выражения и возводя в квадрат, получаем после простых преобразований третий закон Кеплера:

$$\frac{a^3}{T^3} = \frac{g M}{4p^2} = const. \quad (3.8)$$

Таким образом, классическая механика позволяет достаточно просто получить экспериментально открытые Кеплером законы движения планет.

Как было показано, в зависимости от начальных условий (положения и конечной скорости ракеты) околоземная орбита может быть круговой ($e = 0$) или эллиптической ($0 < e < 1$; Земля находится в одном из фокусов эллипса). При больших скоростях (положительной полной механической энергии $E \geq 0$)

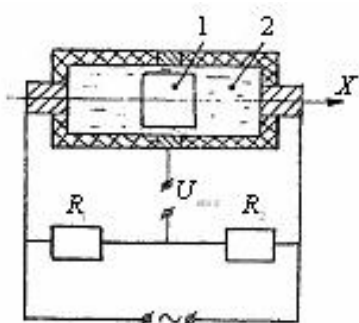


КА перестает быть искусственным спутником Земли и его орбита приобретает форму гиперболы или параболы. Расположение спутников на орбите диктуется их назначением. **Геостационарная круговая орбита** высотой около **36000 км** позволяет спутнику постоянно находиться над одной точкой земной поверхности. Высокая эллиптическая орбита (высота апогея (максимума r) порядка десятков тысяч километров, перигея (минимума r) – сотен километров) по третьему закону Кеплера позволяет спутнику большую часть времени своего существования на орбите находиться над определенным районом земного шара. Переход с одной круговой орбиты на другую с точки зрения минимальных затрат энергии осуществляется по переходному эллипсу **А**, касательному к начальной и конечной орбитам. Перелет по пересекающимся эллипсам **Б** (эллипсам быстрого перелета) требует больших энергетических затрат в первую очередь по причине необходимости изменения направления движения по достижении целевой орбиты (см. рисунок).

Говоря о движении ракеты как целевого объекта, выполняющего поставленную космодинамикой задачу, невозможно не затронуть вопрос об управлении полетом, а именно о чувствительных элементах системы управления (одно дело уметь рассчитать параметры траектории и совсем другое – добиться, чтобы в результате работы РН их приобрёл КА). Ракета летит по траектории, сведения о которой заложены в бортовой компьютер и оста-

ются неизменными в течение всего полета. Любые отклонения (по направлению или скорости полета) приведут к тому, что космический аппарат будет выведен на орбиту, отличную от требуемой, и поэтому должны быть определены и скомпенсированы. Для этого используется автономная **система инерциальной навигации**. Её чувствительными элементами являются инерционные приборы – **гироскопы** и **акселерометры**.

Гироскоп, как известно, представляет собой волчок (тело, имеющее ось симметрии), укрепленный в специальной подвеске и вращающийся с большой угловой скоростью вокруг своей оси симметрии. В классической механике его поведение исчерпывающе описывается уравнениями движения абсолютно твёрдого тела (уравнениями Эйлера). Теория гироскопов в настоящее время разработана достаточно полно и напоминает сейчас скорее раздел математики, чем механики. Остановимся на применении лишь одной особенности движения гироскопа – его способности сохранять направление оси вращения при изменении положения и ориентации внешней рамки подвески. Если перед стартом ракеты связать с осями некоторой системы координат направления осей вращения трех гироскопов, то в дальнейшем любые угловые перемещения оси ракеты (изменение направления вектора скорости полета) относительно этой системы координат будут определяться однозначно.



Дифференцированием этих величин по времени легко найти угловые скорости. Знание угловых характеристик движения ракеты позволяет управлять её ориентацией во время движения (задавать и стабилизировать курс).

Кроме сведений об изменении направления движения необходима информация об изменении абсолютной величины скорости. Для этой цели служат акселерометры.

Один из их вариантов – датчик с гидродинамическим подвесом инерционной массы (см. рисунок). Когда возникает перегрузка по оси X, поплавок 1 начинает двигаться вдоль оси под действием архимедовой силы, сопротивление электролита 2 по одну сторону поплавка возрастает – происходит дисбаланс моста и появляется электросигнал на выходе. Поскольку осевое смещение поплавка происходит с малым ускорением, полагаем, что вязкое сопротивление жидкости уравнивает архимедову силу:

$$\Delta G n_x = h \frac{dx}{dt}, \quad (3.9)$$

где ΔG - разность между весом вытесненной поплавком жидкости и весом поплавка; h - коэффициент, зависящий от вязкости электролита и формы поплавка; n_x - перегрузка по оси X. После интегрирования (3.9) получаем

$$x = \frac{\Delta G}{h} \int_0^1 n_x dt.$$

Выходной сигнал пропорционален перемещению x , поэтому прибор дает выходной сигнал $u_{\text{вых}}$ пропорциональный интегралу от перегрузки

$$u_{\text{вых}} = K \int_0^1 n_x dt.$$

В результате получаем значение кажущейся скорости по выбранной оси X .

Автономная инерциальная система навигации применяется на этапе выведения, управляемого планирующего спуска в атмосфере, а так же во многих других случаях, когда необходимо, исходя из требований космодинамики, совершить маневр в космосе. На начальном участке полета может применяться **радионавигация** с помощью наземных средств траекторных измерений. При дальних межпланетных полётах положение и ориентация космического корабля могут быть определены по наблюдению расположения планет, Солнца и других ярких звёзд – **астрономическая навигация**.

1.5. Экспедиция на Луну.

Изучение небесных тел может принести колоссальную научную и практическую пользу. Однако задачи, которые ставит космодинамика для обеспечения полёта человека к планетам солнечной системы и благополучного возвращения, оказываются существенно сложнее, задачи вывода космического корабля (космическим кораблём называется пилотируемый КА) на околоземную орбиту. Ближайшим и наиболее легко достижимым (и единственно достигнутым человеком!) космическим объектом для нас является Луна. На её примере мы и рассмотрим те научно-технические проблемы, которые необходимо решать космонавтике при осуществлении полётов человека к другим планетам.

Интенсивное развитие космических исследований способствовало повышению уровня наших знаний о нашем ближайшем соседе – Луне и подготавливало человечество к её покорению. Полёты к Луне и её фотографирование начались с 1959г. с помощью КА серий "Луна"(СССР), "Рейнджер"(США), "Зонд"(СССР). Сведения о микрорельефе Луны были получены КА серии "Луна" и "Сервейер"(США) в период с 1966 по 1976г. Первыми искусственными спутниками Луны стали пять КА серии "Луна" и пять станций "Лунор Орбитер" (США). С их помощью началось составление лунных карт, регистрация гравитационных и магнитных полей. Одним из больших достижений стало создание в СССР ракеты-носителя "Протон", обеспечившей доставку на лунную поверхность автоматического лунохода для её исследования. Эта же РН была использована при выводе КА серии

"Зонд", доставивших на Землю образцы лунного грунта. Затем началась подготовка к полёту человека на Луну.

Полёт человека накладывал на лунную экспедицию ряд особенностей, связанных в первую очередь с обеспечением безопасности экипажа. Траектории должны были быть



Полетная траектория в системе отсчета, вращающейся вместе с лунной Земля-Луна

пролётными, а не траекториями попадания, а вблизи Луны корабль должен был перейти на орбиту её искусственного спутника, что обеспечивало возможность выбора места посадки, а при необходимости (в случае неисправности систем прилунения и взлета) возврат на Землю. Кроме того, траектория

полета к Луне должна была обеспечивать (при отказе двигательной установки, переводящей корабль на окололунную орбиту) гарантированный возврат astronauts на Землю, т.е. быть траекторией возвращения (см. рисунок).

Существовало несколько вариантов организации полета. Первый использовал шестиступенчатый ракетный комплекс, первые четыре ступени расходовались для вывода корабля на траекторию полета к Луне, последние две – для посадки и возвращения на Землю. В литературе показано, что стартовая масса ракеты при этом должна составлять около 4500 тонн. Постройка ракеты такого класса встречает трудности производства, транспортировки, сборки и т.п. Они обусловлены тем, что все оборудование и топливо, необходимое для возвращения на Землю, требуется брать с собой. Задача существенно упрощается, если, например, производить дозаправку возвращающегося на Землю модуля на окололунной орбите, или заправляться топливом для полета к Луне на околоземной орбите. Возможна комбинация этих вариантов, что требует запуска нескольких ракет. Такой вариант экспедиции теоретически можно обеспечить запуском серии ракет, однако стоимость такого мероприятия существенно возрастает по сравнению с предыдущим вариантом. Другим отрицательным моментом является сложность сближения, стыковки, перекачки топлива, т.е. с технической точки зрения надежность системы падает.

В рассмотренных вариантах вся полезная нагрузка лунной экспедиции должна выйти на траекторию полета, опуститься на Луну, затем взлететь с её поверхности и вернуться на Землю. Но с точки зрения здравого смысла нет никакой необходимости, например, тащить на Луну теплозащиту, которая понадобится лишь при входе в атмосферу Земли, или запас топлива, требуемый для возвращения с окололунной орбиты. Эти соображения и были положены в основу американской программы "Аполлон". Для её реализации была создана трехступенчатая РН "Сатурн - 5", длина которой вместе с пристыкованным КА"

"Аполлон", состоящего из командного, двигательного (служебного) и лунного отсеков, составляет **111 метров**, а стартовая масса более **2900 т!**

Траектория полета космического корабля являлась траекторией свободного возвращения. Аппарат покидал сферу действия Земли, разгоняясь в поле тяготения Луны, и,



огибая её по гиперболе, возвращался бы обратно. В соответствии с программой на пути к Луне производилось перестроение отсеков корабля для оптимизации маневров на окололунной орбите. Около ближайшей к Луне точки траектории (над её обратной стороной) тормозной импульс служебного отсека корабля гасил скорость и переводил его на слабоэллиптическую орбиту высотой 100...120 км – орбиту ожидания. С неё совершалось отделение и снижение лунного модуля, состоящего из посадочной и взлетной ступней, с двумя астронавтами на борту. Пребывание их на Луне сопровождалось выходом на поверхность для проведения научных экспериментов. После окончания работ взлетная ступень с астронавтами выходила на орбиту ожидания, где совершалась стыковка с основным блоком. После перехода в него астронавтов взлетная ступень от-

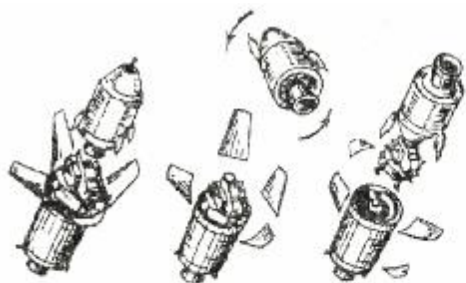
делялась и сбрасывалась на поверхность Луны. Затем основной блок с помощью маршевых двигателей служебного отсека переводился на траекторию возвращения к Земле. Перед входом в атмосферу двигательный отсек отделялся, а командный отсек с астронавтами совершал посадку. Таким образом, из всей ракетно-космической системы "Сатурн-5 - Аполлон" на Землю возвращался только командный отсек. Основные этапы полета и изменения состава КА представлены на рисунках.



делялась и сбрасывалась на поверхность Луны. Затем основной блок с помощью маршевых двигателей служебного отсека переводился на траекторию возвращения к Земле. Перед входом в атмосферу двигательный отсек отделялся, а командный отсек с астронавтами совершал посадку. Таким образом, из всей ракетно-космической системы "Сатурн-5 - Аполлон" на Землю возвращался только командный отсек. Основные этапы полета и изменения состава КА представлены на рисунках.

Несмотря на чрезвычайно большую стоимость полетов (с учетом теоретических разработок и подготовки около 26 млрд. долл.), американская программа изучения Луны, предусматривавшая семь полетов, была полностью выполнена. На Луне побывали 12 человек, её облёт совершили 27 астронавтов. По сообщениям руководителей исследований, ценность собранной научной информации и применение технических решений в других областях практической деятельности человека многократно превысила вложенные затраты.

Несмотря на чрезвычайно большую стоимость полетов (с учетом теоретических разработок и подготовки около 26 млрд. долл.), американская программа изучения Луны, предусматривавшая семь полетов, была полностью выполнена. На Луне побывали 12 человек, её облёт совершили 27 астронавтов. По сообщениям руководителей исследований, ценность собранной научной информации и применение технических решений в других областях практической деятельности человека многократно превысила вложенные затраты.



Перестроение отсеков на пути к Луне (отход основного блока от третьей ступени, поворот на 180 градусов, отделение и отход перестроенного корабля от третьей ступени)



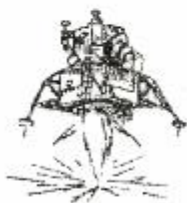
Корабль вблизи Луны



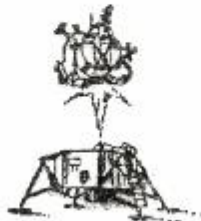
Отделение лунного отсека от основного блока



Сход лунного отсека с окололунной орбиты



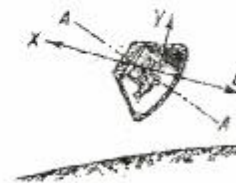
Посадка лунного отсека



Старт взлетной системы лунного отсека



Стыковка взлетной ступени с основным блоком



Вход командного отсека в земную атмосферу (AA - продольная ось векторов скорости, силы лобового сопротивления и подъемной силы)

1.6. Пути развития космонавтики

Человек с каждым годом все больше осознает малость своей планеты, ограниченность природных ресурсов, грядущие проблемы, связанные с нарушением экологии вследствие промышленной деятельности, возможность катастрофических последствий столкновения Земли с небесными телами. Пути их решения ищутся с первых же шагов выхода за пределы земного тяготения. Сейчас уже нет необходимости разьяснять преимущества космических технологий, невозможных в земных условиях из-за наличия атмосферы и сил гравитации. Но следует отметить, что сегодняшний уровень развития таких технологий все еще близок не к промышленному, а к лабораторному. Использование же сверхчистого железа, составляющего материал астероидов, или перенос вредных производств на внеземные заводы – таковы заманчивые перспективы освоения космоса. Существует масса проектов передачи на Землю аккумулированной на околоземных станциях солнечной энергии, позволяющих отказаться от сети тепловых и атомных электростанций. Актуальной является и проблема защиты от опасных космических объектов.

Решение всех этих задач неразрывно связано с главными вопросами космонавтики сегодняшнего дня:

- доставки полезной нагрузки на околоземную орбиту;
- создание эффективных двигательных установок, обеспечивающих длительные межпланетные полеты;
- обеспечение ориентации в космическом пространстве.

Среди возможных вариантов доставки полезной нагрузки в космос конструкторы особо выделяют многоразовые средства выведения. Существует несколько проектов ("HOTOL" в Великобритании; "SENGER" в Германии, "NASP" в США, "МКС" в России) одно- и двухступенчатых (из которых многократно используемой может быть только одна ступень) с различными вариантами старта и посадки (вертикальный, как ракета, и горизонтальный, как самолет).

Для реализации межпланетных полетов активно изучаются вопросы замены практически достигших предела своих возможностей двигателей на жидком и твердом топливе двигателями на других физических принципах – преобразующими ядерную и термоядерную энергию. В целях обеспечения точности наведения КА при межпланетных полетах ведутся работы по повышению качества навигационной аппаратуры.

Человечество занято сейчас освоением ближнего космического пространства. Ближний космос уже дал нам дальнюю телеграфно-телефонную связь, телевидение, информацию для составления прогнозов погоды, возможность предупреждения о некоторых стихийных бедствиях, детальные геодезические и топографические карты, разведку полезных ископаемых и многое другое. Освоение Луны и ближайших планет Солнечной системы вряд ли сразу принесёт человечеству экономические выгоды. Судя по лунной программе "Аполлон", слишком велики будут затраты. Однако в далёкой перспективе возможно создание на Луне заводов, где в условиях сравнительно слабой гравитаций будут, например, выращиваться монокристаллы, обладающие уникальными свойствами, или будет производиться добыча редких элементов из лунных недр. Возможно и использование Луны для размещения на ней вредных и опасных производств, поскольку экологические проблемы уже сейчас на Земле стоят очень остро. Наконец, в далёком будущем наша соседка, обладая меньшей по сравнению с Землёю гравитацией, несомненно будет служить в качестве орбитальной станции, необходимой при освоение планет Солнечной системы.

В заключении следует отметить, что в настоящее время возобновление программы освоения Луны (японский проект построения стационарной лунной станции), строительство большой околоземной космической станции (российско-американский проект станции "Альфа"), как и освоение других планет и малых космических тел (международная программа защиты от астероидов "Космический патруль"), возможно лишь при наличии качественного скачка в развитии космонавтики с обязательной кооперацией ведущих космических держав.

Литература

1. Васильев А.П. , Кудрявцев В.М и др. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. М. "Высшая школа". 1967.
2. Левантовский В.И. Механика космического полета в элементарном изложении. М. : "Наука", 1974.
3. Федосьев В.И. Основы техники ракетного полета. М. : "Наука", 1979.
4. Колтун М. Мир физики. М.: "Детская литература". 1984.
5. Балахонцев В.Г., Иванов В.А. , Шабанов В.И. Сближение в космосе. М. : Издательство МО СССР. 1973.
6. Александров В.А. , Владимиров В.В., Дмитриев Р.Д., Осипов С.О. Ракеты-носители. М. : Воениздат. 1981.
7. Фаворский Н.О., Фишигойт В.В., Янтовский Е.М. Основы теории космических электро-реактивных двигательных установок. М. , Высшая школа. 1978.
8. Абгарян К.А. , Калязин Э.Л. и др. Динамика ракет. М. : Машиностроение. 1990.
9. Ерохин В.Г. Теория внутрикамерных процессов и проектирование РДТТ. М. : Машиностроение. 1991. 560с.
10. Космическая техника. Под ред. Г.Серфейта. Пер. с англ. М.: Наука. 1964.
11. Острик А.В. Механика. М. : ГАСБУ, 1996.

IV. ПРОБЛЕМА АСТЕРОИДНОЙ ОПАСНОСТИ

О том, что Земля обитает в облаках комет и астероидов, астрономы знали с тех пор, как научились наблюдать их на небесной сфере. Предположения о возможных столкновениях этих космических снарядов с планетами и с Землей в том числе были вполне естественными и с развитием инструментов исследований только подтверждались. Изучение Луны, планет земной группы и спутников внешних планет с помощью космических аппаратов позволили обнаружить множество кратеров на их поверхности, являющихся следами таких столкновений. Имеются такие кратеры и на Земле. Так что проблема – не нова. Но острота ее была осознана лишь в 80-е годы нашего столетия, и это сразу же вывело столкновения с космическими телами в ранг важнейших факторов, определяющих геологические процессы и влияющих на эволюцию жизни на нашей планете.

В 1980 году группа ученых из Беркли под руководством Нобелевского лауреата Луиса Альвареца предложила теорию гибели динозавров на Земле, согласно которой основной ее причиной явилось столкновение с гигантским астероидом более 10 км в диаметре. Следствием такого удара, по их оценкам, оказалось вымирание, по меньшей мере, половины видов растительного и животного мира. В качестве одного из доказательств этой теории выступало открытие в тонком слое глины возрастом около 65 млн. лет высокой концентрации иридия – минерала, редкого на нашей планете, но более широко распространенного в космосе. Слой глины, богатой иридием, обнаруживается практически по всему земному шару и разделяет два геологических периода: эпоху динозавров и царство млекопитающих. Предположительным местом падения смертоносного метеорита называется район Мексиканского залива. Ученые еще спорят о размерах астероида, который убил динозавров, и других деталях гипотезы Альвареца, но они согласны в одном: астероид диаметром ≈ 10 км и более при столкновении с Землей выбросит в атмосферу достаточное количество пыли, чтобы закрыть солнечный свет, поднять температуру, уничтожить сельское хозяйство и жизнь на всей планете. Развитие средств наблюдения и открытие всё большего числа астероидов и комет в Солнечной системе убедительно доказывают, что подобные столкновения не остались только в прошлом, но угрожают и будут угрожать земной цивилизации.

4.1. Оценка угрозы

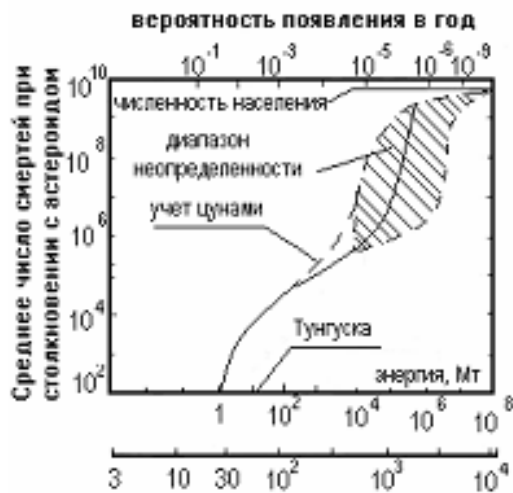
Почему же мы все еще живы? Дело в том, что столкновения с очень крупными астероидами происходят чрезвычайно редко. Так, шанс падения на землю в течение ближайшего столетия астероида диаметром около 2 км оценивается как 1:10000. Такие удары – типичный случай маловероятного, но обладающими серьезными последствиями события.

К настоящему времени астрономами зарегистрировано более 350 астероидов, пересекающих или проходящих близко к орбите Земли, причем самый крупный из них достигает в диаметре 8 км. По оценкам открыто не более 5... 10 % тел размером около 1 км и менее 0,1%. тел размером около 100 м. Известные американские астрономы Элеонора Хеллин и Каролина Шумейкер полагают, что абсолютное большинство астероидов диаметром свыше 2 км будет открыто в течение 8 лет, 1 км - 40 лет, 500 м - 180 лет, 100 м - 6400 лет и до 50 м (Тунгусский метеорит) - 40000 лет. Поток комет составляет лишь несколько процентов от потока астероидов аналогичных размеров, но их скорости значительно выше.

В среднем по статистике столкновения с телами диаметром порядка 10 м, что соответствует энергии порядка 0,1 Мт, происходят раз в несколько лет, диаметром $\approx 100\text{м}$ (энергия $\approx 10^2\text{Мт}$) - раз в несколько тысячелетий, диаметром $\approx 1\text{км}$ (энергия $\approx 10^5\text{Мт}$) - раз в несколько сотен тысячелетий. Астероиды среднего класса, последствия столкновения с которыми носят локальный или региональный характер, при взрыве производят почти такой же эффект, как ядерный взрыв соответствующей энергии, но без проникающих излучений и радиоактивного заражения. Площадь территории, охваченной разрушениями, пропорциональна энергии взрыва в степени $2/3$. Для примера можно сказать, что энергия Тунгусского взрыва оценивается в 10...20 Мт. При столкновении с твердой поверхностью каменный или железный астероид диаметром $\approx 250\text{м}$ (энергия $\approx 1000\text{Мт}$) образует кратер до 5 км в поперечнике. Аналогичные события уже происходили на протяжении исторического отрезка существования цивилизации, который чрезвычайно мал по сравнению со временем существования жизни на Земле.

Каковы критерии для оценки угрозы столкновения с астероидами? Западные специалисты полагают, что глобальными катастрофическими последствиями такого столкновения являются полное разрушение производства сельскохозяйственной продукции, и гибель, прямая или косвенная, более 25 % населения Земли, что сейчас уже составляет более 1,5 млрд. чел. При этом основной причиной разрушения сельского хозяйства и косвенной гибели людей является "астероидная зима" – запыление атмосферы, сопровождающееся понижением средних температур более чем на 10^0C сроком от месяца до года, что вызовет заморозки в средних широтах даже летом. Это грозит глобальным голодом, что наряду с гибелью миллионов людей, разрушением озонового слоя, оледенением и другими катаклизмами (возможны землетрясения, например) может привести к коллапсу экономических, социальных и политических структур. По разным оценкам можно определить в качестве порогового для глобальной катастрофы размер астероида в 1...1,5 км (энергия $\approx 2 \cdot 10^5\text{Мт}$) с диапазоном неопределенности до порядка в ту или иную сторону. Средний интервал столкновений с такими телами составляет $\approx 5 \cdot 10^5\text{лет}$. Следует, однако, заме-

титель, что нельзя установить четкую границу между локальным и глобальным ущербом. Так, цунами, например, производят более чем локальные, но менее чем глобальные эффекты.

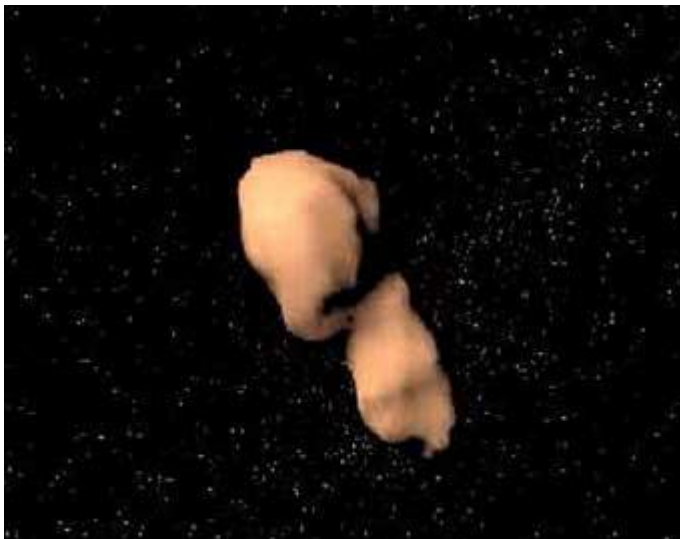


Задаваясь средней плотностью населения на единицу поверхности ($\approx 10 \text{ чел/км}^2$) и оценивая площадь непосредственных разрушений при взрыве астероида, можно оценить среднее число смертей от столкновения (см. рисунок). Однако здесь все очень сильно зависит от места падения. Так, Тунгусский взрыв по таким оценкам мог бы вызвать гибель ≈ 7000 человек, но он произошел над безлюдной тайгой и не вызвал ни одной смерти. Для

астероида с размерами около границы глобальной катастрофы непосредственно от взрыва погибнет в среднем от 3 до 30 (с учетом цунами) млн. человек, тогда как от последствий его падения - 1,5 млрд. чел. Самые приближенные оценки со всеми уже приведенными оговорками позволяют следующим образом систематизировать столкновения с различными классами астероидов по масштабам гибели от них:

- астероиды диаметром менее 50 м, как правило, разрушаются в атмосфере и не приводят к непосредственной гибели людей;
- диаметром 50...300 м (энергия от ≈ 9 до 2000 Мт) и частотой появления 1 раз в 250 лет вызывают около 5000 смертей (масштаб Тунгусского метеорита);
- диаметром 300...600 м (энергия $2 \cdot 10^3 \text{ К}$ $1,5 \cdot 10^4 \text{ Мт}$) с интервалом между столкновениями $3,5 \cdot 10^4$ лет - $3 \cdot 10^5$ смертей;
- до 1,5 км (до $\approx 2 \cdot 10^5 \text{ Мт}$) с интервалом до $5 \cdot 10^5$ лет - $5 \cdot 10^5 \text{ К}$ $1,5 \cdot 10^9$ смертей;
- редчайший случай - столкновение с астероидом более 10 км (энергия $\approx 10^8 \text{ Мт}$) с интервалом появления 10^8 лет приведет к гибели 5 млрд. человек, т.е. большинства населения планеты.

В общественном сознании астероидной опасности отводится крайне незначительное



место, несмотря на довольно высокий статистический риск. По всей видимости, это связано с отсутствием таких катастроф в исторически обозримое время. Между тем можно сказать, что пока нам просто везло. В 1989 г. крупный астероид Тютатис прошел на расстоянии от Земли, меньшем, чем двойное расстояние до Луны (смотри рисунок). Земля была в точке пересечения его траектории со своей орбитой

всего за 6 часов до этого. К тому же ни одна планетарная катастрофа не может сравниться с ударом крупного астероида, влекущим глобальный ущерб. По оценкам американских специалистов, для среднего американца (этот показатель может быть разным для жителей разных регионов) шансы погибнуть от различных катастрофических событий таковы:

- автокатастрофа - 1:100,
- убийство - 1:300,
- пожар - 1:200,
- несчастный случай с огнестрельным оружием - 1:2500,
- столкновение с астероидом (кометой) диаметром 600 (400) м - 1:3000,
- казнь на электрическом стуле - 1:5000,
- столкновение с астероидом (кометой) диаметром 1,5 (1,0) км - 1:20000,
- авиакатастрофа - 1:20000,
- наводнение - 1:30000,
- ураган (торнадо) - 1:60000,
- укус ядовитой змеи или насекомого – 1:100000 и т.д.

Таким образом, шанс погибнуть от астероида выше, чем, скажем, в авиакатастрофе, но безопасности авиа-перелетов уделяется огромное внимание, а астероидов никто не боится. А ведь при столкновении погибнет значительно большее число людей.

4.2. Общая картина последствий столкновения

С точки зрения физики можно выделить целый ряд «неприятных» последствий столкновения и с более мелкими космическими телами. При ударе астероидов и комет о поверхность Земли в сложном динамическом процессе взаимодействия оказываются все оболочки планеты: литосфера, гидросфера, атмосфера, ионосфера и магнитосфера. Явле-

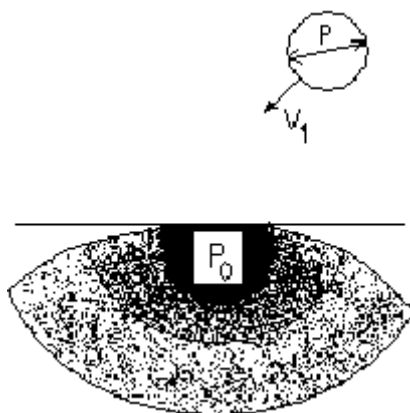
ние носит комплексный характер. При столкновении с достаточно крупным телом, которое достигает земной поверхности, в результате удара о сушу возникает деструкция поверхностных слоев из-за их механического разрушения, растрескивания, выброса твердых кусков различных размеров, расплавления и испарения. Образуется высокоскоростная струя паров, увлекающая за собой капли жидкого расплава, мелкие частицы твердой фазы и даже крупные обломки породы. В движение с большими скоростями (как при пролете самого тела через атмосферу, так и после соударения и выброса струи паров) вовлекаются большие воздушные массы, в воздухе генерируются ударные волны, что приводит к его разогреву. В результате в нем, в парах и смеси паров с воздухом интенсифицируются разнообразные химические реакции, процессы ионизации и генерируется тепловое излучение. Ионизация воздуха сопровождается изменением его проводимости, возникновением токов и электромагнитных полей, что ведет к изменению естественных токовых систем в ионосфере. Вместе с движением самих ионизированных слоев воздуха в геомагнитном поле это приводит к магнитогидродинамическим возмущениям, распространяющимся вплоть до радиационных поясов Земли. Возмущение этих поясов может привести к выпадению частиц из них, усилению ионизации в верхних слоях атмосферы и вновь к магнитогидродинамическим эффектам.

В случае падения астероида на водную поверхность выброс воды в виде капель и пара, так же как и выброс твердых частей грунта, изменяет оптические свойства воздуха, прохождение сквозь него солнечного излучения. Кроме того, вода, особенно соленая, изменяет характер протекающих в атмосфере реакций, ее химический состав, проводимость и т.д.

Существует нижний предел размеров космических тел, которые могут достигнуть поверхности планеты. В пренебрежении абляцией и разрушением их диаметр D_{\min} можно оценить по соотношению $D_{\min} = P_a / (r_t \cdot g \cdot \sin q)$, где P_a - атмосферное давление, g - ускорение свободной падения, r_t - плотность тела, q - угол входа тела в атмосферу. Для каменного метеороида, падающего вертикально на Землю, этот предел составляет 3,4 м, а для падения на Венеру, например, около 350 м. Разрушение падающего тела при больших атмосферных нагрузках практически не зависит от его диаметра. При этом для большого астероида фрагменты после разрушения не успевают разлетаться в стороны и производят при ударе о поверхность планеты такой же кратер, как и не разрушенный астероид. Оценка диаметра тела D_{kp} , выше которого можно пренебречь разрушением в атмосфере при рассмотрении процессов образования кратера, дает $D_{kp} = 2 \cdot H \cdot (r_a / r_t)^{1/2}$, где r_a - плотность атмосферы у поверхности планеты, H - масштаб высоты изменения плотности ат-

мосферы. Для каменного астероида это соотношение дает в случае падения на Землю 300 м, а в случае падения на Венеру – 4,5 км.

При ударе астероида о поверхность планеты (будем рассматривать твердую поверхность) образуется область, состоящая из расплава и пара



область, состоящая из расплава и пара вещества поверхности и самого астероида, так называемый плюм. Его формирование описывается термодинамикой ударного сжатия и разгрузки. При ударе от контактной границы начинают распространяться ударные волны, как по астероиду, так и по грунту. В астероиде они быстро достигают свободных границ и отражаются, переходя в волны разгрузки. В грунте ударно-волновая картина более

сложна (см. рисунок). Вблизи контакта существует область, примерно равная по объему астероиду, с максимальным давлением P_0 , которое можно оценить из уравнений Гюгоню $P_0 = r_r \cdot (C + S \cdot V_1 / 2) \cdot V_1 / 2$, где V_1 - скорость соударения, r_r - плотность грунта, C и S - постоянные материала грунта. Для гранита $r_r = 2,63 \text{ г/см}^3$, $C = 3,68 \text{ км/с}$, $S = 1,24$. Тогда при скорости соударения около 20 км/с получаем $P_0 = 425 \text{ ГПа}$, что превышает давление в ядре Земли. Далее давление падает по степенному закону с показателем от 3 (для давлений более 100 ГПа) до 2 (для давлений меньших 100 ГПа). Вблизи поверхности грунта сильных ударных волн нет, поскольку на свободной поверхности происходит разгрузка. В результате возникающего градиента давлений малое количество несжатого грунта из поверхностного слоя выбрасывается вверх с большими скоростями.

На ударной волне сохраняются масса, импульс и энергия, но не энтропия. Во фронте волны материал скачком переходит из начального состояния в конечное на кривой Гюгоню, а затем непрерывно разгружается по адиабате. При этом над материалом производится работа. После разгрузки материал грунта может остаться твердым (при малых давлениях) или перейти в жидкое или газообразное состояния. Например, силикаты для типичных метеорных скоростей соударения никогда не испаряются полностью. Кинетическая энергия удара, оставшаяся после испарения и расплава, идет на ускорение выбрасываемых частиц. Детальные расчеты с использованием апробированных уравнений состояния показывают, что скорость выбрасываемых частиц может достигать величины скорости соударения.

Разлетающийся плюм из расплава и пара грунта и материала астероида вначале имеет достаточно сложную структуру, но с течением времени приобретает форму полусферы. Примерно за время расширения до размеров двойного радиуса астероида средняя плот-

ность плюма становится ниже плотности расплава. В это время плюм состоит из капель расплава, находящихся в термодинамическом равновесии с паром. При взаимодействии с газом атмосферы плюм тормозится и инициирует образование в атмосфере ударной волны. Для малых астероидов и, соответственно, плюмов масса атмосферы может быть достаточно большой, чтобы погасить движение выброса. Если при этом расстояние, на которое распространился плюм, не превышает характерный масштаб атмосферы H , то образуется полусферический пузырь, медленно всплывающий до стратосферы, подобно грибовидному облаку после ядерного взрыва. Очень грубо можно оценить верхний предел диаметра астероида D_{\max} для такого сценария как $D_{\max} = H \cdot (r_a / r_r)^{1/3}$. Для земной атмосферы это составляет около 500... 600 м. Большие астероиды производят плюм, который не останавливает даже атмосфера.

Поскольку минимальная масса атмосферы наблюдается в вертикальном направлении, можно ожидать, что плюм будет распространяться также вверх, при этом для больших астероидов часть материала (в основном, материала самого астероида) будет выброшена в космическое пространство. В космос выбрасывается также и газ атмосферы, увлекаемый движущимся плюмом в телесном угле инъекции. Это происходит, если скорость движения смеси из выброшенного материала и воздуха будет больше первой космической, что соответствует скорости соударения около 20 км/с для Земли. При этом массы выброшенного материала должно быть достаточно, чтобы ускорить воздух в рамках телесного угла движения, что для силикатного астероида означает более $10^{10} m$. При массе астероида более $10^{14} m$ вся атмосфера над плоскостью, касательной поверхности в точке контакта, может оказаться выброшенной в космос (при не слишком маленьких углах входа в атмосферу). Такой механизм, возможно, объясняет разреженную атмосферу Марса, что может быть следствием крупных столкновений в прошлом.

Вещество, выброшенное со скоростью, меньшей первой космической, упадет обратно на планету, рассеиваясь в атмосфере и растекаясь на большую площадь: с радиусом порядка высоты подъема (сотни и тысячи км). Это падение вызывает образование отраженной ударной волны, нагревающей газ до несколько сот или даже тысяч градусов. Эти колебания и нагрев распространяются по всей атмосфере планеты, чему способствуют ветры, усиливающиеся при неравномерном нагреве атмосферы, и турбулентная диффузия. В результате возникает сильное загрязнение атмосферы и изменение ее характеристик, что усугубляют также пожары, возникающие из-за теплового излучения на площади до нескольких сотен километров. Атмосферные движения больших масс ионизированного вещества могут служить источником интенсивных магнитных возмущений и сверхсильных магнитных бурь.

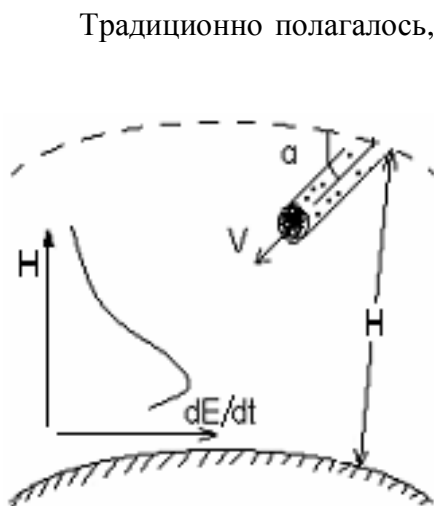
При обратном падении частицы находятся уже в твердом состоянии и при взаимодействии с атмосферой вызывают ее свечение, которое длится несколько часов после удара. Предполагается, что при падении крупного астероида 65 млн лет назад, вызвавшего глобальную катастрофу на Земле, мощность свечения атмосферы после возврата выброшенных частиц составила до $10 \text{кВт}/\text{см}^2$, что привело к уничтожению многих видов растительности на поверхности планеты и испарению слоя воды в океане в несколько метров толщиной. Кроме этого, при падении частиц в верхних слоях атмосферы активно образуется окись азота NO , что приводит к обильным кислотным дождям. Таким образом, роль плюма в катастрофических последствиях столкновения с астероидом значительна и может носить глобальный характер. В целом картина последствий столкновения с достаточно крупным астероидом сравнима разве что с последствиями глобальной ядерной войны.

4.3. Механизмы разрушения космического тела в атмосфере

Оценка последствий столкновения крупного космического тела или его обломков с Землей является достаточно сложной проблемой. Между тем разработка концепций систем защиты Земли от опасных космических тел базируется на минимизации ущерба от подобных столкновений и неотделима от оценки их последствий в случае невозможности их полного предотвращения. Более глубокий анализ физических процессов, сопровождающих столкновение космических тел с Землей, позволил бы более точно оценить степень опасности того или иного объекта и, соответственно, определить наиболее оптимальный способ защиты от него. Кроме того, такие исследования позволили бы более адекватно интерпретировать результаты наблюдений столкновений космических тел с другими планетами, как, например, фрагментов кометы Шумейкер-Леви-9 с Юпитером. Физические же процессы при прохождении высокоскоростного космического тела в атмосфере планеты и ударе о ее поверхность достаточно сложны и сопровождаются разрушением тела с генерацией мощных возмущений в окружающей среде.

В данном разделе будут рассмотрены модели разрушения опасного космического объекта при прохождении в атмосфере, а также некоторые вопросы методического обеспечения проблемы выделения энергии в атмосфере при «взрыве» тела и оценки последствий его столкновения с планетой. При этом необходимо моделировать гиперзвуковое обтекание крупного (от 10 м. до 10 км) тела произвольной формы потоком газа переменной плотности, рассчитывать образование и взаимодействие ударных волн, определять распределение аэродинамического давления на поверхности тела, его напряженно-деформированное и термическое состояние, а также зоны разрушения тела с учетом термических эффектов из-за проникновения горячего газа из ударно-сжатого слоя в разру-

шенные области тела. Основным инструментом такого анализа, очевидно, является численное моделирование.



Традиционно полагалось, что при движении высокоскоростного тела в атмосферах планет изменение его массы происходит за счет абляции поверхностного слоя (плавления и испарения), вызванной переносом тепла (конвективным, радиационным и за счет электронной теплопроводности) от ударно сжатого воздуха к поверхности тела. Теория этого явления разрабатывалась, в основном, применительно к движению в атмосфере летательных аппаратов (самолетов, спускаемых блоков космических аппаратов и т.п.). Однако физическая картина взаимодействия космических тел есте-

ственной природы (метеороида, астероида или кометы) с атмосферой будет несравненно более сложной, что обусловлено широким диапазоном их размеров, неоднородной структурой и более высокими скоростями входа в атмосферу по сравнению с летательными аппаратами. Между тем, даже если ограничиться рассмотрением тех объектов, которые не достигают поверхности планеты, разрушаясь в атмосфере (для Земли это тела до десятков метров диаметром), то и их воздействие на атмосферу планеты может привести к ее глобальным возмущениям и экологической катастрофе. Проблема достоверной оценки последствий столкновений опасных объектов с планетами, а в конечном итоге, проблема обеспечения безопасности Земли и земной цивилизации, требуют более адекватного описания физики взаимодействия таких тел с атмосферой, как, впрочем, и с другими геосферами. Что касается атмосферы, то в более узкой постановке, видимо, необходимо рассматривать задачу о скорости выделения энергии в атмосфере (см. рисунок), а также изменении ее состава и физических параметров, в зависимости от высоты полета тела, что будет определять все последующие эффекты. Полностью такую задачу до сих пор нельзя считать решенной.

Рассмотрим некоторые механизмы разрушения относительно небольших космических тел при взаимодействии их с атмосферой. Скорости входа в атмосферу составляют, как правило, десятки км/с. Для достаточно мелких тел (от микроскопических до ≈ 1 м в диаметре) абляция поверхностного слоя тела действительно играет заметную роль в изменении его формы и размеров. Микроскопические тела могут рассматриваться при моделировании взаимодействия космического пылевого облака (хвост кометы, например) с атмосферой Земли. В этом случае формируется сильная ударная волна перед облаком, которая способна произвести катастрофические разрушения на поверхности планеты. Отсюда, в

частности, следует вывод о нецелесообразности разрушения крупного угрожающего Земле астероида в пылевое облако, которое может столкнуться с Землей. Последствия, может быть, будут и меньшими, но все равно достаточно серьезными.

Среди причин, вызывающих абляцию тела, обычно рассматриваются перенос тепла от ударно-сжатого слоя воздуха к поверхности тела за счет диффузии, молекулярной и электронной теплопроводности, а также излучением горячего воздуха. Однако в классических работах Бронштэна показано, что относительно холодный слой паров перед телом (с температурой порядка температур плавления и испарения) значительно снижает перенос тепла конвективным и радиационным механизмами. Основным механизмом абляции тела в этой ситуации оказывается квазинепрерывное дробление, или шелушение, тела. Удельные энергии для типичного метеороида оцениваются следующими величинами: для плавления $2 \cdot 10^{10} \text{ эрг/г}$; для испарения $8 \cdot 10^{10} \text{ эрг/г}$; для квазинепрерывного дробления $1,4 \cdot 10^{10} \text{ эрг/г}$, что подтверждает доминирование этого процесса. Метеорное тело может рассматриваться как гетерогенная структура, состоящая из тугоплавких включений – зерен и связующего материала вокруг них. Для такой структуры имеют место три основных механизма квазинепрерывного дробления:

- расплавление перемычек между зернами и унос зерен потоком;
- выброс твердых тугоплавких зерен давлением паров связующего;
- снос твердых частиц касательным аэродинамическим напряжением в потоке паров с краевых зон поверхности тела (при этом диаметр таких частиц полагается в пределах 100 микрон).

Следует отметить также, что квазинепрерывное дробление сопровождается механоэмиссией электронов с энергией в несколько кэВ, что приводит к наведению отрицательного заряда на осколках и положительного на основном теле.

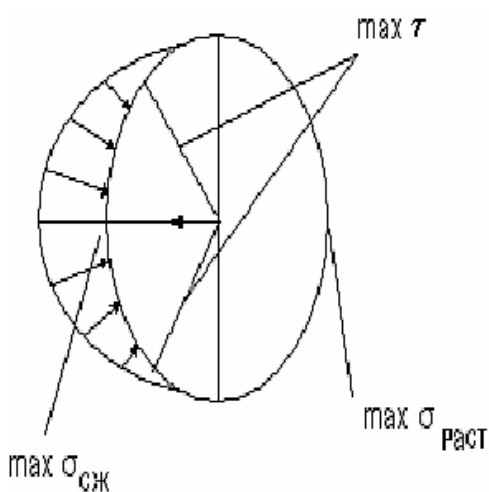
Для крупных объектов (от десятков метров до десятков километров) наиболее существенными оказываются другие виды дробления. Такие тела не успевают потерять скорость и полностью расплавиться и испариться в верхних слоях атмосферы и достигают таких высот, где давление воздуха за ударной волной возрастает до величин порядка прочности материала метеороида.

Под воздействием аэродинамической нагрузки метеорит начинает разрушаться, образующиеся обломки сносятся в стороны и назад, формируя «хвост» из частиц разных размеров, подвергающихся вторичному дроблению под действием скоростного напора и взаимных столкновений. В этом случае можно отметить возникновение аэродинамических сил отталкивания между фрагментами тела, а также эффект коллимации – вытягивания облака фрагментов в цепочку.

При дроблении и сносе осколков в стороны резко увеличивается суммарная площадь миделева сечения, что приводит к ускорению торможения тела и возрастанию роли конвективного и радиационного притока тепла к нему. Однако унос массы тела за счет дробления остается несопоставимо большим по сравнению с уносом за счет плавления и испарения.

Дробление тела начинается после достижения давлением газа на его лобовой поверхности разрушающих для материала тела значений по сколовому механизму под действием сжимающих напряжений (от перепада давлений и массовых сил инерции). Начавшееся локально разрушение будет распространяться от лобовой поверхности к тыльной в виде волны дробления. При этом потерявшая связность масса будет растекаться в стороны и сноситься потоком назад. К моменту начала существенной деформации раздробленной массы за счет растекания все тело уже будет раздроблено и может рассматриваться как несжимаемая жидкость. Такая капля начнет сплющиваться, сжимаясь в продольном направлении и расширяясь в поперечном, причем края ее под действием скоростного напора будут отгибаться назад, принимая медузообразную форму. Конечным итогом будет полное диспергирование и торможение опасного космического объекта. Описанный процесс происходит быстро и носит взрывной характер.

Основной идеей этой теории является утверждение о ведущей роли в разрушении сжимающих напряжений. В то же время в крупных телах при неравномерном распределе-



нии нагрузки по поверхности возникают значительные касательные напряжения. Поскольку прочность тела на сдвиг обычно меньше его прочности на сжатие, то эти напряжения также могут вызвать начало разрушения. Так, при распределении давления на поверхности шара по закону Ньютона максимальные касательные напряжения лежат внутри шара, сжимающие – в его передней точке, а растягивающие – в тыльной (см. рисунок).

При наличии сильного сжатия одновременно с касательными напряжениями создается ситуация, когда работа пластического течения (при его наступлении) переходит в тепловую энергию тела, вызывая его плавление и испарение во внутренних областях и ускоряя процесс разрушения тела. Среди всех типов дезинтеграции в твердом теле в рассматриваемых процессах превалирует разрушение материала, обусловленное действием именно сдвиговых напряжений. При этом чисто механический процесс дробления вызывает сильнейший термический эффект за счет работы

пластического течения и дросселирования горячего газа из ударно - сжатого слоя через систему микро- и макротрещин. Эти процессы свидетельствуют о сложности физического явления разрушения космического тела в атмосфере и необходимости разработки адекватного математического аппарата для его описания.

После начала разрушения моделирование дальнейших процессов должно опираться на систему уравнений многофазного континуума из конденсированной среды, ее пара и расплава и газа атмосферы. На начальном этапе работ эта стадия может быть реализована с использованием модели движения капли или сыпучей среды в атмосфере, которая описывается уравнениями Эйлера.

Таким образом, задача о движении и разрушении тела в атмосфере планеты может быть решена с учетом определяющих картину физических процессов, что, следовательно, позволит более корректно рассмотреть проблему скорости выделения энергии в атмосфере и изменения ее состава и физических параметров при пролете тела, а также все последующие эффекты.

4.4. Космический патруль.

В США с конца 80-х годов ведется активное обсуждение проблемы астероидной опасности, разработаны и приведены в действие соответствующие программы работ по ее снижению, и в первую очередь, программа НАСА (NASA) «Space Guard Survey» – «Космический патруль», рассчитанная на 20 лет и предназначенная для обнаружения и каталогизации опасных космических объектов. Предполагается, что с ее помощью можно будет зафиксировать угрозу от астероида за несколько десятилетий до столкновения, а от долгопериодных комет – за несколько месяцев.

Около 90 % потенциально опасных объектов представляют собой околоземные астероиды или короткопериодные кометы, которые имеют орбиты, близко подходящие или пересекающие орбиту Земли. Оставшиеся 10 % составляют промежуточные или долгопериодные кометы (с периодом более 20 лет), которые поддаются обнаружению только в моменты сближения с Землей. Задачей «Космического патруля» является обнаружение этих объектов во время их периодических подходов к Земле, расчет их долгосрочных орбитальных траекторий и идентификация тех из них, которые могут столкнуться с Землей в следующие несколько столетий. Это требует мониторинга области пространства, простирающейся наружу от орбиты Земли приблизительно до внутреннего края основного пояса астероидов (на расстояние около 200 млн. км). При этом в первую очередь желательно обнаружить все объекты диаметром выше 1 км, как из-за глобальной угрозы столкновения с ними, так и из-за относительной легкости их обнаружения. Такие объекты можно наблюдать в отраженном солнечном или инфракрасном свете. Яркость 1-километрового объекта

на расстоянии 200 млн. км при отражающей способности не более 3% соответствует звездной величине 22 (с помощью 4-метрового телескопа с ПЗС - матрицей можно обнаружить объекты 26-й величины).

Первоочередные задачи «Космического патруля» можно условно разделить по отношению к трем группам объектов: 1) большие (размером более 1 км) астероиды, пересекающие земную орбиту; 2) аналогичные кометы; 3) более мелкие объекты класса Тунгусского метеорита.

1) Большие астероиды диаметром более 1 км и кинетической энергией до 1 млн. Мт, как уже отмечалось, представляют глобальную угрозу существованию цивилизации. Как считается, в околоземном пространстве их находится около 2 тысяч, причем открыто менее 10%. От четверти до половины из них в принципе могут столкнуться с Землей, но средний интервал между такими столкновениями порядка 100 тыс. лет. В среднем один из таких объектов проходит между Землей и Луной каждые несколько десятилетий. В рамках программы «Космический патруль» с помощью телескопов с 2-х и 3-метровой апертурой можно было бы открыть большинство из них за ≈ 10 лет и практически все за 25 лет. Наиболее вероятным итогом таких наблюдений представляется вывод о том, что в ближайшее столетие или два ни один из этих астероидов не представит угрозу для Земли. Во всяком случае, предупреждение о возможной угрозе будет получено за несколько десятилетий, что позволит предпринять действия для уменьшения опасности.

2) Кометы с периодом менее 20 лет поддаются обнаружению, как и описанные только что астероиды, да и составляют только около 1% угрожающих Земле объектов. Однако долгопериодные кометы, многие из которых в первый раз появляются в поле зрения, представляют собой вторую по своей важности угрожающую группу объектов. Хотя число возможных столкновений с ними составляет всего 5...10% от числа столкновений с крупными астероидами, они обладают значительно большими энергиями. В среднем одна из таких комет проходит вблизи Земли раз в столетие, а сталкивается с Землей раз в несколько сотен тысячелетий. Перепись таких комет составить невозможно, поэтому каждая встреча будет неожиданной. Поскольку они ярче астероидов соответствующих размеров, телескопы смогут обнаружить их на подходе к внешнему краю пояса астероидов, за 500 млн км, что обеспечивает несколько месяцев для предупреждения об опасности. Но здесь большая ошибка в определении орбиты, и, следовательно, более высокая вероятность ложной тревоги. Оценки показывают, что только 35% таких комет могут при существующем числе телескопов быть обнаружены, по крайней мере, за 3 месяца до их приближения (последний пример – комета Хейла-Боппы, которая была видна в 1997 году).

3) Средние объекты (от 100 м до 1 км диаметром и, соответственно, от 20 Мт до 1 млн. Мт энергией) представляют собой локальную или региональную угрозу по характеру последствий столкновения с ними. Однако ущерб от такого столкновения будет иметь большие масштабы, чем от ядерного взрыва той же мощности. Средний интервал между такими ударами для всей Земли составляет несколько столетий, для ударов в обитаемую часть планеты – несколько тысячелетий, для ударов в плотно населенные области – до 100 тыс. лет. По оценкам, таких объектов вблизи Земли может быть более 300 тыс., несколько из них проходят между Землей и Луной каждый год. При сегодняшних технологиях невозможно обнаружить все такие объекты раньше, чем за несколько столетий. Поэтому угроза от этого класса объектов требует разработки более совершенных методов их обнаружения.

Надо заметить, что и в США эта программа имеет недостаточное финансирование и поэтому выполняется с отставанием от сроков, которые определили ее разработчики. В России фактически остались две обсерватории, которые на чистом энтузиазме занимаются наблюдениями за небесными объектами, в том числе и потенциально опасными. Однако в последние десятилетия происходит формирование общественного мнения и осознание астероидной опасности. Российские ученые активно участвуют в международных конференциях по этой проблеме и вносят свой вклад в ее решение.

4.5. Перехват, отклонение и разрушение опасных объектов

Рассмотрим теперь, что же делать с теми космическими объектами, которые могут столкнуться с Землей. После обнаружения их службой «Космического патруля» и выдачи предупреждения об угрозе можно либо ждать беды, либо попытаться предотвратить ее. В последнем случае есть несколько возможностей. Самая благоприятна из них, когда опасный объект обнаружен заблаговременно (за несколько десятилетий до удара) и есть возможность немного изменить его орбиту, чтобы избежать столкновения. Лучше делать это вблизи его перигелия, направив туда спутник с каким либо средством воздействия на объект, причем можно понемногу менять орбиту на каждом витке. Для объектов, появляющихся неожиданно, необходимо отклонить их с орбиты или разрушить при их первом приближении к Солнцу, в условиях отсутствия полной информации о точной орбите. На эти действия, в лучшем случае, останется около четырех месяцев.

По самым грубым оценкам, для разрушения астероида в несколько километров диаметром на расстоянии в 1 а.е. и отклонения осколков от столкновительной с Землей траектории требуется кинетическая энергия порядка 1 Мт. Для таких же действий на расстоянии 0,1 а.е, требуется уже порядка 100 Мт. Такие энергии находятся у предела того, что доступно человечеству. Для перехвата объектов за несколько витков до столкновения тре-

буются гораздо меньшие затраты энергии. Здесь, соответственно, больше возможностей для использования различных способов воздействия на объект.

С полной определенностью можно сказать, что для объектов диаметром более 100 м любой перехват на расстоянии ближе 1 а.е. требует использования ядерного взрыва. Более детально этот вопрос будет рассмотрен чуть позже.

Вернемся еще раз к задачам «Космического патруля», т.к. проблемы обнаружения и перехвата тесно взаимосвязаны. Действительно, для успешного перехвата и отклонения опасного объекта необходимо точно знать его траекторию, определение которой может потребовать длительных наблюдений. Сократить это время может сеть спутников наблюдателей, размещенных в точках либрации либо на геостационарных орбитах и следящих за единичными пролетами объектов вблизи Земли. Альтернативный подход (или дополнительный, если угодно) состоит в использовании ракет-разведчиков и датчиков наведения на ракетах перехватчиках, уточняющих траекторию движения к цели по результатам пролета разведчика вблизи объекта. Разведчики могут также получить предварительную информацию о размерах, составе и рельефе поверхности объекта, подлежащего перехвату.

Приведем некоторые, достаточно приближенные оценки эффективности использования различных способов отклонения или разрушения опасных тел. Во-первых, рассмотрим требующиеся приращения скорости, которые надо сообщить астероиду для его отклонения на безопасное расстояние (будем полагать его равным одному радиусу Земли). В случае воздействия на астероид перпендикулярно его орбите возникают осцилляции орбиты. Используя простейшие соображения небесной механики, можно получить, что для достижения амплитудой этих осцилляций величины требуемого отклонения необходимо приращение скорости $\Delta V = (75 \text{ м / с}) / t_{\text{impact}}$, где t_{impact} - время до удара в днях. Аналогичным образом, для воздействия вдоль траектории имеем $\Delta V = (0.07 \text{ м / с}) / T_{\text{impact}}$, где T_{impact} - время до удара в годах.

Каким образом можно сообщить эти приращения скоростей небесному телу? Традиционно рассматриваются: кинетический удар по телу; воздействие на него ядерным взрывом; использование разнообразных двигательных установок.

Отклонение астероида прямым ударом по нему возможно для не слишком больших тел (до 100 м в диаметре). Заметим, что использование химической взрывчатки неэффективно, т.к. энергия удара на единицу массы значительно больше. Так, при относительной скорости ударника в 50 км/с высвобождаемая при ударе энергия в 300 раз больше, чем при взрыве соответствующей массы взрывчатки. Однако для кинетического воздействия требуется знание механических (прочностных) и геологических свойств астероида. С точки зрения передачи количества движения удар наиболее эффективен при встречных курсах

астероида и ударника (например, при неожиданном появлении астероида). Но точка перехвата должна быть достаточно далека, чтобы требуемое приращение скорости оказалось не слишком велико. Для перехвата за несколько витков наиболее эффективно сообщить импульс в перигелии орбиты астероида. Удар для малых космических тел с большой вероятностью может привести к разрушению тела. При этом как возможные крупные обломки, так и пылевое облако при распылении астероида могут обладать достаточно большой кинетической энергией и сами по себе представлять опасность. Поэтому такой способ, хотя он и является достаточно простым и эффективным, не всегда может привести к требуемым результатам.

При возможности отклонения тела с опасной траектории за много витков до встречи вполне приемлемым вариантом может оказаться использование двигательных установок, доставленных и размещенных на поверхности тела, особенно если рабочим веществом будет являться материал самого астероида. Такие установки могли бы работать годами, понемногу изменяя траекторию тела. Это могли бы быть: паровые ракеты; конвейерные пояса; электромагнитные двигательные установки; солнечный парус (или окрашивание части поверхности астероида с целью увеличения давления солнечного света). Рассматривается также возможность использовать естественные скопления летучих веществ – газов – в некоторых астероидах; направленное истечение их по специально проделанному каналу представляет собой естественный реактивный движитель. Этот способ, безусловно, экологически чист и может привести к требуемому отклонению тела, но эффективность его слишком мала, а технические сложности достаточно велики.

Для отклонения тел на заранее рассчитанных орбитах за большое количество витков до столкновения может использоваться излучение лазера, размещенного на Земле, околоземной орбите или Луне. Таким образом, исключается необходимость лететь к астероиду и, кроме того, легко наблюдается эффект от воздействия (посветил – измерил приращение скорости). Но это способ все же слишком громоздок и сложен даже для астероидов умеренных размеров.

Наконец, наиболее эффективным способом воздействия на опасное тело считается использование энергии ядерного взрыва. Сразу следует оговориться, что этот способ часто встречает возражения со стороны ученых и общественности в плане допустимости использования ядерного оружия в космосе (в настоящий момент вывод таких устройств в космическое пространство запрещен международными договорами; к тому же есть опасения в искушении использования их не только против опасных космических объектов) и опасности радиоактивного загрязнения околоземного пространства. Тем не менее, возможная угроза самому существованию цивилизации позволяет анализировать возмож-

ность использования ядерного взрыва для ее предотвращения, особенно при отсутствии альтернативных достаточно эффективных способов.

Воздействовать на астероид или комету возможно заглубленным на какую-либо глубину, поверхностным или приподнятым ядерным взрывом. Первый способ при оптимальной глубине подрыва приведет к выбросу массы тела, на порядок большей, чем поверхностный взрыв, соответственно сообщая и больший импульс. Этот способ может использоваться при необходимости быстрого реагирования на угрозу столкновения. Но он требует использования тяжелого пробойника, обеспечивающего внедрение ядерного заряда на требуемую глубину, масса которого зависит от относительной скорости встречи перехватчика и тела, глубины внедрения и состава астероида. Это увеличит массу полезной нагрузки ракеты перехватчика примерно на порядок. К тому же заглубленный взрыв с большой вероятностью разрушит тело. В таком случае он предпочтителен именно для распыления опасного тела, и при достаточной однородности тела взрыв лучше произвести вблизи центра масс. В любом случае при заглубленном взрыве необходимо знание механических параметров тела (массы, положения центра масс, момента инерции, угловой скорости вращения), состава, структуры и его топографии. Таким образом, для отклонения опасного тела заглубленный взрыв по массовым затратам не более эффективен, чем поверхностный, но требует больших знаний об этом теле. По оценкам, для распыления тела ему надо сообщить плотность энергии 10^7 эрг/г , что соответствует мощности взрыва для астероида диаметром 100 м – 3 кт, диаметром 1 км – 3 Мт и 10 км – 3000 Мт.

Поверхностный ядерный взрыв требует меньших знаний о внутреннем строении опасного тела, но больше о контурах поверхности и составе тела, особенно вблизи взрыва. Необходима уверенность в том, что выброшенное из кратера вещество не будет угрозой для Земли и что сам кратер не будет слишком велик, чтобы разрушить тело на несколько фрагментов, также представляющих угрозу. Предполагая коническую форму кратера с отношением высоты к радиусу, равным 5, можно оценить, что для приращения скорости в 1 см/с для астероида диаметром 100 м требуется мощность взрыва 0.1 кт, диаметром 1 км – 100 кт, диаметром 10 км – 10 Мт.

Приподнятый ядерный взрыв существенно уменьшает опасность разрушения тела. Вместо формирования кратера нейтроны, гамма - рентгеновское излучение и сильно ионизованные продукты взрыва испарят тонкий слой поверхности тела. Это приведет к импульсу давления на большей поверхности и уменьшит напряжения в теле. Из перечисленных четырех видов излучений наиболее эффективны нейтроны, благодаря большей глубине проникновения в вещество. Приподнятый взрыв (оптимальной считается высота, равная 0.4...0.5 радиуса астероида) менее чувствителен к деталям топографии и информа-

ции о строении тела. Результат такого взрыва высоко предсказуем, что позволяет исключить этап разведки. Основной недостаток этого способа в том, что требуется мощность взрыва, существенно большая, чем при поверхностном взрыве. Для приращения скорости в 1 см/с оценки дают мощность взрыва для астероида диаметром 100 м – от 0.01 до 0.1 кт, диаметром 1 км – от 0.01 до 0.1 Мт и диаметром 10 км – от 10 до 100 Мт.

Обобщая проведенный анализ способов воздействия на угрожающее Земле космическое тело, можно сделать заключение, что наиболее оправданным и разумным с точки зрения эффективности воздействия и обеспечения безопасности является приподнятый ядерный взрыв. Он требует меньше всего информации о теле, позволяет исключить разведку и дополнительное снаряжение, обеспечивает наименьшую вероятность разрушения тела и может быть применен как в случае быстрого перехвата тела, так и заблаговременно. Если угрожающий объект слишком велик и нет уверенности в необходимом отклонении, надо использовать поверхностный ядерный взрыв. При этом чем больше объект, тем меньше вероятность его разрушения. Для опасных тел диаметром менее 70...100 м можно использовать воздействие кинетическим ударом. Остальные способы, по всей видимости, останутся только на стадии теоретических разработок.

Заметим, что совсем не требуется немедленная реализация системы «противоастероидной обороны» на практике, и тому есть, как минимум, три причины: малая вероятность столкновения, высокая стоимость и быстрые изменения в оборонных технологиях. Вместо этого вполне реалистичной представляется программа, включающая: численное моделирование воздействия приподнятого и поверхностного ядерных взрывов на типичные астероиды и кометы; оптимизацию астрономических задач отклонения вместе с обнаружением и мониторингом потенциально опасных объектов; создание базы данных для численных исследований по механическим, теплофизическим и оптическим свойствам материалов опасных объектов; а также их уравнениям состояния; анализ возможности использования в качестве перехватчиков существующих ракет-носителей как военного, так и мирного назначения. Общая же задача ученых – перевести столкновения с крупными космическими телами в ранг предсказуемых и предвычисляемых, а в дальнейшем – и техногенно предотвращаемых событий.

Литература

1. Рини Т. Численное моделирование явлений при высокоскоростном ударе. В кн. Высоко-скоростные ударные явления. // М.: Мир, 1973. С.164-219.
2. Хэллок Ф. Свифт. Механика соударения со сверхвысокими скоростями. В кн. Динамика удара // М.: Мир, 1985. С. 173-197.
3. F. Smith A collision over Collision A tale of astronomy and Politics Mercury The Journal of the Astronomical Society of the Pacific, 1992, Vol XXI, №3, p 97.
4. D. Morrison The Spaceguard Survey Protecting the Earth from Cosmo Impacts/ там же, p 103.
5. G. H. Canavan, and J. Sotem Interceptor of Near-Earth Objects/ там же, p 107.
6. И.В. Немчинов, Т.В. Лосева, В.В. Шувалов Динамические процессы в атмосфере Земли при падении космических тел В сб научных трудов ИДГ РАН Динамические процессы в геосферах. М 1994, с 205.
7. C. R. Chapman, D. Morrison Impacts on the Earth by asteroids and comets asesing the hazard / Nature, 1994, Vol 367, p 33.
8. T.J. Ahrens, A.W. Harris Deflections and fragmentation of near-Earth asteroids / Proceedings Near-Earth Objects interception Workshop Los Alanos, New Mexico, 1992.
9. Тезисы докладов всероссийской конференции Астероидная опасность – 95, Санкт-Петербург, 1995.
10. С.С. Григорян О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет/ Космическим исследования, 1979, т XVII, вып 6, с 875.
11. С.С. Григорян О столкновении кометы Шуменкер-Леви-9 с Юпитером в июле 1994 г /ДАН, 1994, т 338, №6, с 752.
12. Б.А. Клумов, В.И. Кондауров, В.Е. Фортон и др Столкновение кометы Шумейкера-Леви-9 с Юпитером что мы увидим?/ УФН, 1994, т 164, №6, с 617.
13. В.Е.Фортон, А.В. Ивлев, В.А. Клумов, Столкновение кометы с Юпитером тонкая структура кривой блеска/ Писома в ЖЭТФ, 1995, т 62, вып 10, с 752.
14. В.И.Кондауров, И.Н.Ломов, Ф.Е.Фортон Деформирование, разрушение и испарение вещества фрагмента кометы Шумейкера-Леви-9 при движении в атмосфере Юпитера/ ДАН, 1995, т 344, №2, с 184.
15. В.И.Кондауров, И.Н. Томов, В.Е.Фортон О действии мщного взрыва на астероид / ДАН, 1996, т 345, №2, с 184.
16. В.Е.Фортон, Ю.Н.Гнедин, М.Ф.Иванов и др Столкновение кометы Шемейкер-Леви-9 с Юпитером что мы увидели/ УФН, 1996, т 106, №4, с 391.
17. Кондауров В.И., Острик А.В., Рыбаков С.В. Есть ли у Земли естественный космический щит? / Всероссийская конференция с международным участием "Астероидная опасность-95". Тезисы докладов. – Санкт-Петербург, 1995. Т.2. С.67-68.
18. В.М. Грибанов, А.В. Острик, С.В. Рыбаков Численный анализ отклонения опасного космического объекта путем воздействия проникающих излучении приповерхностного ядерного взрыва / Материалы международной конференции Космическая защита Земли, Снежинск, 1996, с 90.
19. Грибанов В.М., Острик А.В. Воздействие рентгеновского и нейтронных излучений мощного взрыва на астероид // Известия Челябинского научного центра. Космическая защита Земли. Специальный выпуск, 1997, с.170-173.
20. Клумов Б.А., Ким В.В., Ломоносов И.В., Султанов В.Г., Шутков А.В., Фортон В.Е. Возможные наблюдательные эффекты в эксперименте Deep Impact // Успехи физических наук Т. 175, № 7. 2005. С. 767-777.

V. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

Развитие современной науки и техники во многом определяется уровнем наших знаний о процессах, протекающих в сплошных средах при высокой плотности подведенной к ним энергии. Число практически важных и насущных задач, стоящих перед человечеством и решаемых в механике сплошных сред (МСС) с высокой плотностью энергии, поистине весьма велико. Сюда, например, относятся и проблема создания управляемого термоядерного синтеза, и вопросы взаимодействия мощных потоков излучения и частиц различной физической природы с веществом, и проблема астероидной опасности, и вопросы создания современной аэрокосмической техники и так далее, и так далее. Общей чертой перечисленных задач является полная бесперспективность их решения методом проб и ошибок, что в значительной степени было характерно для предыдущего этапа развития техники (несмотря на сложность устройства, человечество сравнительно легко создало эффективные двигатели внутреннего сгорания различного назначения, но внешне просто устроенные ракетные твердотопливные двигатели до сих пор приносят их создателям массу сюрпризов и неприятностей, причина заключается в том, что нестационарные процессы горения топлива существенно сложнее механики и термодинамики процессов в двигателе внутреннего сгорания). Это обусловлено чрезвычайной сложностью этих явлений, а также трудностью экспериментального исследования высокотемпературных и быстропротекающих процессов, которые имеют место при больших плотностях энергии. Непременным условием успешного решения задач в этой области является их теоретическое осмысление и создание математических моделей явлений. Без глубоких предварительных теоретических исследований невозможна и разработка экспериментальных установок, позволяющих "обуздать" высокую плотность энергии и управлять ею.

Общая методология создания математических моделей МСС включает в себя построение системы уравнений движения изучаемой среды, дополненных начальными и граничными условиями. Обычно используются законы сохранения (массы, импульса и энергии), которые в применении к непрерывной среде записываются в виде нелинейной системы уравнений в частных производных. Как правило, замкнуть эту систему уравнений удается с использованием уравнений состояния (УРС), построение которых является важнейшей составляющей разработки математической модели большинства явлений, изучаемых методами механики сплошных сред.

Сведения об УРС конкретных веществ, находящихся в различных состояниях, разбросаны по многочисленным разрозненным публикациям и представлены в разнообразном, зачастую очень неудобном для дальнейшего использования виде. Это делает по-

строение УРС не только физической, но и в некотором смысле информационной проблемой.

В предлагаемой главе рассматриваются современные требования к уравнениям состояния, а также различные аспекты их построения.

5.1. Общее понятие об уравнениях состояния и требования к ним

При описании высокоэнергетических процессов требуются данные о термодинамических свойствах материалов в области изменения параметров, охватывающих все четыре состояния вещества: от сжатого за ударной волной весьма плотного твёрдого тела до сильно разреженной плазмы с высокой степенью ионизации.

В большинстве представляющих практический интерес явлений макроскопические параметры, характеризующие состояние вещества (плотность ρ , удельная внутренняя энергия e , температура T и т.д.), меняются достаточно медленно по сравнению со скоростями релаксационных процессов, приводящих к установлению термодинамического равновесия. В таких условиях частицы сплошной среды в каждый момент времени пребывают в состоянии близком к термодинамически равновесному.

При адиабатическом движении (отсутствии теплообмена между частицами) для описания равновесного состояния частиц газа оказывается достаточным задания энтропии или внутренней энергии как функций плотности и давления: $S(\rho, P)$, $U(\rho, P)$. В общем неадиабатическом случае в уравнение энергии входит ещё и температура, которую необходимо также связать с давлением и плотностью, например, в виде $P = P(\rho, T)$.

Как известно, все функции состояния могут быть получены с помощью одного из потенциалов (внутренней энергии e , энтальпии W , свободной энергии F и термодинамического потенциала Φ), заданных в виде функций соответствующих переменных: $U(S, \rho)$, $W(S, \rho)$, $F(T, \rho)$, $\Phi(T, \rho)$. Таким образом, под построением уравнения состояния было бы естественно понимать задание одной из этих зависимостей. Однако на практике под построением УРС часто принимается менее полное описание свойств вещества. Например, построение калорического УРС предполагает вычисление давления в зависимости от плотности и внутренней энергии $P = P(\rho, U)$. Наличие такого УРС, как уже отмечалось выше, достаточно для исследований адиабатических движений, но при этом остаются неизвестными другие параметры, в частности, температура, знание которой необходимо при описании многих физических процессов (фазовых переходов, теплового излучения, теплопроводности и т.д.)

Накопленный опыт математического моделирования движения сред с высокой плотностью подведенной к ним энергии позволяет сформулировать следующие основные тре-

бования, которым должны удовлетворять УРС, разрабатываемые с целью их использования в прикладных программах для ЭВМ:

- УРС должны быть **широкодиапазонными**, т.е. описывать поведение веществ от состояния плотной и холодной твердой фазы до состояния разреженной и сильно ионизированной плазмы;
- УРС должны **точно аппроксимировать** экспериментальные и теоретические данные о термодинамических свойствах веществ (**точно аппроксимировать** означает, что отклонение УРС от сравниваемых с ним данных не превышает погрешности этих данных);
- в пределах существования каждой фазы зависимости, описывающие УРС должны быть **непрерывными и гладкими** (это требование связано с известным фактом появления нефизических колебаний в решениях и потери точности численных алгоритмов на разрывах и изломах УРС, однако изломы и разрывы при фазовых переходах имеют физический смысл, их устранение – нежелательно И в этом случае уже численные алгоритмы должны быть адаптированы к таким особенностям УРС);
- УРС каждой фазы должен удовлетворять математическим **условиям нормальности** вещества:
 1. при $P \rightarrow \infty$ и $T = const$ должно $l/r \rightarrow 0$ (условие обеспечивает достаточно высокое сопротивление сжатию);
 2. $C_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v > 0$ (при этом условии обеспечивается устойчивость процесса теплопроводности);
 3. $\left(\frac{\partial P}{\partial u} \right)_s < 0$ ($u = l/r$ - удельный объем; условие обеспечивает существование скорости звука, т.е. движение среды описывается системой уравнений, допускающей распространение малых возмущений с конечной скоростью; такие системы уравнений относятся к гиперболическому типу и, следовательно, нарушение условия приводит к смене типа системы уравнений);
 4. $\left(\frac{\partial^2 P}{\partial u^2} \right)_T > 0$ (условие обеспечивает устойчивость ударных волн сжатия и, соответственно, неустойчивость ударных волн разрежения; выполнение этого условия не всегда возможно, т.к. существуют материалы, для которых по вполне физически объяснимым причинам выполняется противоположное неравенство и имеют место ударные волны разрежения);

- форма представления УРС должна быть достаточно **простой и удобной** для его изменение по мере появления новой информации о веществе;
- расчет УРС на ЭВМ должен быть **экономичным**, т.к. использующая его программа математического моделирования движения сплошной среды, как правило, сама требует достаточно много времени и памяти ЭВМ.

Перечисленные требования весьма противоречивы. Трудно одновременно обеспечить точность, экономичность, корректность (например, выполнение условий нормальности вещества) и широкодиапазонность УРС. В значительной степени разнообразие уравнений состояния объясняется поисками оптимального решения столь сложной задачи. Этот поиск ведётся и в настоящее время, свидетельством чему является непрекращающийся поток работ, посвященных построениям УРС. Применительно к случаю построения УРС в пределах одной фазы (локальных УРС) наибольшее распространение получило аналитическое представление, в котором вид функциональных зависимостей строится из теоретических соображений, а входящие в них константы имеют физический смысл и определяются из условий наилучшего описания экспериментальных данных (так построенные УРС получили название полуэмпирических). Широкодиапазонные (глобальные) УРС рационально представлять в форме таблиц, что обеспечивает экономичность УРС (затраты машинного времени на интерполяцию между табличными значениями сравнительно малы) и простоту внесения изменений (достаточно изменить значения табличных данных).

5.2. Простейшие уравнения состояния

В простейших случаях, когда рассматривается изменение термодинамических параметров в узких диапазонах (или, как говорят, в ограниченной области фазовой диаграммы вещества), привлекая различные довольно простые модельные представления, удаётся получить конкретные выражения для уравнения состояния. В зависимости от уровня сил взаимодействия между молекулами можно выделить три важных частных случая, которые по характеру поведения вещества будут существенно отличаться друг от друга:

- идеальный газ (взаимодействие отсутствует);
- неидеальный газ (имеется слабое взаимодействие);
- конденсированное вещество (сильное взаимодействие).

Рассмотрим эти случаи более подробно.

Идеальный газ. Наиболее просто получить уравнение состояния для случая, когда молекулы вещества – электрически нейтральны (отсутствуют дальнедействующие электромагнитные силы) и в среднем находятся на значительных расстояниях друг от друга по сравнению с собственными размерами. В этих условиях взаимодействием между молеку-

лами можно пренебречь и поведение вещества хорошо описывается моделью идеального газа, т.е. уравнением Клайперона - Менделеева, которое может быть записано как простейшее УРС вида $P = P(r, T)$:

$$P = (R / m)rT. \quad (5.1)$$

Неидеальный газ. Построение уравнения состояния для веществ, взаимодействием между молекулами которых пренебречь нельзя (конденсированное вещество, плотный газ, плазма), – значительно более трудная задача и к настоящему времени для многих важных случаев еще не решенная. При упрощающих предположениях методами молекулярно-кинетической теории удаётся получить конкретные выражения для УРС, позволяющие качественно описывать основные термодинамические процессы. Необходимо отметить, что рассматриваемые при построении УРС модели молекулярного взаимодействия являются, как правило, весьма приближёнными и их использование оправдано лишь простотой, позволяющей преодолеть математические трудности и получить результат в аналитическом виде. Истинные силы взаимодействия очень сложны и их количественное описание для большинства веществ представляет самостоятельную и до конца нерешенную проблему. В этой ситуации полезными оказываются две следующие простейшие модели:

- модель упругих шариков;
- максвеллова модель, в которой молекулы отталкиваются с силой, обратно пропорциональной пятой степени расстояния между ними.

Первая модель позволяет получать очень простые формы уравнения состояния и годится лишь для грубых качественных оценок.

В модели Максвелла любая данная молекула в любой момент времени взаимодействует со всеми молекулами газа. Однако такой строгий подход к задаче не требуется. Если газ не слишком плотный, то достаточно рассмотреть только парные столкновения молекул, а всеми остальными взаимодействиями каждой молекулы пренебречь. Пятая степень расстояния в силовом законе обеспечивает достаточно быстрое спадание силы между отдельными молекулами. Если газ не очень плотный, то маловероятно, чтобы три и больше молекул сближались так часто, чтобы их взаимодействие заметно сказалось на состоянии газа.

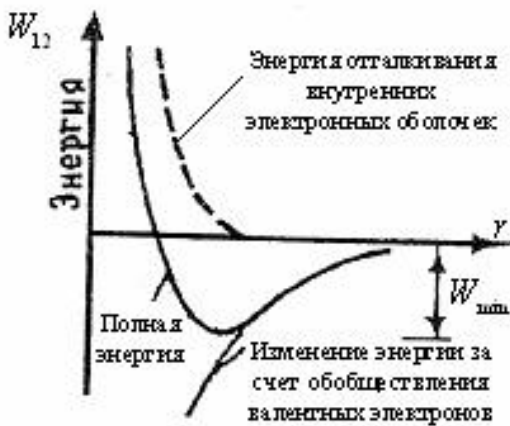
Заметим, что уравнение состояния идеального газа довольно часто может применяться с высокой точностью и к реальным газам. Когда такое приближение оказывается недостаточным, тогда необходимо учитывать отклонение реального газа от идеальности, связанное со взаимодействием составляющих его молекул. Наиболее просто это сделать при учёте только парных столкновений. Форма уравнения состояния при этом приобретает вид:

$$P = \frac{R}{m} \cdot rT \cdot \left(1 + \frac{N_A \cdot B(T)}{m} r\right), \quad (5.2)$$

где

$$B(T) = 0,5 \cdot \int (1 - \exp(-W_{12}/T)) dV.$$

Вывод формулы (5.2) удается сделать лишь для одноатомных частиц, однако, как показывает ее практическое использование, она остается в силе и для многоатомных газов. В этом случае потенциальная энергия взаимодействия молекул друг с другом W_{12} зависит не



только от их взаимного расстояния, но и от взаимной ориентации: Все полученные формулы имеют смысл, разумеется, при условии сходимости интеграла. Для этого, во всяком случае, необходимо, чтобы силы взаимодействия между молекулами достаточно быстро убывали с расстоянием. Если это условие не удовлетворяется, то газ, состоящий из одинаковых частиц, вообще не может существовать как однородное тело. Применительно к случаю одноатомных газов функция

взаимодействия имеет вид, изображённый на рисунке, где по оси абсцисс отложено расстояние r между атомами. На малых расстояниях W_{12} увеличивается с уменьшением расстояния, что соответствует силам отталкивания между атомами. После пересечения оси абсцисс она круто идет вверх, так что W_{12} скоро делается чрезвычайно большой, обеспечивая своим ростом взаимную "непроницаемость" атомов. На больших расстояниях W_{12} медленно увеличивается, асимптотически приближаясь к нулю. Увеличение W_{12} с расстоянием обусловлено взаимным притяжением атомов. Наличие точки минимума на кривой $W_{12}(r)$ указывает на возможность устойчивого равновесия в конфигурации из двух атомов. При этом абсолютное значение энергии в этой точке $|W_{\min}|$ обычно невелико и по порядку величины близко к критической температуре данного вещества ($T_{kp} \approx |W_{\min}|/k$).

В случае многоатомного газа энергия взаимодействия имеет аналогичный характер, но уже не может быть изображена в виде кривой показанной на рисунке, так как является функцией большого числа переменных.

Уравнение состояния (5.2) представляет по существу первые два члена разложения давления в ряд Тейлора по степеням плотности r . Первый член разложения соответству-

ет УРС идеального газа. Второй член получается при учете парного взаимодействия молекул, а следующие – описывают взаимодействие молекул группами по три, по четыре и т.д.

Плазма. Методы вычисления термодинамических величин неидеального газа заведомо непригодны для плазмы газа, состоящего из заряженных частиц, взаимодействующих по закону Кулона, так как в этом случае входящие в формулы интегралы расходятся. Кроме того, дальнедействующий характер кулоновского взаимодействия делает его вклад в термодинамические свойства вещества определяющим в широком диапазоне изменения параметров состояния. Поэтому газ в плазменном состоянии требует особого рассмотрения.

Наиболее просто установить требуемый вид УРС для полностью **ионизованной плазмы** (квазинейтральной смеси ионов и электронов при практически полном отсутствии нейтральных атомов). Будем считать, что газ очень слабо отклоняется от идеальности и функции состояния записываются в виде сумм, состоящих из соответствующих функций для идеального газа и кулоновских поправок ($N_i = n_i u$ - полное число ионов $i^{\text{го}}$ сорта в единице массы вещества):

$$\begin{aligned} U &= U_{\text{ид}} + U_{\text{кул}}, & F &= F_{\text{ид}} + F_{\text{кул}}, \\ P &= -\left(\frac{\partial F}{\partial u}\right)_{T, N_i} = -\left(\frac{\partial (F_{\text{ид}} + F_{\text{кул}})}{\partial u}\right)_{T, N_i} = P_{\text{ид}} + P_{\text{кул}}, \end{aligned} \quad (5.3)$$

где $F = U - T S$ – свободная энергия единицы массы. Соотношение для давления следует из выражения для дифференциала $F (dU = T dS - P du)$:

$$dF = d(U - T S) = (dU - T dS) - S dT = -P du - S dT. \quad (5.4)$$

Ввиду квазиэлектронейтральности плазмы среднее значение энергии кулоновского взаимодействия её частиц, если бы все они были равномерно распределены в пространстве независимо друг от друга, обратилось бы в ноль. Поэтому первые поправки в термодинамических величинах плазмы (по сравнению с их значениями в идеальном газе) возникают только при учёте корреляции между положениями различных частиц. В случае слабой неидеальности кулоновские поправки, обусловленные взаимным влиянием положения одних частиц на распределение других, вычисляются методом Дебая - Хюккеля. Предполагается, что вокруг каждого из ионов или электронов с зарядом $Z_i e$ (для электронов $Z = -1$) образуется неравномерно заряженное облако из соседних частиц. При этом распределение плотности заряда в нём описывается статистическим законом Больцмана для распределения частиц по энергиям в поле, создаваемом рассматриваемым центральным ионом и самим облаком. Решение задачи в такой постановке приводит к экспоненциальному убыванию потенциала j по мере удаления от иона

$$j_i = \frac{1}{4\pi e_0} \cdot \frac{Z_i e}{r} \cdot \exp\left(-\frac{r}{R_D}\right), \quad (5.5)$$

где $R_D = 1/\sqrt{\frac{e^2}{e_0 kT} \sum n_i Z_i^2}$ – дебаевский радиус (характерный размер облака), n_i – плотность ионов с зарядом $Z_i e$.

Статистический закон распределения Больцмана справедлив при условии, если в облаке находится достаточно много частиц, т.е. когда дебаевский радиус R_D значительно превышает расстояние между частицами $r_o \approx n^{-1/3}$ ($n = \sum n_i$ – плотность частиц)

$$1/\sqrt{\frac{e^2}{e_0 kT} \cdot \sum n_i Z_i^2} \gg n^{-1/3},$$

откуда получаем ограничение на плотность частиц ($\langle Z^2 \rangle = \sum n_i Z_i^2 / n$)

$$n \ll \left(\frac{e_0 kT}{e^2 \cdot \langle Z^2 \rangle} \right)^3. \quad (5.6)$$

Неравенство (5.6) более жесткое, чем обычно принимаемое условие идеальности не-ионизированного газа, заключающееся в малости энергии кулоновского взаимодействия

частиц $\frac{1}{4\pi e_0} \cdot \frac{e^2 \cdot \langle Z^2 \rangle}{r_o}$ по сравнению с их энергией теплового движения kT :

$$n \ll \left(\frac{4 \cdot p \cdot e_0 kT}{e^2 \cdot \langle Z^2 \rangle} \right) \approx 2 \times 10^3 \times \left(\frac{e_0 kT}{e^2 \cdot \langle Z^2 \rangle} \right). \quad (5.7)$$

Поэтому дебаевское рассмотрение справедливо для газа на три порядка более разреженного, чем ему требуется, чтобы быть идеальным в случае отсутствия ионизации.

В окрестности иона при $r \ll R_D$ из (5.5), раскладывая экспоненту в ряд Тейлора, получаем:

$$j_i \approx \frac{1}{4\pi e_0} \cdot \frac{Z_i e}{r} - \frac{1}{4\pi e_0} \cdot \frac{Z_i e}{R_D}. \quad (5.8)$$

Согласно принципу суперпозиции потенциал в соотношении (5.8) складывается из потенциала создаваемого ионом, и потенциала от окружающих ион зарядов $j_{ext} = -\frac{1}{4\pi e_0} \cdot \frac{Z_i e}{d}$.

Кулоновская энергия единицы массы газа может быть определена при известном j_{ext} по формуле электростатики:

$$U_{кул} = \frac{1}{2} \sum N_i \cdot e Z_i \cdot j_{ext} = -\frac{e^2}{8\pi e_0 d} \sum N_i Z_i^2 = -\frac{e^2 V}{8\pi e_0^{3/2} \sqrt{kT}} \left(\sum N_i Z_i^2 \right)^{3/2}. \quad (5.9)$$

В среднем между частицами действуют силы притяжения, т.к. каждый ион окружён частицами с зарядом противоположного знака. Поэтому полученное значение кулоновской поправки к энергии отрицательно.

Найдём кулоновскую поправку к свободной энергии. Из соотношения (5.4) следует

$S = -\left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_u$ и связь между внутренней и свободной энергиями записывается в виде:

$$U - F + TS = F - T^2 \cdot \left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_u = -T^2 \left(\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{F}{T}\right)\right)_u,$$

откуда, используя (5.8), получаем:

$$F_{кул} = T \int \frac{U_{кул}}{T^2} dT = T \int \frac{1}{T^2} \cdot \frac{e^3 u^{-1/2}}{8\pi e_0^{3/2} \sqrt{kT}} \left(\sum N_i Z_i^2\right)^{3/2} dT = \frac{e^3 u^{-1/2}}{8\pi e_0^{3/2}} \left(\sum N_i Z_i^2\right)^{3/2} \times \\ \times T \cdot \int \frac{dT}{T^2 \sqrt{kT}} = \frac{e^3 u^{-1/2}}{8\pi e_0^{3/2}} \left(\sum N_i Z_i^2\right)^{3/2} \cdot \left(-\frac{2}{3\sqrt{kT}}\right) = \frac{2}{3} U_{кул}.$$

$$P_{кул} = -\left(\frac{\partial F_{кул}}{\partial u}\right)_{T, N_i} = -\frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\partial U_{кул}}{\partial u}\right)_{T, N_i} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial u} \left[\left(\frac{e^3 u^{-1/2}}{8\pi e_0^{3/2} \sqrt{kT}} \left(\sum N_i Z_i^2\right)^{3/2} \right) \right]_{T, N_i} = \\ = -\frac{1}{3} \cdot \frac{e^3 u^{-3/2}}{8\pi e_0^{3/2} \sqrt{kT}} \left(\sum N_i Z_i^2\right)^{3/2} = \frac{U_{кул}}{3u}.$$

Таким образом, УРС для очень разреженной плазмы имеет вид:

$$P = P_{ид} + P_{кул} = (R/m) rT - \frac{1}{3} \cdot \frac{e^3}{8\pi e_0^{3/2} \sqrt{kT}} \left(\sum N_i Z_i^2\right)^{3/2}. \quad (5.10)$$

Следует отметить, что, помимо полученного уменьшения энергии и давления, кулоновское взаимодействие влияет на степень ионизации плазмы, увеличивая её. Это увеличение обусловлено тем, что свободный электрон, как и любая другая заряженная частица, имеет в плазме отрицательную потенциальную энергию, а следовательно, для его перевода в свободное состояние из связанного понадобится совершение работы меньшей, чем в нейтральном газе, у которого потенциальная энергия электрона в отсутствие взаимодействия с атомом равняется нулю.

Двухфазная среда (пар - жидкость). В газах взаимодействие между молекулами весьма слабо. По мере сжатия (усиления взаимодействия) свойства газов все больше отклоняются от свойств идеальных газов, и, в конце концов, газ переходит в конденсированное состояние (жидкость или кристалл). В нём взаимодействие между молекулами – велико, и свойства этого взаимодействия (а потому и свойства конденсата) сильно зависят от конкретного вида вещества. Поэтому принципиальным отличием конденсированного состояния от газов является невозможность получения каких-либо общих формул, кото-

рые бы количественно описывали его свойства независимо от устройства (строения и характеристик отдельных молекул, характера взаимодействия между молекулами и изменения их характеристик при взаимодействии).

Тем не менее, можно найти некоторую интерполяционную формулу, качественно описывающую переходы между жидкостью и газом. Эта формула должна давать правильные результаты в двух предельных случаях. Для разреженных газов она должна переходить в формулы, справедливые для идеальных газов. При увеличении плотности, когда газ приближается к жидкости, она должна учитывать ограниченную сжимаемость вещества. Такая формула будет тогда качественно описывать поведение газа и в промежуточной области (области двухфазного состояния вещества). Среди множества интерполяционных формул, удовлетворяющих поставленным требованиям, наиболее простым и удобным является уравнение Ван-дер-Ваальса.

Газ Ван-дер-Ваальса представляет собой модель реального газа, состоящую из твёрдых шариков с диаметром d , между которыми действуют силы взаимного притяжения. Учёт конечного размера молекул сводится к тому, что для единицы массы газа считается доступным не полный объём $u = 1/r$, а только его часть – "свободный" объём u' , меньший полного на учетверённый объём молекул ($b = 4 \times N_A \times \frac{p d^3}{6}$ – учетверенный объём, занимаемый молекулами моля газа):

$$u' = u - \frac{1}{m} \times N_A \times 4 \times \frac{p d^3}{6} = \left(\frac{1}{r} - \frac{b}{m} \right) \quad (5.11)$$

Силы притяжения между молекулами внутри объёма газа взаимно уравновешиваются. Однако если молекула находится в приграничном со стенкой слое, то она испытывает со стороны других молекул нескомпенсированную силу, направленную внутрь. Вследствие этого при соударении со стенкой она передаёт меньший импульс и давление P снижается на величину ΔP по сравнению с давлением идеального газа P' (поправка к давлению ΔP должна быть пропорциональна плотности молекул в слое и плотности молекул внутри, т.е. $\Delta P \sim n^2 = \left(\frac{1}{m} N_A / (1/r) \right)^2$ или $\Delta P = a \cdot r^2 / m^2$, где a - коэффициент пропорциональности):

$$P = P' - \Delta P = P' - \frac{a \cdot r^2}{m^2}. \quad (5.12)$$

Подставляя в уравнение для и.г. $P' \cdot u' = RT / m$ значения P' и u' из (5.11), (5.12), получаем уравнение Ван-дер-Ваальса:

$$\left(P + \frac{a}{m^2} r\right) \cdot \left(\frac{1}{r} - \frac{b}{m}\right) = \frac{RT}{m}. \quad (5.13)$$

Как уже упоминалось, несмотря на простоту предположений модели Ван-дер-Ваальса, уравнение (5.13) качественно описывает фазовый переход "пар - жидкость" и в первом приближении является УРС для возникающей при этом переходе двухфазной среды (под фазами понимаются две граничащие друг с другом однородные части системы, находящиеся в физически различных состояниях). Рассмотрим вопрос об этом фазовом переходе подробнее. При превращении газа в жидкость внутренняя энергия уменьшается, т.к. силы притяжения совершают работу и потенциальная энергия взаимодействия молекул падает (поэтому на обратный процесс испарения понадобится затратить энергию – теплоту испарения). При этом стремление энергии системы к минимуму способствует переходу "пар → жидкость". Обратное поведение имеет энтропия – мера упорядоченности молекул вещества, которая у жидкости ниже, чем у газа (у жидкости молекулы "чувствуют" друг друга – имеют ближний порядок, а у пара молекулы находятся в хаотическом движении; у некоторых жидкостей это чувство очень сильное, по меткому определению французского физика К. Дюваля, "вода - это жидкость ещё сохранившая воспоминание о своей кристаллической структуре, из которой она произошла", т.е. о льде, в котором реализуется дальний порядок в виде кристалла с гексагональной решёткой), и требование роста энтропии стимулирует переход "жидкость → пар". Таким образом, истинное состояние вещества (пар, жидкость или смесь этих двух фаз) определяется компромиссом между энергией и энтропией. Пусть, например, в системе, содержащей воду с паром, пар оказался ненасыщенным и поэтому вода необратимо испаряется. Тогда, используя первое и второе начала термодинамики, для этой системы получаем:

$$dS > \frac{dQ}{T} = \frac{dU + pdu}{T},$$

откуда (считаем, что фазовый переход идет при неизменной температуре и постоянном давлении):

$$d(U - TS + pu) < 0. \quad (5.14)$$

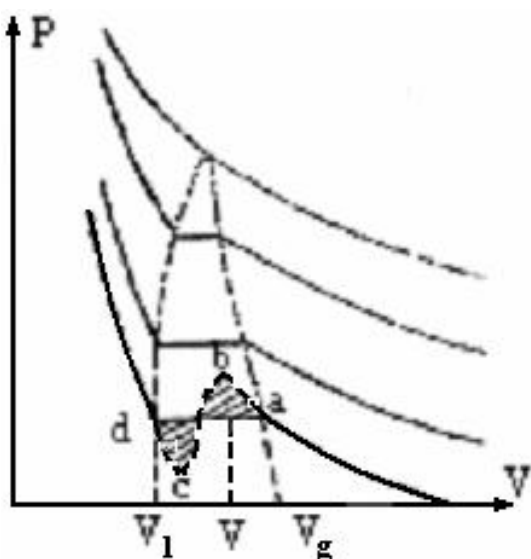
Входящая в неравенство (5.14) величина $\Phi = U - TS + pV$ представляет собой термодинамический потенциал и, следовательно, необратимое (самопроизвольное) фазовое превращение идёт с его уменьшением, а равновесие фаз имеет место при минимуме Φ . Поскольку уменьшение U и рост S приводят к падению термодинамического потенциала, то требование выполнения неравенства (5.14) и обеспечивает рассмотренный выше компромисс между энергией и энтропией.

Выполнение условия минимума Φ при равновесии фаз возможно лишь при равенстве термодинамических потенциалов, каждой из них (в нашем случае термодинамический потенциал единицы массы насыщенного пара должен быть равен термодинамическому, потенциалу единицы массы находящейся с ним в равновесии его жидкости), т.к. если какой-либо будет меньше, то переход в соответствующую ему фазу приведёт к дальнейшему падению Φ и равновесие нарушится (индекс g относится к насыщенному пару, а l к жидкости):

$$\Phi_g(T_g, P_g) = \Phi_l(T_l, P_l). \quad (5.15)$$

При термодинамическом равновесии температуры и давления фаз равны и равенство (5.15) является неявным представлением кривой фазового равновесия (зависимости давления насыщенного пара от температуры $P_{нас} = P_{нас}(T)$).

Ясное представление о процессе перехода пара в свою жидкость можно получить, рассматривая его изотермическое сжатие, показанное на рисунке в виде изотерм, построенных в переменных P и u .



Если сжатие начинать при достаточно низких температурах, то рано или поздно мы дойдем до области фазового равновесия (она ограничена на рисунке пунктирной линией, называемой бинодалью). В этот момент давление возрастёт до давления насыщенного пара при температуре, соответствующе рассматриваемой изотерме. При дальнейшем сжатии начнётся конденсация пара (в системе появятся капельки жидкости), препятствующая росту давления (вдали от критической температуры плот-

ность жидкости на три порядка больше плотности своего насыщенного пара и переход "пар \rightarrow жидкость" компенсирует изменение объёма при сжатии), и пока весь пар не перейдёт в жидкость давление будет постоянным и равным $P_{нас}$. Поэтому изотерма, будучи в области существования двух фаз одновременно и изобарой, до конца конденсации будет идти горизонтально. Однако весь этот горизонтальный участок соответствует одной и той же точке на диаграмме в координатах давление – температура.

Таким образом, прямолинейные горизонтальные участки изотерм, показанных на рисунке, описывают состояния двухфазной системы "пар – жидкость". При этом одна точка такого участка отличается от другой лишь относительным содержанием фаз. Если доля

жидкости x , то удельный объём смеси u определяется через удельные объёмы фаз u_g и u_l по формуле (известное правило "рычага")

$$u = x \cdot u_g + (1 - x) \cdot u_l,$$

из которой следует

$$x = \frac{u_g - u}{u_g - u_l}.$$

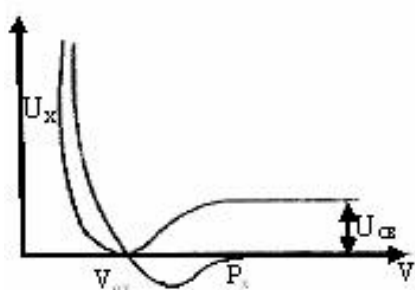
Для сравнения на рисунке пунктирной линией показана изотерма, построенная по уравнению Ван-дер-Ваальса (5.13). В области двухфазности каждая изотерма имеет максимум и минимум, между которыми лежит участок с положительной производной давления по объёму при постоянной температуре, такое поведение вещества приводит к его неустойчивости и в природе не наблюдается. Отрезки изотерм ab и cd имеют физическое объяснение: им соответствуют метастабильные состояния (неустойчивые состояния, в которых термодинамический потенциал – неминимален) пересжатого пара и перерасширенной жидкости. Положение горизонтального отрезка, описывающего равновесный переход жидкости в её пар, определяется условием фазового равновесия, согласно которому термодинамические потенциалы единицы массы должны быть равны. Геометрически это условие эквивалентно равенству площадей, заштрихованных на рисунке (так называемое правило Максвелла).

С ростом температуры длина горизонтального участка изотерм уменьшается, а, начиная с некоторого критического значения $T_{кр}$, вообще отсутствует. Поэтому в случае достаточно высоких температур $T > T_{кр}$ пропадает различие между жидкостью и её паром, и возможно существование лишь одной фазы. Из уравнения Ван-дер-Ваальса критические значения температуры, давления и объёма выражаются через параметры a и b . Для этого надо дважды продифференцировать в этом уравнении давление по объёму при $T = const$ и приравнять производные $\frac{\partial P}{\partial u}$, $\frac{\partial^2 P}{\partial u^2}$ нулю, что определяет точку перегиба и даёт систему уравнений для нахождения критических параметров. При наличии критической точки между всякими двумя состояниями вещества может быть произведен непрерывный переход. Ясно, что критическая точка может существовать лишь для таких фаз, различие между которыми имеет лишь чисто количественный характер. Таковы жидкое и газообразное состояния вещества, для которых характерен беспорядок в расположении частиц. Так как беспорядочные расположения и движения молекул не могут кардинально отличаться друг от друга, то, во-первых, между ними возможен непрерывный переход, а во-вторых, может иметься лишь один вид жидкого или газообразного состояния.

Рассмотрим теперь термодинамические свойства кристалла при больших значениях давления и температуры, которые представляют интерес для физики высоких плотностей энергии. Давление P и удельную внутреннюю энергию U ; обычно представляют в виде суммы упругой и тепловой частей. Упругие составляющие P_x и U_x связаны исключительно с силами взаимодействия между частицами и зависят только от удельного объёма вещества $u = 1/r$. При абсолютном нуле тепловые составляющие, обусловленные нагревом (тепловым движением частиц), отсутствуют и значения упругих составляющих равны полным. Поэтому P_x и U_x называют холодными давлением и энергией. Поскольку при $T \equiv 0$ и $S \equiv 0$, то нулевая изотерма $P = P_x(u)$ является одновременно и адиабатой. Из (5.4) получаем связь холодного давления с энергией:

$$P_x = -\left(\frac{\partial F}{\partial V}\right) = -\left(\frac{\partial(U - TS)}{\partial V}\right)_{T=0} = -\frac{dU_x}{dV}. \quad (5.16)$$

Качественный вид зависимостей $P = P_x(V)$ и $U_x(V)$ представлен на рисунке. Кривая энергии имеет такой же характер, как и обсуждаемая ранее зависимость потенциальной энергии



взаимодействия атомов от расстояния между ними $W_{12}(r)$. Объём V_{ox} соответствует механическому равновесию при нулевых значениях температуры и давления (этот объём лишь незначительно (1 - 2%) отличается от удельного объёма V_o при нормальных условиях $T_o \approx 300^\circ K$, $P_o = 1 \text{ атм}$), когда междуатомные силы отталкивания и притяжения компенсируют друг друга, а энергия взаимодействия U_x , достигает своего минимума равного нулю (при $T = 0$ атомы, согласно квантовой механике, остановиться не могут и совершают нулевые колебания, от уровня энергии которых и отсчитывается $U_x(V)$). Если $V > V_{ox}$, то преобладают силы притяжения и с ростом объёма энергия растёт до своего предельного значения $U_{св}$ равного энергии связи атомов. Очевидно, это значение представляет собой работу, которую надо затратить, чтобы развести при $T = 0$ атомы единицы массы кристалла на бесконечность (теплоту сублимации при абсолютном нуле)

$$U_{св} = -\int P_x(u) du. \quad (5.17)$$

Тепловые части давления и энергии связаны с движением атомов и тепловым возбуждением электронов т.е. состоят из двух частей P_a , P_e и U_a , U_e . Поэтому удельная внутренняя энергия и давление кристалла записываются в виде:

$$\begin{aligned} U &= U_x(\mathbf{u}) + U_a + U_e, \\ P &= P_x(\mathbf{u}) + P_a + P_e. \end{aligned} \quad (5.18)$$

Если температура не высока, атомы твердого тела совершают колебания около положения равновесия (узлов кристаллической решётки). Колебания остаются гармоническими до тех пор, пока с ростом температуры их амплитуда не станет сравнимой с расстояниями между атомами или пока тепловая энергия колебаний kT значительно меньше высоты потенциальной ямы в узле. При нормальных условиях высота барьера такова, что тепловая энергия с ней сравнивается при температурах порядка десятка тысяч градусов. Однако при сжатии величина увеличивается и можно приближенно рассматривать движения атомов подобными их малым колебаниям в кристалле до $T \approx 20000 - 30000^\circ \text{K}$ (кристалла при этом как такового может и не быть, поскольку температура плавления ниже этих значений).

При температурах выше нескольких сотен градусов Кельвина квантовые эффекты в колебаниях атомов не играют никакой роли, на каждую колебательную степень свободы приходится одна и та же энергия kT и атомная теплоёмкость (теплоёмкость грамм-атома) оказывается одинаковой для всех кристаллов, не зависящей от температуры и равной $3 \times kT \times N_A = 3R$. Это утверждение носит название **закона Дюлонга и Пти**. Из этого закона следует (U_o - внутренняя энергия при нормальных условиях):

$$U_a = C_v \cdot (T - T_o) + U_o = \frac{R}{m} \cdot (T - T_o) + U_o. \quad (5.19)$$

Если $T \gg T_o$, то $U_a \gg U_o$ и из (5.19) имеем

$$U_a = C_v \cdot T. \quad (5.20)$$

Вид температурной зависимости теплового давления атомов можно найти из термодинамического тождества

$$\left(\frac{\partial U}{\partial \mathbf{u}} \right)_T = T \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_u - P, \quad (5.21)$$

которое получается из первого и второго начал термодинамики, записанных для изотермического процесса:

$$dU = dQ - Pdu = T \cdot dS - Pdu - T \cdot \left(\frac{\partial S}{\partial \mathbf{u}} \right)_T \cdot d\mathbf{u} - Pdu = T \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_u \cdot d\mathbf{u} - Pdu.$$

Здесь использовано соотношение $\left(\frac{\partial U}{\partial \mathbf{u}} \right)_T = \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_u$, вытекающее из равенства вторых смешанных производных свободной энергии и выражения для её дифференциала (5.4). Поскольку холодные составляющие удовлетворяют тождеству (5.21), то из него следует про-

порциональность теплового давления температуре, а значит, согласно (5.20), внутренней энергии:

$$P_a = P_a(u, T) - \Gamma(u) \cdot \frac{C_v \cdot T}{u} = \Gamma(u) \cdot \frac{U_a}{u}, \quad (5.22)$$

где безразмерная функция удельного объёма $\Gamma(u)$ называется коэффициентом Грюнайзена. При нормальных условиях для металлических кристаллов $\Gamma \approx 2...2,5$, а для идеального газа $\Gamma \approx g - 1 = \frac{2}{3}$ (в случае одноатомных молекул), т.к. у него всё давление тепловое и равняется $P = (g - 1) \cdot U / u$.

Коэффициент Грюнайзена удаётся связать с функцией холодного давления. При высоких температурах методами статистической физики получается выражение $\Gamma(u)$ через среднюю частоту колебаний атомов $\langle v \rangle$

$$\Gamma(V) = - \frac{\partial \ln(\langle v \rangle)}{\partial \ln(u)}. \quad (5.23)$$

Средняя частота спектра упругих колебаний кристаллической решетки близка к максимальной частоте. В свою очередь, максимальная частота равна отношению скорости распространения упругих волн $c_o = (-V^2 \cdot \frac{dP_x}{dV})^{1/2}$ к минимальной длине волны, которая в кристалле, очевидно, не может быть меньше удвоенного межатомного расстояния $I = 2r_o \sim V^{1/3}$:

$$\langle v \rangle \sim v_{\max} \sim c_o / I \sim c_o V^{-1/3} = V^{2/3} \cdot \left(- \frac{dP_x}{dV} \right)^{1/2}.$$

Взяв от этого выражения логарифмическую производную, получаем **формулу Слэтера-Ландау**:

$$\Gamma(V) = - \frac{\partial \ln(\langle v \rangle)}{\partial \ln(V)} = - \frac{2}{3} - \frac{V}{2} \cdot \left(\frac{d^2 P_x}{dV^2} \right) \left(\frac{dP_x}{dV} \right) \quad (5.24)$$

Рассмотрим теперь тепловое возбуждение электронов в кристаллах металла. В простейшей модели металлических тел внешние валентные электроны атомов оторваны от них и образуют свободный электронный газ. Этот газ оказывается вырожденным (не подчиняется классической статистике Больцмана) даже при нормальных условиях из-за своей высокой плотности. Поскольку электроны имеют нецелый спин равный $1/2$, то они являются фермионами, а их поведение описывается статистикой Ферми – Дирака. Отклонения свойств газа от классических ведут в статистике Ферми – Дирака к увеличению давления по сравнению с его значением в невырожденном газе, т.к. квантовомеханические

обменные эффекты приводят к появлению дополнительного эффективного отталкивания между фермионами.

При абсолютном нуле электронный газ полностью вырожден и электроны распределены по различным квантовым состояниям так, чтобы полная энергия имела наименьшее возможное значение. Так как, согласно принципу Паули (см. главу VIII по атомной и ядерной физике), в каждом квантовом состоянии может находиться не более одного электрона, то электроны заполняют все состояния с энергиями от нулевой до некоторой наибольшей, величина которой определяется числом ферми-частиц. Из соотношения неопределенностей Гейзенберга (глава VII по квантовой механике) видно, что для частиц, имеющих компоненты импульсов в интервалах $(p_x, p_x + dp_x)$, $(p_y, p_y + dp_y)$, $(p_z, p_z + dp_z)$ и координаты в интервалах $(x, x + dx)$, $(y, y + dy)$, $(z, z + dz)$ число квантовых состояний равняется (учтена двукратность спинового вырождения уровня: возможность отличаться в каждом состоянии только проекцией спина $\pm \hbar/2$):

$$dN = 2 \cdot \frac{dp_x \cdot dx}{2p\hbar} \cdot \frac{dp_y \cdot dy}{2p\hbar} \cdot \frac{dp_z \cdot dz}{2p\hbar} = \frac{2 \cdot (dp_x \cdot dp_y \cdot dp_z) \cdot (dx \cdot dy \cdot dz)}{(2p\hbar)^3} = \frac{2 \cdot 4\pi p^2 \cdot dp \cdot dV}{(2p\hbar)^3}$$

Тогда для полного числа, электронов N , движущихся в объеме V с импульсами от нулевого до максимального p_F , имеем:

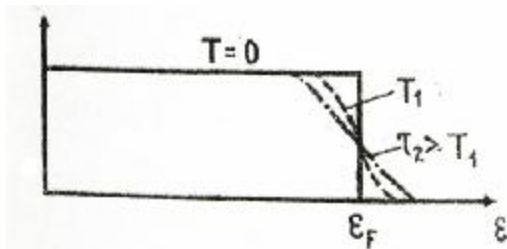
$$N = \frac{V}{p^2 \hbar^3} \int_0^{p_F} p^2 \cdot dp = \frac{V \cdot p_F^3}{3 \cdot p^2 \cdot \hbar^3},$$

откуда для граничных импульсов p_F и энергий e_F (энергий Ферми) получаем ($n_e = N/V$ – плотность электронов):

$$p_F = (3 \cdot p^2 \cdot n_e)^{1/3} \hbar, \quad e_F = \frac{p_F^2}{2m_e} = (3 \cdot p^2 \cdot n_e)^{2/3} \cdot \frac{\hbar^2}{2m_e}. \quad (5.25)$$

Энергия Ферми в металлах составляет несколько электронвольт, а соответствующая ей температура вырождения $T^* = e_F / k$ несколько десятков тысяч градусов

$$(T_{Na}^* = 37000^\circ K, T_{Ag}^* = 64000^\circ K, T_{Cu}^* = 82000^\circ K).$$



Поскольку мы рассматриваем не слишком высокие температуры, при которых атомы ещё совершают малые колебания в узлах, и большие сжатия (из (5.25) следует возрастание температуры вырождения при сжатии $T^* \sim n_e^{2/3} \sim V^{-2/3}$), то в нашем случае электронный газ всегда сильно вырожден. Для сильно вырожденного газа, когда $T \ll T^*$, при повышении температуры на более высокие энергетические состояния

могут, очевидно, перейти только электроны, имеющие энергию меньшую энергии Ферми не более, чем на kT . Доля этих могущих быть возбужденными электронов, поэтому порядка kT/e_F (см. рисунок, где показано распределение электронов по энергиям при абсолютном нуле и пунктирной линией при температуре T). Каждый из них приобретает при возбуждении дополнительную энергию порядка kT . Следовательно, для тепловой энергии электронов получаем (используем (5.25)):

$$U_e \sim (kT/e_F) \cdot kT \sim T^2 \cdot n_e^{-2/3} \sim T^2 \cdot V^{2/3},$$

откуда

$$U_e = \frac{1}{2} \cdot b_o \cdot \left(\frac{u}{u_o} \right)^{2/3} \times T^2, \quad C_{ve} = \left(\frac{\partial U_e}{\partial T} \right)_v = b_o \left(\frac{u}{u_o} \right)^{2/3} \times T, \quad (5.26)$$

где b_o - коэффициент электронной теплоёмкости при нормальном удельном объёме u_o .

Для любого идеального газа (как атомного, так и электронного; как вырожденного, так и невырожденного) справедливо, что тепловая часть давления ("кинетическое" давление электронного газа при $T=0$ включается в холодное давление) равна две трети от плотности тепловой энергии. Поэтому в случае вырожденного электронного газа (как это не удивительно, но можно показать, что вырожденный электронный газ тем более идеальный, чем больше его плотность) получаем:

$$P_e = \frac{2}{3} \cdot \frac{U_e}{u} = \frac{1}{3} \cdot \frac{b_o}{u_o^{2/3}} \cdot \frac{T^2}{u^{1/3}}. \quad (5.27)$$

Таким образом, соотношения (5.18), (5.19), (5.22), (5.26), (5.27) полностью решают вопрос об УРС кристалла при не слишком высоких температурах (до нескольких десятков тысяч градусов) и больших сжатиях. В них входят: упругое давление как функция объёма $P_x(u)$; коэффициент Грюнайзена $\Gamma(u)$, определяемый дифференцированием $P_x(u)$ согласно соотношению (П2.24); коэффициент электронной теплоёмкости при нормальном объёме, который берётся из опытов по измерению теплоёмкости при очень низких температурах. Поэтому неизвестной функцией, задающей свойства кристалла, является упругое давление в зависимости от удельного объёма $P_x(u)$. Эта зависимость определяется расчётным или экспериментальным путём.

Теоретическая кривая холодного сжатия может быть в принципе определена в результате детального рассмотрения межатомных взаимодействий в кристаллах. Поскольку характер этих взаимодействий достаточно сложен и зависит от конкретной структуры твердого тела, то выполнить эти расчеты можно лишь в рамках достаточно частных моделей. Удачным для большинства металлических кристаллов оказалось представление кривой сжатия $P_x(u)$ в виде

$$P_x = A \cdot x^{-2/3} \exp[B \cdot (1 - x^{1/3})] - K \cdot x^{-4/3} + g \frac{8 r_o \cdot R \cdot q_D}{9 m \cdot x},$$

где $x = u/u_o$ - безразмерный объём; $q_D = hv_{\max}/k$ - характеристическая температура Дебая, определяющая максимальную частоту колебаний атомов в кристалле; m - атомный вес; A, B, K - постоянные, подлежащие экспериментальному определению. Последнее слагаемое соответствует вкладу в давление нулевых колебаний. Первый член описывает отталкивание, обусловленное перекрытием электронных оболочек, второй член отражает кулоновское взаимодействие свободных электронов с положительными ионами остова и обменное взаимодействие между свободными электронами.

Для кривой холодного сжатия иногда предлагаются эмпирические соотношения, у которых отсутствует обоснование даже характера зависимости. Они часто оказываются весьма полезными в прикладных исследованиях, поскольку опираются на экспериментальные данные. В качестве примера приведём наиболее простое эмпирическое соотношение, которое, тем не менее, пригодно для описания поведения реальных материалов в широком интервале давлений

$$P_x = \frac{B_o}{m - n} \cdot (x^{-n} - x^{-m}),$$

где B_o, n, m - экспериментально определяемые константы.

Во многих случаях отказываются и от применения формулы Слэттера - Ландау (5.24), определяя зависимость $\Gamma(u)$ независимо от функции $P_x(u)$. При небольших сжатиях можно предполагать постоянство коэффициента Грюнайзена или использовать соотношение

$$\Gamma(u)/u = \Gamma_o/u_o = const,$$

которое хорошо согласуется с экспериментальными данными при умеренных сжатиях. Наконец, для описания поведения веществ в широком диапазоне давлений и температур, в уравнении состояния предполагается зависимость коэффициента Грюнайзена не только от объема, но и от энергии и температуры. Заметим, что в этом случае зависимость $\Gamma(u, T)$ не совпадает с термодинамическим определением коэффициента Грюнайзена и, строго говоря, должна рассматриваться как некая новая функция.

5.3. Физические модели сильно сжатого вещества

Построение УРС радикальным образом упрощается при экстремально высоких давлениях или температурах ($P \gg 3 \times 10^{13} \text{ Па}$; $T \gg 10^5 \text{ К}$), когда электронные оболочки оказываются раздавленными и вещество может считаться состоящим из ядер и электронов. Такие условия реализуются в различных астрофизических объектах и пока недоступны

для экспериментальных исследований. Однако УРС с экстремальными параметрами могут служить в качестве ассимптотик при построении широкодиапазонных моделей поведения вещества. Современные модели сжатого вещества используют **ячеечное приближение**. Весь объем разбивается на многогранные электронейтральные атомные ячейки, каждая из которых содержит ядро заряда Z и столько же электронов. Поведение электронов в поле неподвижного ядра своей ячейки описывается некоторыми модельными уравнениями, а влияние заряженных частиц других ячеек учитывается заданием соответствующих граничных условий или введением дополнительных членов в уравнения. Решение уравнений используется для построения электронных составляющих термодинамических функций. Затем рассчитывается тепловое, движение ядер и связанные с ним ядерные составляющие термодинамических функций. Так как движение ядер слабо влияет на электронные уравнения, то в первом приближении электронные и ядерные составляющие аддитивны.

При больших давлениях атомы плотно упакованы, и многогранные ячейки мало отличаются от сфер. Поэтому их обычно заменяют сферическими ячейками Вигнера - Зейтца с эквивалентным объемом $V = 1/n_{я}$ и радиусом $R = (3V / 4\pi)^{1/3} = (3 / 4\pi n_{я})^{1/3}$.

Электронные модели. Одной из первых была модель **Томаса - Ферми (ТФ)**. В этой модели электронная плотность вычисляется в квазиклассическом приближении по внутриатомному самосогласованному электрическому потенциалу, а квантовый эффект группировки электронов в оболочки игнорируется полностью (электроны в ячейке рассматриваются как газ, находящийся в достаточно медленно меняющемся по радиусу электростатическом поле). Распределение электрического потенциала по радиусу ячейки определяется из уравнения электростатики (уравнения Пуассона), в котором плотность заряда выражается через искомый потенциал в предположении, что газ - вырожден и подчиняется статистике Ферми - Дирака. Уравнение дополняется двумя граничными условиями: в центре ячейки при $r = 0$ требуется, чтобы поле переходило в кулоновское поле ядра, а на границе ячейки при $r = R$ обращалось в ноль в силу электронейтральности ячейки. Оказывается, что в уравнениях и граничных условиях можно сделать замену переменных так, чтобы в них перестал входить атомный номер Z (он будет входить в формулы преобразования переменных), т.е. модели ТФ имеет место подобие по Z . Поэтому численное интегрирование дифференциального уравнения для потенциала необходимо выполнить только один раз независимо от величины Z . Модель ТФ по своему существу описывает только силы отталкивания (ячейки оказывают друг на друга положительное давление, создаваемое в них электронным газом) и не учитывает сил притяжения, обеспечивающих соединение атомов в твердое тело. Сжатая до размеров в твердом теле холодная ячейка ТФ имеет энергию большую, чем свободный атом, а, на самом деле, при абсолютном нуле давление

в твёрдом теле равно нулю и энергия связанного состояния атома меньше энергии свободного атома.

Для введения в модель сил притяжения необходим учет обменной энергии. Модель Томаса – Ферми с квантовыми и обменными поправками получила название модели **ТФП**. Эта модель позволяет получить более верное распределение электронной плотности на периферии ячейки и вблизи ядра, где нарушаются условия квазиклассичности. Однако уравнения модели ТФП уже не имеют подобия по Z и для каждого элемента надо проводить отдельный расчет.

Как уже отмечалось, с уменьшением давлений и температур поведение твердых тел характеризуется большим разнообразием и индивидуальностью свойств каждого вещества. Статистический подход, используемый в квазиклассических ТФ и ТФП моделях, усредняет конкретные особенности веществ (в частности, размывает энергетический спектр атомов, составляющих кристаллическую решетку) и оказывается слишком грубым. Поэтому для расчета термодинамических характеристик требуется применение общих квантовомеханических моделей. К каким моделям относятся **модели типа Хартри**, в которых одноэлектронные волновые функции определяются из уравнения Шредингера (см. главу VII по квантовой механике) с тем или иным самосогласованным потенциалом. Сильно сжатое твердое вещество, как правило, находится в состоянии плотно упакованной высокосимметричной кристаллической структуры, что оправдывает применение модели сферических ячеек Вигнера – Зейтца и постановку блоховских граничных условий или некоторых приближений к ним. При выполнении условий Блоха вместо дискретного спектра энергии свободного атома возникают зоны разрешенных состояний в кристалле.

Простейшей квантовомеханической моделью твердого тела является модель Хартри, в которой самосогласованный потенциал описывает только электрическое взаимодействие электронов. Более полная модель, учитывающая в потенциале обменное взаимодействие электронов называется моделью Хартри – Фока (ХФ). Расчеты по ней намного более трудоемки, чем по модели Хартри. Вычислительные трудности, возникающие при введении в зонную модель обменных эффектов, обусловлены необходимостью решения инергодифференциальных уравнений. Приближенный учет обмена, при котором в уравнениях модели ХФ реальный нелокальный обменный потенциал заменяется на усредненный локальный был предложен Слэтером. Выполненные по квантовомеханической модели Хартри – Фока – Слэтера (ХФС) расчеты показали существенно лучшее совпадение с экспериментальными данными, чем при сравнениях с квазиклассическими моделями ТФ и ТФП. В отличие от статических моделей, модели использующие зонную теорию смогли передать ряд качественных эффектов, вытекающих из периодического закона. Например,

различную сжимаемость и нормальную плотность соседних по таблице Менделеева элементов. Вместе с тем при пониженных давлениях ($P \leq 10^{12} \text{ Па}$) сравнение с экспериментальными данными по ударным адиабатам металлов указывает на недостаточную точность модели ХФС в этой области.

Модели ядерной компоненты. Простейшей моделью является модель идеального газа ядер (ИГЯ). Принимается, что ядра подчиняются статистике Больцмана и вносят свой аддитивный вклад в полные давления и удельную тепловую энергию. При высоких температурах этот вклад соответствует обычному одноатомному газу:

$$P_y = n_y \cdot k \cdot T, \quad U_y = \frac{3}{2} \cdot \frac{n_y}{r} \cdot k \cdot T.$$

Модель ИГЯ хорошо применима при малых плотностях или очень высоких температурах, когда вещество является почти идеальной плазмой.

В модели **однокомпонентной плазмы** (ОКП) ядер делается попытка учесть неидеальность ядерной компоненты. Для этого вводится эффективная кратность ионизации, рассчитываемая по известной из электронной модели плотности отрицательного заряда на границе ячейки. Ионные остовы эффективных зарядов, размерами которых пренебрегают, рассматриваются как ОКП на компенсирующем фоне свободных электронов. Таким образом модель ОКП сводит задачу расчета поведения ядер к типично плазменной неидеальности, которая при малых плотностях переходит в модель разреженной полностью ионизованной плазмы, термодинамические характеристики которой рассчитываются методом Дебая – Хюккеля (см. раздел П2.2).

В настоящее время существуют и другие модели ядерной компоненты (модель осциллирующих ядер, модель неточечных ионов и т.д.), останавливаться на которых мы не будем.

5.4. Полуэмпирические уравнения состояния

Из предыдущих разделов следует, что описание термодинамических свойств неидеальных сред требует построения сложных моделей, которые затруднительно использовать при численном моделировании динамики сплошных сред с высокой плотностью энергии (ввиду их ограниченной области применимости, связанных с ними вычислительных трудностей, а также недостаточности объема и разнородности представления полученной из них информации).

Альтернативный способ расчета свойств неидеальных сред заключается в построении полуэмпирических УРС. Наиболее традиционным, удобным и оправдавшим себя на практике при построении УРС этого типа является разделение термодинамического потенциала, например, свободной энергии $F(V, T)$, на холодную составляющую и тепловые

составляющие движения атомов и термодинамического возбуждения электронов (при рассмотрении простейшего УРС для кристалла мы аналогичным образом разбивали внутреннюю энергию и давление)

$$F(\mathbf{u}, T) = U_x(\mathbf{u}) + F_a(\mathbf{u}, T) + F_e(\mathbf{u}, T), \quad (5.28)$$

где учтено, что для холодной части при абсолютном нуле

$$F(\mathbf{u}, 0) = U(\mathbf{u}, 0) - T \cdot S = U_x(\mathbf{u}).$$

Конкретный вид входящих в (5.28) слагаемых, а также число свободных параметров, подбираемых из условия наилучшего описания имеющихся экспериментальных данных, зависит от общности соответствующих полуэмпирических моделей и здесь обсуждаться не будет.

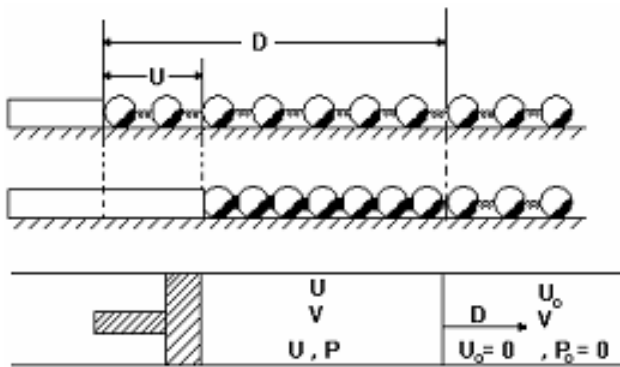
При построении полуэмпирических УРС решающая роль отводится эксперименту. Его главное назначение заключается в проверке и корректировке применяемых функциональных зависимостей для описания термодинамики вещества в различных областях фазовой диаграммы, а также в определении многочисленных констант, входящих в УРС. Первая задача стимулирует развитие новых экспериментальных методов и соответствующих установок для достижения экстремальных состояний вещества, чтобы охватить фазовую диаграмму вещества в более широком диапазоне. При решении второй задачи константы определяются по экспериментальным и теоретическим данным, в качестве которых могут, служить следующие:

- теоретические данные, получаемые по современным квантовомеханическим моделям (например, модели ХФС, см. раздел П2.3), которые справедливы при экстремально высоких давлениях и температурах или в области сильного вырождения, а также по классическим моделям сильно разреженного газа (например, модели полностью ионизованной плазмы, рассчитываемой по методу Дебая – Хюккеля, см. раздел 5.2);
- экспериментальные данные стационарных теплофизических экспериментов в диапазоне давлений $P \leq 50 \text{ кбар}$ и температур $T \leq 2500^\circ \text{ K}$ (данные по тепловому расширению, вид фазовых диаграмм (кривые фазового равновесия), термодинамические характеристики твердой и жидкой фаз, теплоты фазовых переходов и т.д.);
- экспериментальные данные при сжатиях давлением до 1 Мбар, полученные на стационарных лабораторных установках;
- экспериментальные данные по ударному сжатию сплошных и пористых материалов при давлениях до 10 Мбар.

Остановимся на возможностях использования при построении полуэмпирических УРС результатов по ударному сжатию. Реализация ударного сжатия материалов не связа-

на с применением прессов и пьезометрических бомб, а следовательно, не ограничена прочностью материалов, из которых они изготавливаются. В испытываемых образцах, по которым движутся ударные волны (эти волны создаются воздействием на образец быстро движущегося ударника или в результате детонации на поверхности взрывчатого вещества), высокое давление сохраняется в течение коротких промежутков времени из-за инертности вещества и связанной с ней конечности скорости распространения волн расширения.

Распространение ударной волны (УВ) по веществу легко себе представить, рассмотрев движение простейшей одномерной модели деформируемой среды, состоящей из упруго соединенных друг с другом шариков (см. рисунок). Возмущение этой среды осуществляется внезапно начавшим двигаться с постоянной скоростью поршнем.



Скорость перемещения шариков – массовая скорость вещества u – равна в нашем случае скорости поршня, толкающего шарики. Эта скорость всегда меньше скорости границы возмущения (границы, отделяющей движущиеся сжатые шарики от покоящихся и раздвинутых) – скорости ударной волны D . Уже на этом простом примере видно, что в области УВ происходит резкое изменение параметров движения и состояния среды (скорости шариков и сжатия пружин). Поэтому в качестве модели УВ часто используется ее представление в виде движущейся поверхности разрыва: поверхности, на которой обычно непрерывные в модели сплошной среды характеристики скачком изменяют свои значения. Конечно, величины скачков не могут быть произвольными и должны удовлетворять определенным условиям. В частности, записанные для величин, относящихся к разным сторонам УВ, законы сохранения массы, импульса и энергии дают следующие соотношения на фронте ударной волны:

$$D \cdot V = (D - u) \cdot u_0, \quad (5.29)$$

$$2D \cdot u = P \cdot u_0, \quad (5.30)$$

$$U - U_0 = \frac{1}{2} \cdot u^2 = \frac{1}{2} \cdot P \cdot (u_0 - u). \quad (5.31)$$

При написании (5.29) – (5.31) предполагалось, что среда перед УВ покоится, а ее давление P_0 много меньше давления P за ударной волной. Из (5.29), (5.30) следуют выражения для скорости УВ и массовой скорости вещества через давление P и удельный объем u :

$$D^2 = u_0^2 \cdot \frac{P}{u_0 - u}, \quad (5.32)$$

$$U_H(\mathbf{u}_0, U_0, \mathbf{u}) = U_0 + \frac{c_0^2}{2} \cdot \frac{(1 - \mathbf{u}/\mathbf{u}_0)^2}{(1 + b \cdot \mathbf{u}/\mathbf{u}_0 - b)^2}. \quad (5.36)$$

Соотношений $P_H = P_H(\mathbf{u}_0, \mathbf{u})$, $U_H = U_H(\mathbf{u}_0, U_0, \mathbf{u})$ оказывается достаточно для построения входящих в полуэмпирический УРС (5.34) неизвестных холодных составляющих давления и энергии, если задаться некоторым видом зависимости $\Gamma = \Gamma(\mathbf{u})$ или связать ее с искомыми функциями $U_x(\mathbf{u})$ и $P_x(\mathbf{u})$ (см. например, формулу Слэтера – Ландау (5.24)). Наиболее просто это построение осуществляется при

$$\Gamma(\mathbf{u})/\mathbf{u} = \Gamma_0/\mathbf{u}_0 = const \quad \text{или} \quad \Gamma(\mathbf{u}) = \Gamma_0/\mathbf{u}_0 \cdot \mathbf{u} \quad (5.37)$$

Подставляя в УРС (5.34) $P = P_H(\mathbf{u})$, $U = U_H(\mathbf{u})$, $P_x(\mathbf{u}) = -\frac{dU_x}{d\mathbf{u}}$, $\Gamma(\mathbf{u})/\mathbf{u} = \Gamma_0/\mathbf{u}_0$, получаем дифференциальное уравнение для определения функции $U_x(\mathbf{u})$

$$\frac{dU_x}{d\mathbf{u}} + \frac{\Gamma_0}{\mathbf{u}_0} \cdot U_x = \frac{\Gamma_0}{\mathbf{u}_0} \cdot U_H(\mathbf{u}) - P_H(\mathbf{u}). \quad (5.38)$$

После нахождения решения уравнения (5.38) с начальным условием $U_x(\mathbf{u}_0) = 0$ (разницей объемов \mathbf{u}_0 и \mathbf{u}_{0x} пренебрегаем) холодная составляющая давления $P_x(\mathbf{u})$ находится дифференцированием $U_x(\mathbf{u})$ в соответствии с (5.16). В случае задания зависимости $\Gamma = \Gamma(\mathbf{u})$ в более общем виде построение функций $U_x(\mathbf{u})$ и $P_x(\mathbf{u})$ становится громоздким и, как правило, осуществляется численно.

Рассмотренные примеры показывают, что, несмотря на значительные трудности, возможно построение УРС сред с сильным межчастичным взаимодействием. Однако на фазовой диаграмме еще очень много неисследованных областей и этот факт является мощным стимулом для интенсивного развития теоретических и экспериментальных методов исследования термодинамических свойств веществ, диапазон состояний которых может меняться от плотной и холодной твердой фазы до разреженной высокотемпературной и сильно ионизированной плазмы.

Литература

1. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., Наука, 1966.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М., Наука, 1986.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М., часть 1, Наука, 1976.
4. Базаров И.П., Геворкян Э.В., Николаев П.Н. Термодинамика и статистическая физика. Изд. Московского Университета, Москва, Мир, 1987.
5. Жарков В.Н., Калинин В.А. Уравнения состояния твердых тел при высоких давлениях и температурах. М., Наука, 1968.
6. Альтшулер Л.В. Применение ударных волн в физике высоких давлений, УФН, 85, 2, 1965.
7. Альтшулер Л.В., Бушман А.В., Фортов В.Е. и др. Изэнтропы разгрузки и уравнения состояния металлов при высоких плотностях энергии, ЖЭТФ, 78, 2, 1980.
8. Бушман А.В., Фортов В.Е. Модели уравнения состояния вещества, УФН, 140, 2, 1983.
9. Квалиткин Н.Н. Квазизонное уравнение состояния, Мат. моделирование т.1, №2, 1989.
10. Куропатенко В.Ф. Уравнения состояния в математических моделях механики и физики, Сб. научных трудов «Экстремальные состояния вещества», Под редакцией акад. В.Е. Фортова, Москва, 1980.

VI. СПИСОК ТЕМ КУРСОВЫХ РАБОТ

1. ИСТОРИЯ И ФИЛОСОФИЯ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

1. Эволюция научных идей в астрономии.
2. Год великих астрономических открытий Галилея (1610г.).
3. Развитие механики от Аристотеля до Ньютона.
4. Великая книга Исаака Ньютона (Математические начала натуральной философии).
5. Итальянский физик Амедео Авогадро.
6. Даниил Бернулли.
7. Научная деятельность Бенджамина Франклина.
8. Генри Кавендиш.
9. Шарль Кулон: военный инженер и ученый.
10. Джеймс Клерк Максвелл.
11. Три знаменитые работы А. Эйнштейна.
12. Физики России XX века (А.Ф. Иоффе, Л.И. Мандельштам, П.Л. Капица, Л.Д. Ландау, Я.И Френкель, Н.А. Черенков, И.Е. Тамм, С.И. Вавилов, Н.Г. Басов, А.М. Прохоров, и др.).
13. История открытия рентгеновских лучей и радиоактивности.
14. Развитие физической теории в первой трети XX века.
15. Польза и вред физических знаний.
16. Создание ракетно-ядерного щита в СССР и США.
17. История рождения компьютера.
18. Интуиция и логика в науке.
19. Проблема познаваемости мира в квантовой механике.
20. Физика и материализм.
21. Физика и религия.

2. ФИЗИКА

22. Физика вокруг нас.
23. Физика и научно-технический прогресс.
24. Фундаментальные направления развития современной физики.
25. Теория великого объединения.
26. Геометрия и физика.
27. Великие законы сохранения.
28. Роль математической физики в физике.

2.1. Классическая механика

29. Закон всемирного тяготения.
30. Классическая механика и космодинамика.
31. Законы Кеплера.
32. Гравитационный захват в задаче трёх массивных тел (Солнце, планета, комета)
33. Ракетные двигатели для космических путешествий.
34. Плазменные двигатели и перспективы их практического применения.
35. Космическая весна человечества (полет Ю.А. Гагарина в космос).
36. Космические станции – лаборатории для научных исследований.
37. Маневрирование в космосе

38. Полет человека на Луну – триумф классической механики.
39. Пилотируемый полет на Марс (планы и реальность).
40. Космические экспедиции и их практическая значимость.
41. Система защиты Земли от астероидной опасности.
42. Трение: вредное, полезное, любопытное.
43. Играя в бильярд, беру уроки физика (законы упругих столкновений).
44. Теория гироскопов и ее применение в системах атомного управления морскими судами и летательными аппаратами.
45. О чем не думает горнолыжник (механика горнолыжного спорта).
46. Устойчивость автомобиля.
47. Плавуемость и устойчивость судов.
48. Инверсоры (шарнирные механизмы, реализующие инверсию; параллелограмм Уатта, спрямляющий механизм Чебышева инверсоры Поселье и Гарта).
49. Автоколебания – полезные и вредные.
50. Резонанс в природе и технике.
51. Метод размерностей в механике сплошных сред.
52. О волнах на море и ряби на лужах.
53. Кавитация.
54. Конвекция и самоорганизующиеся структуры в жидкости,
55. Турбулентность.
56. Горение и детонация.
57. Ударные и детонационные волны.
58. Высокоскоростной удар и защита от него.
59. Потеря устойчивости тонкостенных конструкций – причина катастроф.
60. Физика музыкальной гармонии (теория колебаний струны; пифагорова и хроматическая гаммы)
61. Электроакустика.
62. Ультразвук.

2.2. Теория относительности

63. Принципы относительности Галилея и Эйнштейна.
64. Пространство и время в специальной теории относительности.
65. Пространство и время в общей теории относительности.
66. Экспериментальное подтверждение специальной и общей теорий относительности.
67. Парадоксы специальной теории относительности.
68. Парадоксы общей теории относительности.
69. Общая теория относительности и ей применение в астрофизике.
70. Столкновения частиц в релятивистской механике.
71. Эффект Доплера в специальной теории относительности.

2.3. Молекулярная физика

72. Энергия – царица мира, а энтропия её тень.
73. Закон сохранения энергии для тепловых процессов (первое начало термодинамики).
74. Второе начало термодинамики и теория тепловых машин.
75. Необратимые процессы и статистическое истолкование энтропии.

76. Классическая статистика Больцмана.
77. Флуктуации физических величин.
78. Диаграмма состояния
79. Термодинамика фазовых переходов.
80. Парадокс Гиббса.
81. Д. Фаренгейт и его термометры.
82. Законы термодинамики и проблема теплообеспечения квартир.
83. Термодинамика и холодильные установки.
84. Молекулярная физика в бане.

2.4. Электромагнетизм

85. Опыты Мелликена по определению заряда электрона.
86. Работы Фарадея по экспериментальному изучению законов электромагнетизма.
87. Электромагнитная индукция.
88. Уравнения Максвелла и электромагнитные волны.
89. Электромагнитная масса электрона.
90. Передача информации радиоволнами.
91. Радиоастрономия.
92. Электричество в атмосфере.
93. Физическая природа шаровой молнии.
94. Электродвигатели

2.5. Оптика

95. Спектр электромагнитных волн, их получение и использование.
96. Законы геометрической оптики.
97. Псевдолинза Роберта Вуда.
98. Корпускулярно-волновой дуализм.
99. Интерференция, и её практическое применение (интерферометры, просветление оптики, интерференционная спектроскопия).
100. Принцип Гюйгенса - Френеля. Метод зон Френеля.
101. Парадокс Вавилова.
102. Дифракционной решётке 200 лет.
103. Радуга.
104. Что возможно и что невозможно в оптике?
105. Разрешающая способность оптических приборов.
106. Оптика глаза человека и насекомых.
107. Теория цвета и ее использование в искусстве и дизайне.
108. Ультрафиолетовая катастрофа в физике теплового излучения.
109. Законы теплового излучения и их использование при освещении городов.
110. Фотоэффект и его применение на практике.
111. Эффект Комптона и закон сохранения энергии.
112. Световое давление. Опыты Лебедева.
113. Молекулярное и комбинационное рассеяние света.
114. Почему небо голубое?

- 115. Люминесцентное излучение.
- 116. Излучение Вавилова - Черенкова.
- 117. Инфракрасные лучи и их использование в тепlopеленгации. приборах ночного видения и фотографии.

2.6. Квантовая механика

- 118. Соотношение неопределённости Гейзенберга.
- 119. Принцип суперпозиции в электродинамике и квантовой механике?
- 120. Принцип минимального действия (в механике, оптике и квантовой механике).
- 121. Туннельный эффект.
- 122. Свойства физического вакуума.
- 123. Столкновения тождественных частиц в квантовой механике.
- 124. Бозе–газ и Ферми–газ (квантовая статистика)
- 125. Вырожденный электронный газ.
- 126. Электрические и магнитные свойства веществ при низких температурах.
- 127. Высокотемпературная сверхпроводимость и перспективы её применения.
- 128. Что такое СКВИД? (сверхпроводящие квантовые интерференционные приборы: Superconducting Quantum Interferens Devices).
- 129. Жидкий гелий и сверхтекучесть.
- 130. Электрон – хозяин твердого тела (зонная теория кристаллов).
- 131. Дефекты в кристалле и их влияние на свойства твердого тела.
- 132. Физика поверхности.
- 133. Атомы блуждают по кристаллу (диффузия в твёрдых телах).
- 134. Квантовый эффект Холла.
- 135. Солитоны в океане и твердом теле
- 136. Эффект Ганна.
- 137. Выпрямители, усилители и генераторы (транзисторы).
- 138. Жидкие кристаллы.
- 139. Аномальные свойства обычной воды.

2.7. Атомная и ядерная физика

- 140. Законы сохранения при ядерных превращениях.
- 141. Принцип Паули и периодический закон Менделеева.
- 142. Эффект Мёссбауэра и его применение в точных физических измерениях.
- 143. Проблемы ядерной и термоядерной энергетики.
- 144. Лазерный термоядерный синтез.
- 145. Эксплуатация ядра (практическое использование достижений ядерной физики).

2.8. Физика элементарных частиц

- 146. Космические лучи и странные частицы.
- 147. Нейтрино – частица-призрак.
- 148. Ускорители частиц.
- 149. Конденсация света в вещество.

3. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ

- 150. Наша планета – Земля.
- 151. Атмосфера Земли.

152. Процессы в геосфере.
153. Периодические изменения климата на Земле.
154. Физика моря.
155. Течения в океане.
156. Приливы, отливы и закон всемирного тяготения.
157. Акустика в океане.
158. Восстановительные процессы на Земле (землетрясения, цунами, тайфуны, вулканическая деятельность).
159. Физика Солнца.
160. Далёкий и загадочный Плутон.
161. Юпитер – планета из кристаллического водорода.
162. Сатурн и его спутники.
163. Кометы.
164. Тунгусский метеорит.
165. Прошлое в будущее Вселенной.
166. Масштабы Вселенной и ее строение.
167. Строение и эволюция звезд.
168. Сверхновые звезды, пульсары и черные дыры.
169. Белые карлики – кристаллические звезды.
170. Судьба нейтронных звезд.
171. Размагничивание кораблей
172. Что случилось с лампочкой? (Почему разрушаются нити в лампах накаливания).
173. Физика люминесцентных ламп.
174. МГД - генераторы.
175. Полупроводниковые термоэлементы и холодильники.
176. Как делают алмазы?
177. Шестидесятиатомный углерод.
178. Лазеры в их практическое применение.
179. Рентгеновский лазер.
180. Нелинейная оптика.
181. Что может голография?
182. Взаимодействие мощного лазерного излучения с веществом.
183. Лазерная диагностика плазмы.
184. Физические процессы при ядерном взрыве в атмосфере.
185. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом.
186. Программа стратегической оборонной инициативы (СОИ) (физические проблемы и политические перспективы).
187. Объяснение аномальных явлений на основе законов физики.
188. ЭВМ управляет физическим экспериментом.
189. Информатика и мировой океан.
- 4. НАУКИ О ЖИВОЙ ПРИРОДЕ И ЧЕЛОВЕКЕ**
190. Взаимосвязь физических, химических и биологических знаний.
191. Физика организма человека.

192. Химия организма человека.
193. Происхождение жизни на Земле.
194. Теория эволюции и современное естествознание.
195. Эволюция биосферы.
196. Космические воздействия и эволюция биосферы.
197. От молекулы – к первой клетке.
198. От сине-зеленых водорослей до человека.
199. Фотосинтез.
200. Самая главная молекула (молекула ДНК).
201. Молекулярные основы обмена веществ.
202. Молекулярные механизмы генетической репродукции и биосинтеза белка.
203. Воздействие гелео- и геофизических факторов на организм человека.
204. Воздействие излучений и потоков частиц на биообъекты.
205. Симметрия живой природы и алгоритмы самоорганизации.
206. С какой скоростью растет зеленый лист?
207. Резервы прочности конструкции человеческого тела.
208. Физико-химические аспекты обоняния.
209. Глаз – совершенный оптический прибор.
210. Физика слуха.
211. Гидромеханика кровообращения.
212. Возникновение разума – не неизбежный результат эволюции живых систем.
213. Роль подсознания в мышлении.
214. Работа мозга – война его полушарий.
215. Что такое экосистемы и как они функционируют?
216. Биосфера и экология.
217. Глобальные экологические проблемы и пути их решения.
218. Основные принципы и направления охраны окружающей среды.

*****#####*****