



ИЗДАТЕЛЬСТВО

# МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ

В.П. БУРДАКОВ

## АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА. ВВЕДЕНИЕ В СПЕЦИАЛЬНОСТЬ

МОСКВА • 1998

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

МИНИСТЕРСТВО ОБЩЕГО И ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(Технический университет)

---

**В.П. БУРДАКОВ**

**АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ  
ТЕПЛОТЕХНИКА.  
ВВЕДЕНИЕ В СПЕЦИАЛЬНОСТЬ**

Учебное пособие

Утверждено  
на заседании редсовета  
29 мая 1995 г.

Москва  
Издательство МАИ  
1998

**Бурдаков В.П.** *Авиационная и ракетно-космическая тепло-техника. Введение в специальность: Учебное пособие.* -М.: Изд-во МАИ, 1998. — 96.: ил.

Приведены разнообразные начальные сведения, необходимые студентам авиационных вузов для дальнейшего изучения *общих и специальных дисциплин*, для расширения кругозора, приобретения навыков в работе над специальной литературой и периодическими изданиями. При этом студенты получают представление о проблематике изучаемой дисциплины, нерешенных вопросах, перспективах развития избранной ими области знаний.

Предназначено для студентов, изучающих *аэрокосмическую теплофизику*, но может быть рекомендовано, в силу доступности текста, и для других специальностей.

Рецензенты: *Э.К. Калинин, В.М. Елифанов*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Специальность инженера-теплофизика считается одной из ведущих в области аэрокосмического двигателестроения, в проектировании и создании энергоагрегатов и летательных аппаратов в целом. Без теплофизических расчетов не может быть создан ни один из элементов современных летательных аппаратов.

Учебное пособие предназначено для студентов двигательных и энергетических специальностей авиационных вузов. В нем даются вводные материалы к теоретическим основам изучаемых дисциплин, приводится современная терминология, облегчающая ознакомление с изучаемым предметом, излагаются научные достижения и прогнозные оценки перспектив развития и возможных достижений широкого комплекса изучаемых научных дисциплин.

Программа рассчитана на два семестра. На первом семестре читается лекционный курс и проводятся практические занятия, имеющие ознакомительный характер (знакомство с деятельностью факультетских и институтских кафедр, посещение аэрокосмических музеев и выставок, ознакомление с деятельностью ведущих отраслевых предприятий). На втором семестре студенты выполняют индивидуальные курсовые работы в виде самостоятельно подготовленных рефератов.

В целях контроля за усвоением материала в каждом семестре предусмотрено проведение зачета.

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

АСТ — авиационные средства транспортировки  
БВ — большой взрыв  
БН — большое неравновесие  
ВВИА — военно-воздушная инженерная академия  
ВВП — вертикальный взлет и посадка  
ВМ — вечная мерзлота  
ВМТ — верхняя мертвая точка  
ВПК — верхняя пограничная кривая  
ВПП — взлетно-посадочная полоса  
ВРД — воздушно-реактивный двигатель  
ГВП — горизонтальный взлет и посадка  
ГЛА — гибридные летательные аппараты  
ГПВРД — гиперзвуковой прямоточный ВРД  
ГРД — гибридный ракетный двигатель  
ЖРД — жидкостный ракетный двигатель  
ИКАО — международная организация гражданской авиации  
ИСЗ — искусственный спутник Земли  
КВП — комбинированные (горизонтальные, вертикальные) взлет и посадка  
КК — космический корабль  
КПД — коэффициент полезного действия  
ЛА — летательный аппарат  
ЛТХ — летно-технические (тактические) характеристики  
МАИ — московский авиационный институт  
МН — малое неравновесие  
МГТУ — Московский государственный технический университет  
МСА(MSA) — международная стандартная атмосфера  
НЛГ — нормы летной годности

НМТ — нижняя мертвая точка  
ОТО — общая теория относительности  
ОИСЗ — орбита искусственного спутника Земли  
ОК — орбитальный корабль  
ПБВ — период больших возмущений  
ПВРД — прямоточный ВРД  
ПОТ — природа + общество + техника  
ПМТРД — подъемно-маршевый турбореактивный двигатель  
ПС — пограничный слой  
ПТРД — подъемный турбореактивный двигатель  
ПуВРД — пульсирующий ВРД  
РДТТ — ракетный двигатель твердого топлива  
РН — ракета-носитель  
СА — спускаемый аппарат  
САХ — средняя аэродинамическая хорда  
СВЧ — сверхчастотное излучение  
СПВРД — сверхзвуковой ПВРД  
ТРД — турбореактивный двигатель  
ТРТ — термодинамическое рабочее тело  
ТВД — турбовинтовой (вальный) двигатель  
ТВлД — турбовентиляторный двигатель  
ТРДД — ТРД двухконтурный  
ТРДФ — ТРД с форсажной камерой  
ТРДФД — ТРДФ двухвальный  
ТС — термодинамическая система  
ТТХ — тактико-технические характеристики  
ТМЖС — термодинамическая модель жизнеспособной системы  
ФКС — фрактально-кластерные соотношения  
ЦАГИ — Центральный аэрогидродинамический институт  
ЭДС — электродвижущая сила  
ЭМТ — экономико-математико-термодинамический (экономический) метод

# I. ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСТВА И МЕСТО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН

## 1.1. Проблемы эффективности

Понятие рациональности, целесообразности, полезности, эффективности зародилось стихийно еще у ученых древности. Затем появились научные знания и научные дисциплины, которые суммировали предыдущий опыт человечества, изучались и передавались от поколения к поколению. Рождение математики, физики и технические достижения XVII-XVIII в. предопределили зарождение термодинамики как надежной основы эффективности, появились учения о различных параметрах или критериях эффективности.

Возникла возможность научного прогнозирования процессов взаимодействия таких сложных структур, как природа + общество + техника (ПОТ). И человечество, жившее ранее в равновесии с природой, стало лавинообразно увеличиваться численно и совершенствоваться умственно (рис. 1), проходя серию революций, подчиняя (и одновременно разрушая) природу. Человек победил многие болезни, научился пользоваться новыми источниками энергии, стал быстро перемещаться по Земле, летать в атмосфере, освоил космические скорости и достиг Луны. Технология, наука и техника достигли такого уровня, что теперь решение многих еще не так давно сверхфантастических проблем, например, путешествия во времени, достижения реального бессмертия, полета к пределам Вселенной и т.д. многим специалистам кажется вполне реальным. Однако вслед за этапом равновесия с природой и этапом ее покорения, наступил третий этап развития человечества, который можно назвать этапом конфликта с природой. В 1975 г. впервые за всю историю человечества мировое производство энергии, а тем более производство энергии в расчете на одного жителя Земли (рис. 2), достигло наивысшего значения (без учета потребления пищи) и резко пошло

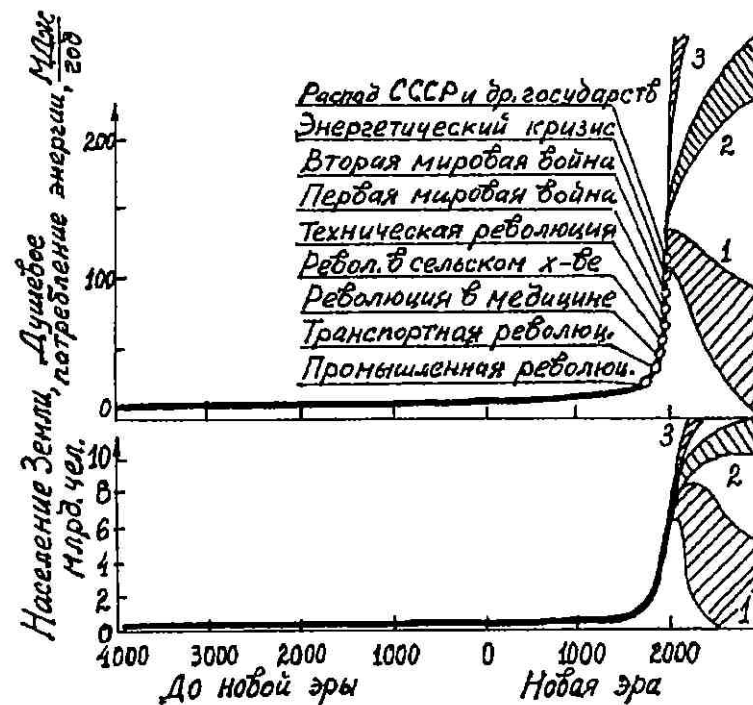


Рис. 1

на убыль. В преддверии этой глобальной, т.е. общеземной катастрофы, в 1973 году разразился энергетический кризис, затронувший многие страны мира. Цены на пищевые (зерно) и промышленные (нефть) энергоресурсы резко повысились, а затем упали (рис. 3).

В обществе возникло беспокойство за будущее своих стран, национальных групповых интересов. Не зная причины кризиса и не владея современными знаниями, толпы людей, подогреваемые неумелыми и корыстными руководителями, только усугубили положение, приведя к развалу Советского Союза, Югославии, Чехословакии, поставив на грань между жизнью и умиранием вновь образованные «суверенные» государства.

Вопросы эффективности, методы ее оценки переросли потребности только лишь технических дисциплин и стали общественно необходимыми. Перед учеными, инженерами и политиками встал

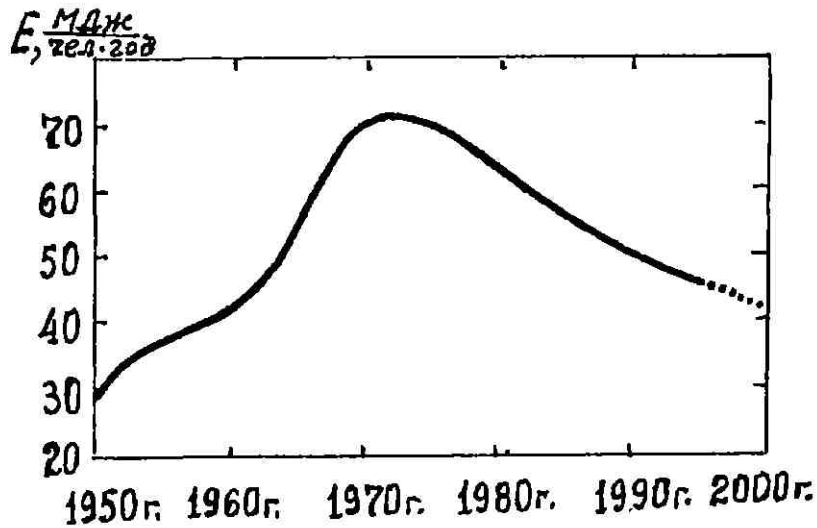


Рис. 2

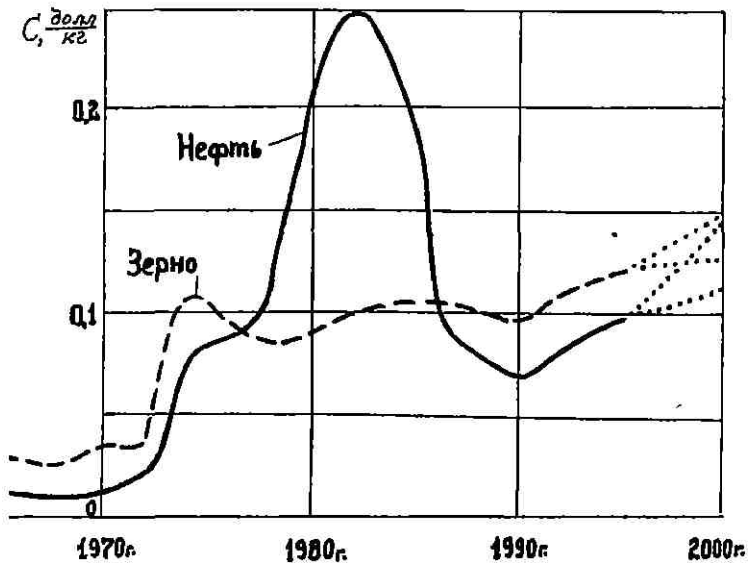


Рис. 3

вопрос, как будет далее эволюционировать человечество (рис.1): то ли оно обречено на вымирание 1, либо на определенную стабилизацию численности 2, которая требует не снижения, а роста душевого энергопотребления, то ли все-таки возможен резкий прогресс, массовое заселение космоса, предсказанное еще К.Э. Циолковским 3, но для этого требуются время и ресурсы, и прежде всего энергетические. Как организовать космический транспорт, бесперебойно и экономично, с соблюдением экологических требований связывающих околоземные орбиты с Землей?

Казалось бы, частные проблемы эффективности летательных аппаратов (ЛА), определяемые совокупностью таких критериев, как тяговая эффективность, аэрогазодинамическая эффективность, надежность, весовая (массовая) отдача, материалоемкость, технологичность, экологичность, энергетическая эффективность, обратимость (многообразие, термодинамическая эффективность), универсальность, экономическая эффективность, перспективность (преемственность), социальная эффективность в современной ситуации приобретают глобальный смысл, общемировое значение.

Соответственно, исключительно важное значение приобретает и основная теплофизическая научная дисциплина — термодинамика, которую иногда именуют наукой об эффективности.

## 1.2. Термодинамика — суперфундаментальная наука

Суперфундаментальной мы называем науку, используемую для исследования всех без исключения жизненных проявлений человека. Сейчас в мире существует около тысячи научных дисциплин, среди которых немало фундаментальных, применяемых достаточно широко, например физика, химия, биология. Суперфундаментальных же наук — считанные единицы. Например, математика. Ею пронизана вся наша жизнь. Просыпаясь утром и глядя на часы, мы видим цифры — символ и основу математики. Самые разные числа и в самых разных обстоятельствах сопровождают нас весь день. Мы манипулируем ими, подчас и не замечая, что используем тем самым математические методы, ибо каждая наука имеет свои только ей одной присущие методы. Большинство из нас использует математику незаметно для себя — подобно тому, как мы говорим прозой и дышим воздухом. Но люди особого научного склада ума, люди пытливые, те, кто двигает науку, все это замечают. Задав еще в детстве

своим родителям один из многочисленных «невинных» вопросов почему небо днем голубое, а вечером красное, и получив на него более-менее вразумительный ответ, только спустя полтора десятка лет во время учебы в вузе и познакомившись с одним из разделов термодинамики (релеевская теория рассеяния света), такой человек навечно свяжет себя с увлекательной научной деятельностью. Он всегда будет иметь вопросы, на которые еще ни у кого нет ответа. Именно такие вопросы и являются питательной средой для возникновения и развития научных дисциплин. Почему у человека на руке пять пальцев, а у осьминога восемь щупалец? Случайность ли это эволюционного процесса или природная закономерность? О том, что это закономерность, свидетельствует то, что пять пальцев имеют и ящерицы, и все млекопитающие, и птицы, и лягушки. А вот у некоторых тритонов на задних лапах пять, а на передних — только четыре пальца. (Почему?)

К сожалению, математика на такие вопросы самостоятельно, то есть только своими методами, ответить не может, оставаясь, тем не менее, суперфундаментальной дисциплиной среди естественных, фундаментальных, или точных наук.

В науках общественных или гуманитарных, символом и основой которых является уже не число, а буква или соответствующий этой букве звук, поскольку мы пишем, читаем, говорим, а также думаем словами, в качестве суперфундаментальных можно назвать сразу три науки: историю, философию и экономику. Сказав «Ну вот, все вы такие!» — мы тем самым сделали философское обобщение, а расхожая фраза «То было вчера, а то сегодня!» — уже небольшое историческое исследование. Аналогичные шутки по поводу экономики сегодня излишни, так как желающие не только посмеяться, но и погрустить найдут их в любой газете!

А теперь поговорим о термодинамике, символом и основой которой является *температура* — физическое понятие, близкое всем нам, подобно числу или букве, но в научном плане достаточно сложное и емкое. И тем не менее, мы привыкли к нему так же прочно, как и к часам, поскольку температура воздуха за окном или температура нашего тела при болезни нас интересует не меньше, чем текущее время.

Одно из определений: *термодинамика* — это наука о явлениях, характеризующихся температурой. Самым главным принципом термодинамики, который нередко именуется *нулевым началом*, считается *принцип температуры* или принцип теплового равнове-

сия: *два тела, находящиеся в тепловом равновесии с третьим телом, имеют одинаковую температуру*. Это означает, что, измеряя температуру различных не соприкасающихся между собою тел, можно сравнивать *степень их нагретости*. Степень нагретости тела — одно из определений температуры, которое, правда, нам мало что говорит. Прибор, измеряющий температуру, называется термометром. Но не всегда температуру можно измерить термометром, так как универсальность этого понятия и его статистический смысл значительно шире, чем просто «степень нагретости». Можно взять наугад любую газету и прочитать, например, «политическая температура» [«Начало», № 24, 1992, с. 4]. Слово «температура» отнесено здесь к людям, «степень нагретости» которых постоянна на протяжении 4,5 млн. лет и равна 36,6° С. Политическая же температура не постоянна, а отражает, судя по смыслу этого термина, меняющееся настроение общества. Что же это за термин «политическая температура» — просто расхожая фраза, удачное и броское политическое выражение или же что-то более глубокое и содержательное?

Для ответа на этот вопрос нам надо было бы принять волшебный порошок и превратиться в микроскопических «демонов Максвелла» — выдуманных существ, способных производить без энергетических затрат сортировку атомов и молекул. Предположим, что такое превращение с нами произошло, и мы наблюдаем движение молекул воздуха. Вот перед нами, медленно вращаясь вокруг общего центра, проплывают два полупрозрачных шара. Мы видим, что каждый шар — это небольшое ядро и облако быстро вращающихся вокруг него электронов. Это облако окружает оба ядра, не давая им разлетаться. Расстояние между атомами все время изменяется примерно по гармоническому закону, хотя средняя его величина остается постоянной.

Мы видим замечательное явление: как бы в невесомости происходит поступательное, вращательное и колебательное движение атома азота — основного компонента воздуха (78%). И уже совсем удивительно наблюдать столкновения атомов, в результате которых изменяются скорости всех перечисленных выше движений (их называют степенями свободы).

Среди большого количества известных из физики характеристик движения тел (векторных и скалярных) особое место занимает *энергия* (в переводе с греческого — деятельность), которая для одной молекулы складывается из энергий поступательного, вращательного и колебательного движений атомов, энергии электронов, энергии

внутриатомных связей и т.д. Кстати, термин «энергия» ввел в механику еще И. Кеплер в 1609 г.

Определение: *энергия* — это единая скалярная мера различных форм движения материи.

Наблюдая далее за молекулами, видим, что время от времени они ударяются не только друг о друга, но и о более крупные «сооружения», состоящие из сотен и тысяч молекул другого сорта. Это и есть те самые пылинки, которые иногда называют аэрозолями и которые всегда присутствуют в воздухе даже самых чистых помещений. Каждая такая пылинка живет своей жизнью. Видим атомы, частично выстроившиеся упорядоченно, а в большинстве мест — хаотически. Электроны вращаются около атомов, причем здесь, в *твердом теле* — не обязательно вокруг них, атомы колеблются, а все «сооружение» (т.е. пылинка) движется поступательно, но только значительно медленнее молекул, вращается вокруг общего центра масс и имеет огромное количество (по числу атомов) колебательных степеней свободы. Можно наблюдать еще одно явление: каждая молекула, ударяясь о такое, с ее «точки зрения» — неподвижное сооружение, передает ему *импульс, равный произведению массы на скорость*. Многочисленные же удары молекул создают давление на пылинку, которое в силу ее малости не всегда сбалансировано, приводя к тому, что последняя совершает *броуновское движение* — одно из интереснейших явлений, также изучаемых современной термодинамикой. В быстроходных поршневых двигателях молекулы горячей смеси не всегда могут догнать убегающий поршень и передать ему свой импульс, поэтому реальное давление на поршень меньше, чем на станки цилиндра, а не равно ему, как это обычно предполагается в термодинамических расчетах.

Но удары молекул о твердые пылинки передают им не только импульс, но и энергию, которая для поступательного движения равна половине произведения массы молекулы на квадрат ее скорости (считаем, что пылинка неподвижна). Кроме того, передается, разумеется, и вращательная, и колебательная энергия. Происходит, как говорят, процесс выравнивания температуры множества соударяющихся с пылинкой частиц и самой пылинки. Через очень небольшое время достигается температурное или, как мы теперь понимаем, энергетическое равновесие между газом и пылинкой. Таким образом, мы поняли, что температура характеризует энергетически равновесное среднестатистическое состояние газа и более крупной твердой частицы. Вот почему в качестве такой твердой частицы мо-

жет быть использован один из спаев термопары, шарик ртутного или спиртового термометра и т.д., называемый *сенсором*, или *чувствительным элементом*.

Осредненная энергия хаотического (*теплового*) движения огромного числа частиц, составляющих *термодинамическое рабочее тело* (ТРТ) это, по сути дела, и есть его температура, зависящая от распределения скоростей в *статистическом ансамбле частиц*. «Скоростные» характеристики ансамбля определяются так называемой *газовой постоянной R*, которая и выполняет роль размерного коэффициента пропорциональности между энергией и температурой:

$$E = R T, \text{ Дж.}$$

При одной и той же температуре больше энергия у того газа, у которого больше *R* или, что то же самое, у которого меньше молекулярная масса  $\mu$ , то есть существует соотношение

$$R = \frac{8314}{\mu}, \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К).}$$

Для *твердых* и *жидких* ТРТ, а также для плазмы, это соотношение не работает. Есть и еще одно соотношение между кинетической энергией и температурой частицы

$$E = \frac{3}{2} k T,$$

которое применяется, как правило, для микропроцессов. Как показал еще А.Эйнштейн, эта энергия от размера частиц не зависит. Константа *k* называется постоянной Больцмана. Л. Больцман, как и Д. Гиббс, первыми стали исследовать статистические характеристики термодинамических ансамблей, состоящих из большого числа частиц. В трудах И.Р. Пригожина, А.И. Вейника и других термодинамиков высказываются мысли о том, что в качестве «частиц» могут выступать не только микроскопические «кирпичики мироздания», атомы, молекулы и кластеры (группы атомов и молекул), но и насекомые, звери, люди, страны и даже галактики — лишь бы они образовывали *статистический термодинамический ансамбль*, то есть содержали бы достаточное количество «частиц».

С уменьшением количества газа в ТРТ сверхчувствительные малоинерционные термометры фиксируют все увеличивающиеся коле-



бания или *флуктуации* температуры около ее *среднего значения*. Если ТРТ — реальное тело, то с уменьшением его размеров может наступить *кластеризация*, иногда сопровождающаяся скачкообразным изменением его средней температуры и ряда других свойств, обусловленных межатомными или межмолекулярными взаимодействиями в упаковке «грозди» (кластер — в переводе с английского — гроздь). Кластерам в настоящее время приписывают «ответственность» за уникальные характеристики шаровых молний, геометрическую теорию кластеров используют в дистанционном зондировании Земли (термодинамика на плоскости), в изучении эффектов самоорганизации живой и неживой материи и т.д.

Дело в том, что самые различные как *природные*, так и *антропогенные* объекты *самоорганизации*: облака, бассейны рек, технические объекты, культурные посевы, леса, города, районы, государства и т.д., несмотря на всю кажущуюся хаотичность их форм и размеров, можно представить в виде кластеров, имеющих площадь и характерный размер, например,  $R$  или, максимальную длину  $L$  речного русла для речного бассейна, площадь поперечного сечения (мидель) летательного аппарата и т.д.

Нехитрое, на первый взгляд, геометрическое представление объектов, выявляет глубинную органическую связь между ними. Оказалось, что отношения десятичных логарифмов максимальной длины русла  $\lg L$  и площади водного бассейна  $\lg A$  могут быть постоянными (рис.4, а) для характерных географических районов. Постоянно также отношение логарифмов площади миделя  $\lg S$  летательного аппарата «тяжелее воздуха» к его массе  $M$  (рис. 4,б). Эти и многие другие примеры *самоподобия* привели к возникновению в конце 70-х годов нового научного направления — теории фракталов (теории самоподобия). Фрактальность характерна, как выяснилось, для гауссова «белого» или теплового шума, для размеров пор в проницаемых средах, для земных ландшафтов и рельефов, для судеб людей и т.д., то есть для любых объектов, изучаемых термодинамикой, не исключая, разумеется, и распределения скоростей, импульсов и энергий частиц в термодинамическом рабочем теле (ТРТ), каким *модельным* мы бы его не представляли (*идеальный газ, ньютоновская жидкость, абсолютно твердое тело* и т.д.). Самоподобие характерно даже для броуновского движения. Здесь надо отметить, что самоподобие как реальное явление впервые было замечено в *теории моделирования*, но имело другое название — *автомодельность*.

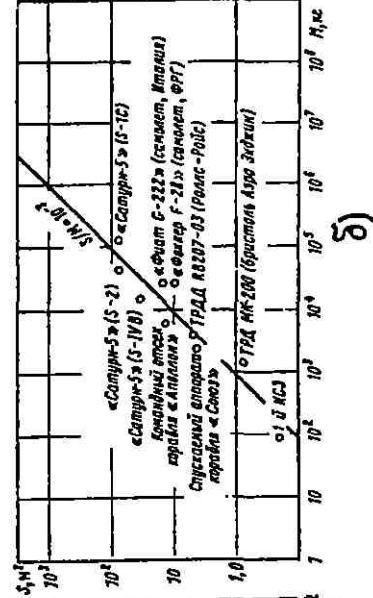
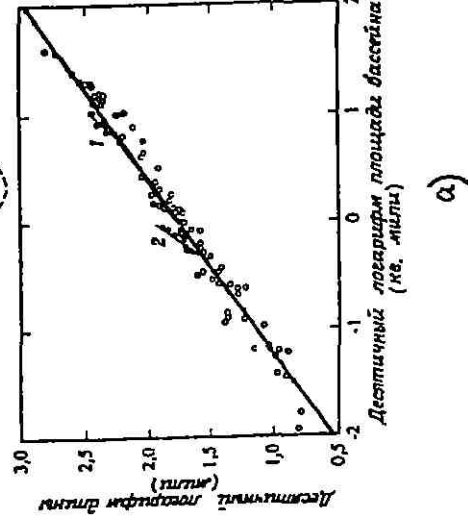
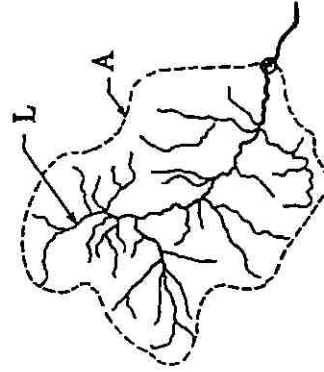


Рис. 4

Итак, в термодинамике существует очень удобное скалярное универсальное статистическое понятие «температура», однозначно характеризующее состояние очень сложного статистического ансамбля взаимодействующих частиц, имеющих разные массы, энергии, векторы скоростей и импульсов, различное строение и т.д. Температуру называют *макроскопическим параметром состояния* ТРТ, причем параметром опытным или *феноменологическим*. Такой же статус и у понятия «давление».

Энергия, как и температура, и давление относятся к основным фундаментальным понятиям термодинамики. Но, как уже говорилось, понятие «температура» ближе к понятию «энергия» по физическому смыслу.

Энергия, как и температура, является центральным понятием термодинамики.

Понятие «энергия» составляет основу термодинамики, поэтому некоторые авторы были склонны в 30-х годах, когда термодинамика изучала в основном энергетические процессы в *машинах, орудиях* и химических процессах, называть ее другим, более универсальным, как они считали, термином «энергетика». Уже тогда были известны процессы, где тепловые факторы играли весьма второстепенную роль, уступая место электрическим, магнитным, химическим и т.д. Слово «термодинамика», а точнее, приставка «термо» им казались анахронизмом, противоречием между всеобщими законами термодинамики и частным «термо», характеризующим лишь тепловые процессы и явления. Позиция этих авторов вроде бы подкреплялась тем обстоятельством, что все три начала термодинамики говорят об энергии:

*первое начало* — закон сохранения энергии;

*второе начало* — закон обесценивания энергии;

*третье начало* — закон неисчерпаемости энергии (абсолютный нуль температуры недостижим).

Более того, за многие годы становления термодинамики сформировались пять термодинамических *функций состояния*, также имеющих смысл энергии: 1) энтропия  $S$ ; 2) внутренняя энергия  $U$ ; 3) энтальпия  $I$ ; 4) свободная энергия  $F$ ; 5) изобарно-изотермный потенциал  $Z$ .

На первом месте стоит энтропия (в переводе с греческого — превращение внутрь себя) она и задает основной смысл термодинамики: любые энергетические превращения в ограниченном изолированном объеме ТРТ рано или поздно закончатся «тепловой смер-

тью», то есть примут форму беспорядочного теплового движения молекул.

«Царица Мира и ее тень» — так когда-то образно называли энергию и энтропию. На самом же деле все наоборот: царицей известного нам Мира, включая и самые удаленные из доступных для наблюдения объектов Вселенной, является ее величество энтропия, неизменно проявляющаяся во всех энергетических превращениях.

Энергия, бесспорно, является одним из всеобщих факторов движения материи, в том числе и факторов жизни (наиболее сложное проявление движения материи), но важно подчеркнуть, что только одним из факторов. *Термодинамика же нужна для изучения всех факторов жизни*, включая и материю духа — *информационную материю нашего воображения*. Кроме энергетики, основными факторами жизни являются еще *информатика, технология, транспорт и экология*. Все эти пять взаимосвязанных факторов, а не только энергетика можно исследовать термодинамическими методами, поэтому в методологическом отношении термодинамика значительно шире энергетики как науки

Как и любая наука, термодинамика выработала свой *формализм*, который с практическими потребностями жизни явно не связан. Этот формализм и есть *научный базис*, который характеризует любую фундаментальную научную дисциплину.

Для термодинамики таким базисом является система доказательств достоверности феноменологических параметров состояния (температуры, давления, *магнитной восприимчивости, диэлектрической проницаемости* и т.д.) и ряд теорем неравновесной термодинамики, образующих так называемую статистическую термодинамику. Суперфундаментальность термодинамики доказывается огромным количеством ее практических приложений, каждое из которых порождает как бы новую научную дисциплину: *техническую термодинамику, химическую термодинамику, термодинамику биологических процессов* и т.д. С другой стороны, *этапы развития термодинамики* были настолько важны в научном отношении, что также дали название как бы самостоятельным научным дисциплинам: *классическая термодинамика, термостатика, термодинамика неравновесных процессов, нелинейная термодинамика, теория информации, теория самоорганизации* и т.д.

И тем не менее, характерная черта термодинамики, отличающая ее от остальных научных дисциплин — ее конкретная практическая

(прикладная) направленность, ибо термодинамика — единственная научная дисциплина, позволяющая количественно определить *эффективность* (в русско-язычной транскрипции — *коэффициент полезного действия*, или КПД) самых разнообразных процессов, начиная от рабочих процессов, происходящих в тепловых двигателях, в атомных и других электростанциях, сложнейших информационных, технологических, транспортных процессов в технических или инженерных системах и кончая жизненными и общественными процессами, включая процессы самоорганизации, образования структур, оптимизации действия и т.д.

Все происходящие на наших глазах процессы можно разделить на природные, идущие независимо от нас, и энтропогенные, вызванные деятельностью людей, в том числе многочисленные *техногенные* процессы. К первым относят процессы формирования и жизни космических тел и планет, включая извержения вулканов, землетрясения, тайфуны и т.д., то есть геологические, атмосферные и гидросферные эволюционные и катастрофические процессы на планетах, а также процессы в звездах, в галактиках и во Вселенной в целом. Возникновение разнообразных форм жизни, в том числе и появление «человека разумного» — это также природный процесс. А вот появление термодинамики, других наук, строительство сооружений, создание самолетов и ракет, сельскохозяйственного производства, добыча полезных ископаемых, радиоактивное загрязнение и т.д. — процессы энтропогенные. Размножение же людей (а их количество на Земле приближается к 6 млрд. человек), экспансия территорий, вытеснение или уничтожение других форм жизни, все возрастающее потребление кислорода воздуха и других ресурсов относят к смешанным природно-энтропогенным процессам, регулирование которых необходимо, хоть и затруднено биологическими природными потребностями.

Возникает целый класс экологических проблем, то есть проблем сосуществования природы и общества в нашем общем доме — на Земле. В переводе с греческого слово «экология» как раз и означает домоведение и может быть интерпретировано как глобальное земледование.

Все перечисленные процессы могут исследоваться логически (качественно, описательно или словесно), то есть методами общественных наук, а также количественно, то есть методами естественных (точных) и методами технических (прикладных) наук. Термодинамика может быть отнесена и к естественным наукам, поскольку

является частью теоретической физики, и к техническим, поскольку «умеет» определять эффективность или КПД технических процессов. Это последнее обстоятельство и является решающим в причислении термодинамики к техническим наукам.

Все XIX столетие, которое называют «веком пара», золотым веком человечества, веком технических революций, прошло под знаменем термодинамики.

Сади Карно (1796-1832) — французский инженер, опубликовавший в 1824 г. основополагающий труд об эффективности тепловых машин: «Размышление о движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу», которым, по сути дела, были заложены основы термодинамики (первое и второе начала, идеальный цикл тепловых машин, основные понятия), отметил, что общая эффективность машин должна определяться не только ее тепловым КПД преобразования теплоты в движущую силу (то есть работу), но и положительным влиянием на развитие цивилизации в целом, включая факторы, которые мы сейчас называем экологическими.

Работа молодого ученого вызвала в научном мире настоящую сенсацию, но спустя целых десять лет, а до того оставалась никем не замеченной. «Открыл» С.Карно в 1834 г. Б. Клапейрон, который «перевел» его труд на язык математики и попутно предложил вытекающий из его идей *метод циклов* («Мемуар о движущей силе теплоты»). И, надо сказать, термодинамика изобилует подобными драмами вплоть до наших дней.

Немецкий корабельный врач Юлиус Майер (1814-1878), опубликовавший в 28 лет (как и С. Карно) свое первое капитальное исследование о законе сохранения энергии, подвергся публичному осмеянию. И лишь в 1869 г., то есть через 27 лет после выхода в свет своего труда, получил всеобщее признание и мировую известность. По этому поводу известный японский термодинамик Р.Кубо писал: «Майер был первым, кому удалось придти к этому закону, и последним, чья деятельность была признана».

Вообще надо сказать, что в начале нашего века российская школа термодинамики занимала одно из ведущих мест в мире, в то время как сейчас, в период расцвета этой науки, мы фактически сдали все позиции. Из 25000 томов по термодинамике, изданных в XX веке, на нашу страну приходится едва ли несколько десятков книг, да и то в основном учебного содержания. Уместен и другой вопрос: не в этом ли причина нашего отставания от США и других стран в эффективности использования хотя бы энергии? Ведь американская

промышленность, производя продукции в два с лишним раза больше нашей (речь идет «о доперестроечном» периоде, когда мы были еще конкурентоспособными), затрачивает электроэнергию в 2,2 раза меньше!

Термодинамика — наука не для всех. Многие ее современные достижения, а тем более — идеи и гипотезы, могут быть не поняты даже знатоками предмета — настолько он всеобъемлющ и перспективен. Взять хотя бы «логические» числа *четыре* и *пять*, а также кратные им. Мы уже говорили о пяти энергетических функциях в термодинамике. Не прослеживается ли здесь какой-либо связи с пятью жизненными потребностями (энергетика, информатика, технология, транспорт, экология)? Почему у человека (да и у многих животных) пять конечностей? А на конечностях пять пальцев (на руках и ногах) или пять органов чувств (в основном, на голове)? Не являются ли пальцы рудиментарными органами чувств? Ведь Роза Кулешова видела именно пальцами! А пять мозговых ритмов? А способность комплексно решать жизненно важные термодинамические задачи по связи потоков  $J_i$  и термодинамических сил  $X_j$  не выше пятой степени:

$$J_i = \sum L_{ij} X_j, \text{ где } i=1,2,\dots,5; j=1,2,\dots,5?$$

Здесь  $L_{ij}$  — *линейные коэффициенты связи*, хранящиеся в памяти человека или искусственно им воссоздаваемые.

Не так давно было выяснено, что *пространство состояний* Гиббса обладают всего лишь двумя типами феноменологической симметрии: *четвертого ранга с симметричной матрицей* и *пятого ранга с антисимметричной матрицей*\*

Не означает ли это, что все устойчивые организмы, если они функционируют по известным нам законам природы, причем независимо от того — живут они на Земле или в других Галактиках — должны *иметь одинаковые возможности как в смысле своего строения, так и в смысле адаптации к изменяющимся внешним условиям?* Таким образом, вероятный термодинамический парол

\* Преснов Е.В., Малыгин С.Н. Аксиометрические модели феноменологической термодинамики. // Термодинамика и кинетика биологических процессов. - М.: Наука, 1980

существования всех устойчивых организмов — числа *четыре* и *пять*, определяющие их самоподобие (фрактальность). Не случайно, по-видимому, *этому правилу следует большинство известных представителей растительного и животного мира.*

А вот как объяснить, что летательные аппараты, то есть чисто техногенные и, по-видимому, не очень устойчивые в веках изделия, также следуют этому принципу? Ведь, как правило, ракета имеет четыре, а самолет — пять «конечностей»!

Есть ли здесь какая-либо термодинамическая связь с биологическим строением создателей этой техники — людьми — пока не известно. Но это, как говорится, передний край науки. Логически же еще К.Маркс отмечал, что все созданное человеком есть продолжение его тела.

В целом же эффективность общественных и жизненных процессов, а также эффективность машин, механизмов, всего энергетического хозяйства страны, включая производство продуктов питания, ее информационной сети, транспортной службы, которая включает авиацию и космонавтику, технологии и экологии, определяется не отдельными достижениями, а *массовой термодинамической культурой*, — прежде всего, передовых слоев общества, получивших высшее образование, а она, к сожалению, у нас еще довольно низка. Наша задача — совместно со студентами-теплофизиками, избравшими термодинамику магистральной дорогой своего совершенствования, — устранить этот порок нашей цивилизации.

### 1.3. Хроника системотехники от Вселенной до человека

В 340 г. до н.э. греческий философ Аристотель в своей книге «О небе» впервые научно доказывает, что Земля не плоская, а сферическая, поскольку уже тогда была известна природа лунных затмений, и тень Земли на Луне свидетельствовала о ее круглой форме. С другой стороны, положение Полярной звезды над горизонтом в Греции и Египте было разным и также соответствовало сферичности Земли.

Во втором веке нашей эры египетский ученый Птолемей развил учение Аристотеля о неподвижной Земле в качестве центра мироздания. Возникла стройная космологическая модель: вокруг Земли расположены сферы *семи* видимых подвижных светил: Луны, Меркурия, Венеры, Солнца, Марса, Юпитера, Сатурна и сфера непод-

вижных звезд. Возникло эзотерическое (мистическое) число семь, под которое подстраивали все наблюдаемые, либо контролируемые явления и процессы (семь цветов радуги, семь звуков музыкальной гаммы, семь дней недели и т.д.). Число семь вошло в многочисленные поговорки, культурные ритуалы в живопись и искусство. Место Творца (Бога) теперь было не на облаках и не на горе Олимп, а за сферой неподвижных звезд.

Теория Птолемея просуществовала до 1514 г. пока не появилась гелиоцентрическая система мира. Автор этой системы, польский священник Н.Коперник, доказывал, что неподвижным является Солнце, а планеты вращаются вокруг него по круговым орбитам.

В 1609 г. итальянец Г.Галилей изобрел *телескоп-рефрактор* и с его помощью обнаружил спутники Юпитера, подтвердив идею Коперника о том, что Земля не является центром мира. В том же самом году И.Кеплер ввел в науку понятие энергии и гипотезу об *эллиптичности* планетных орбит. Он считал, что планеты удерживаются на своих орбитах из-за равенства центробежных сил и сил притяжения. Последние, по его мнению, имели магнитную природу.

В 1676 г. датчанин Ремер по моментам прохождения спутников Юпитера за его диском открыл конечность скорости света и подсчитал ее величину, ошибся всего на 25%.

В 1687 г. англичанин И.Ньютон в «Математических началах натуральной философии» выдвинул теорию движения тел во времени и пространстве, постулировал закон всемирного (а не только планет к Солнцу) тяготения, разработал математические методы расчета движения тел, впервые предсказал математическую возможность «запуска» с высокой горы искусственного спутника Земли. Он же высказал идею о *бесконечности* и *статичности* Вселенной, отгеснив Бога за пределы Вселенной, хотя сам был известным богословом. Фактически И. Ньютон отделил Бога от науки. Характерно, что иудейские, христианские и мусульманские мифы, сформировавшиеся затем в религии, повествовали о Начале, о сотворении Мира, о Боге, как его первопричине. Блаженный Августин (у католиков — святой Августин) в книге «Град Божий» назвал даже дату сотворения Мира (Вселенной) — 5000 лет до н.э. В настоящее время конец последнего ледникового периода и *рождение цивилизации* датируется 10000 годом до н.э. Заметим, что Аристотелю и его современникам-ученым идея о сотворении Мира не нравилась, так как предполагала божественное вмешательство, не объяснимое с научных позиций. Они считали поэтому, что люди и окружающий мир суще-

ствуют вечно, периодически возвращаясь (за счет потоков и других катаклизмов) к исходному состоянию цивилизации.

В 1781 г. немец И. Кант в книге «Критика чистого разума» рассмотрел вопрос о начале Вселенной и ее границах в пространстве и пришел к выводу о невозможности доказательства ни начала, ни границ, ни бесконечности Вселенной во времени.

В 1823 г. немец Генрих Олберс описал *парадокс светимости*, свидетельствующий о *конечности Вселенной в пространстве*, либо о ее молодости (либо вещество Вселенной еще не нагрелось, либо свет далеких звезд до нас еще не дошел, так как в противном случае все небо бесконечной Вселенной стало бы ярко светиться подобно Солнцу).

Появившаяся в 1824 г. новая научная дисциплина — термодинамика — позволила Р.Клаузиусу в 1855 г. на основе закона возрастания энтропии в замкнутых системах объявить о неминуемом конце Мира — *тепловой смерти Вселенной*, если она ограничена в пространстве, то есть замкнута. Возник *термодинамический парадокс*, поскольку Вселенная наших дней от тепловой смерти далека, следовательно, она имела Начало, то есть не может быть вечной.

В 1865 г. англичанин Д. Максвелл объединил теории электрических и магнитных сил, описав возникновение электромагнитных колебаний в *мировом «эфире»*.

В 1887 г. американцы А. Майкельсон и Э. Морли обнаружили с помощью *интерферометра* *постоянство скорости света* относительно наблюдателя, то есть *отсутствие неподвижного «эфира»*.

В 1900 г. немец М. Планк высказал идею о квантах электромагнитного излучения и, воспользовавшись вторым законом термодинамики, вывел закон излучения нагретых тел.

В 1905 г. датчанин Лоренц объяснил результат эксперимента Майкельсона-Морли *сокращением размеров всех предметов*, движущихся в «эфире» и, соответственно, *замедлением хода движущихся с этим предметом часов*. В этом же году А.Эйнштейн в «Специальной теории относительности» предложил отказаться от «эфира» и от «абсолютного времени». Независимо от него через несколько дней то же самое предложил француз Пуанкаре. Теория относительности — это заслуга Лоренца, Эйнштейна и Пуанкаре. Скорость света стала абсолютной мировой константой, не зависящей от скорости движения *наблюдателей*. Появилось новое опре-

деление единицы длины — метра. Это расстояние, которое свет в вакууме проходит за 0,000 000 003 335 640 952 с.

В 1915 г. А. Эйнштейн публикует ОТО — «Общую теорию относительности (теорию гравитации)» или теорию искривления пространства.

В 1922 г. советский ученый А.А. Фридман показал на основе ОТО, что Вселенная не должна быть статичной.

В 1924 г. американец Э. Хаббл показал, что наша Галактика — не единственная в Мире и что Вселенная состоит из множества Галактик.

В 1926 г. немец В. Гейзенберг сформулировал принцип неопределенности микромира, не позволяющий пока ученым заглянуть в Начало Вселенной.

В 1929 г. Э. Хаббл обнаружил разбегание Галактик, регистрируемое по доплеровскому эффекту красного смещения (увеличения всех длин волн) их спектров. Сейчас установлено, что объем Вселенной за миллиард лет увеличивается на 5-10%.

В 1965 г. американцы Б.Дикке и Д. Пиблс высказали мысль о том, что в настоящее время можно наблюдать свечение ранней Вселенной, если она согласно предположению Джорджа Гамова (ученика А.А. Фридмана) была горячей, плотной и добела раскаленной. В этом же году два других американца Арно Пензиас и Роберт Вильсон обнаружили это самое излучение за что и получили в 1978 г. Нобелевскую премию.

В 1970 г. англичане Роджер Пенроуз и Стивен Хокинг на основе ОТО и новейших экспериментальных данных доказали, что у Вселенной было Начало во времени (до этого наряду с гипотезой о Начале существовали и другие — о пульсациях Вселенной при ее вечности и т.д.).

Возраст нашей Вселенной определяется сейчас в 20 млрд. лет, а ее радиус — в 20 млрд. световых лет, правда с оговоркой, что скорость света за это время не изменялась. Граница Вселенной недоступна для наблюдения не только оптическим телескопам (радиус действия 5 млрд. световых лет), но и радиотелескопам (10 млрд. световых лет).

Возраст нашей Галактики оценивается в 16, а Солнца в 5 млрд. лет. Общая продолжительность существования Солнца составит 10 млрд. лет, после чего оно сильно увеличится в размерах, поглотит все планеты, а затем потухнет, превратившись в Белого карлика.

Земля возникла около 4,5 млрд. лет назад из газово-пылевой туманности.

Колебания светимости Солнца считаются одной из основных причин изменения земного климата, который за последние 500 млн. лет претерпел ряд кардинальных изменений (рис. 5). Ледниковые периоды со среднегодовой температурой  $10^{\circ}\text{C}$  сменялись тропической жарой даже на полюсах — среднегодовая температура в целом по планете составила около  $25^{\circ}\text{C}$ . Стрелки на рис. 5. показывают вероятные возмущения климата, природа и продолжительность которых пока не вполне ясна, хотя гипотез на этот счет предложено много.

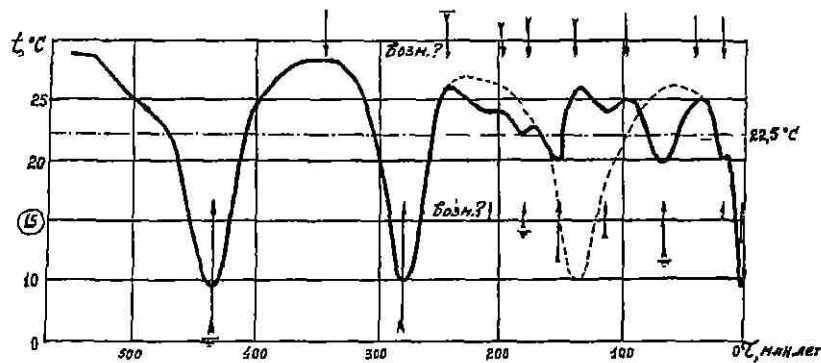


Рис. 5

Пунктирная кривая (рис. 5) показывает несостоявшееся, по-видимому, из-за этих возмущений, обледенение.

Около 25-30 млн. лет назад — и опять при наличии возмущения — появились приматы (обезьяны), а около 3-4 млн. лет назад — первобытные люди, во многом похожие на нас. Появление людей (в отличие от обезьян) пришлось на ледниковый период, а может быть было обусловлено наступлением холодов, поскольку древнейшим каменным орудиям и следам кострищ около 2,5 млн. лет.

#### 1.4. Классическая термодинамика С. Карно и неравновесная термодинамика

Рождение энергетики произошло тогда, когда люди стали использовать огонь, то есть 2500000 лет назад. Домашний (пещерный)

огонь давал людям свет, тепло, был источником вдохновения и оптимизма, оружием против врагов и диких зверей, бытовым средством, помощником в земледелии, консервантом продуктов, технологическим средством, предметом поклонения и обожествления. Прекрасный миф о Прометее, даровавшим людям огонь, появился в древней Греции значительно позже того, как во многих частях света были освоены методы довольно изощренного обращения с огнем, его получением и тушением, сохранением огня и рациональным использованием топлива.

И сейчас, в век атомных электростанций, ветро- и гидроэнергетики солнечных батарей, производство энергии, транспортные, экологические и технологические процессы на 99% связаны с применением огня, а на 99,9% — с применением тепла. Отсюда понятно и значение термодинамики — науки о преобразованиях энергии во всех природных и антропогенных процессах.

На рис. 6 приведена схема общего построения термодинамики. Для примера изображена графическая зависимость термодинамического потока  $J_1$ , например, электронов в полупроводнике, и сопряженного с ним потока дырок  $\bar{J}_1$ , от термодинамической силы  $X_1$ , например, градиента напряженности электрического поля. В реальных случаях приходится оперировать несколькими потоками  $J_i$  и несколькими силами  $X_i$  различной размерности (и физической и тензорной), поэтому на одном графике изобразить их нельзя. Требуется серия изображений. Точка 0 в центре графика, соответствующая случаю  $J_1 = 0$  и  $X_1 = 0$ , то есть отсутствию и потоков, и термодинамических сил, характеризует классическую термодинамику С. Карно. Область, ограниченная прямой  $J_1 = 0$ , соответствует равновесному состоянию, когда одни термодинамические силы скомпенсированы другими. В литературе иногда можно встретить термин «термостатика». Этим термином предлагается называть раздел термодинамики, изучающий равновесные состояния. Область линейной зависимости  $J_1$  и  $\bar{J}_1$  от  $X_1$ , находящаяся внутри пунктирного круга, соответствует неравновесной термодинамике, изучающей процессы переноса при малом неравновесии (МН). Область, ограниченная прямой  $X_1 = 0$ , характеризует наличие инерционных потоков при отсутствии вынуждающих сил. Наконец, область нелинейной неравновесной термодинамики (большое неравновесие БН) распространяется от МН во все стороны практически неограниченно. Именно эта,

пока в достаточной мере не разработанная область термодинамики, соответствует реальной окружающей нас природе — как живой. так и неживой. По-видимому, в дальнейшем эта довольно обширная область также будет разбита на характерные участки со своими термодинамическими особенностями.

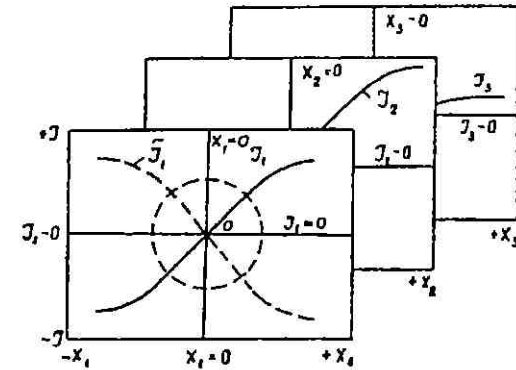


Рис 6

На рис. 6 нельзя строго указать область технической термодинамики, поскольку она в соответствии с конкретными техническими потребностями в той или иной мере может охватывать любые области, правда, с известными упрощениями и оговорками.

### 1.5. Ж.Б. Фурье и неравновесная термодинамика

В доме Ж.Б. Фурье в Гренобле всегда стояла несусветная жара — хозяин был просто помешан на тепле. Одевался он тоже очень тепло даже в жаркую погоду. В 1798 г вместе с другими выдающимися учеными Франции (общее их количество составляло 165 человек!) он присоединился к свите Наполеона Бонапарта для участия в египетском военном походе. Император изгонял турок из Египта, сражался в Палестине с сирийцами, преследовал предводителя маммонов Марад-бея. Что же касается ученых, то они были заняты географией, археологией, медициной, земледелием, математикой, историей и т.д. Фурье был назначен секретарем Египетского инсти-

туда — довольно известного научного учреждения. Поручались ему и дипломатические задания.

В 1801 г. французы были изгнаны из Египта, а ученые несколько раньше отплыли на родину. Во Франции Ж.Б. Фурье стал профессором математического анализа знаменитой Политехнической школы в Париже, основанной членом Директории, а позже — министром, математиком и механиком Лазарем Карно (1753-1823) — отцом знаменитого Сади Николая Леонарда Карно — создателя термодинамики. С. Карно в эту школу поступил в 1812 г., а закончил в 1814 г., став военным инженером. Сам император заботился о школе, многое прощал ее профессорам даже тогда, когда они распространяли свои, по его мнению, непомерные требования к обучающимся там его любимым артиллеристам. Известны, тем не менее, многочисленные сентенции Наполеона в пользу ученых: «Настоящих ученых никогда не бывает слишком много», «Ученых надо оберегать в походах наравне с коровами — здоровье и тех и других необходимо для победы», «Предела учености не существует» и т.д.

Работая в Политехнической школе, Ж.Б. Фурье в 1802 г. вывел уравнение, описывающее *распространение тепла в твердом теле* (уравнение Фурье-Кирхгофа в современных курсах теплопередачи), заложив, по сути дела, основы неравновесной термодинамики. В том же году он снова на службе у Наполеона: возглавляет строительство железной дороги на Турин, осушает 80000 кв.км малярийных болот, занимается проблемами *транспорта и экологии*.

Метод решения своего уравнения Фурье нашел в 1807 г., изобретя новый математический прием, известный сегодня во всем мире как *преобразования Фурье*, или Фурье-преобразования. Языком математики ученый научился делать то, что наше ухо самопроизвольно и ежедневно делает с помощью разработанного природой органа: *улитки среднего уха*. Свою книгу «Аналитическая теория тепла» Ж.Б. Фурье сумел выпустить только в 1822 г., то есть через 15 лет после получения новых результатов. Причина стандартная. Коллеги-ученые сомневались, что *любое исходное распределение температуры в теле можно разложить на составляющие в виде главной гармоники и гармоник более высоких частот*, а ведь среди этих сомневающихся были и такие корифеи, как Лагранж, Лаплас, Лежанр, Био, Пуассон, Эйлер... Таким образом, датой появления неравновесной термодинамики считается 1922 г. Дальнейшие открытия, подтверждающие правильность уравнения переноса Фурье и метод его решения, не заставили себя ждать: экспериментальный

закон Ома был открыт в 1826 г., закон диффузии Фика в 1855 г., а закон фильтрации через пористые среды (закон Дарси) в 1856 г. Все эти законы говорили об одном и том же — поток переносимой субстанции  $J$  прямо пропорционален (множитель пропорциональности  $L$ ) градиенту температуры, электрического потенциала, концентрации, давления и т.д. В дальнейшем все эти линейные законы переноса станут базой линейной неравновесной термодинамики.

Термодинамические соображения при рассмотрении необратимых процессов впервые применил В.Томсон (лорд Кельвин) в 1854 г. Следующий крупный шаг в становлении неравновесной термодинамики сделал Л.Онзагер, установивший в 1931 г. *соотношения взаимности* между множителями пропорциональности  $L$  в системе линейных уравнений, описывающих поведение систем с многими действующими одновременно потоками (термоэлектродиффузия и т.д.):

$$L_{ij} = L_{ji}.$$

Затем Дж. Мейкснер (1941) и И.Пригожин (1947) фактически завершили построение феноменологической теории, дав уравнения для определения интенсивности роста энтропии в неравновесных необратимых процессах.

В настоящее время предпринимаются попытки построить термодинамику нелинейных, то есть далеких от равновесия, необратимых процессов.

Современная термодинамика совершенно легально может и должна заниматься основной тайной мироздания — жизнью, возможностями и законами ее зарождения и развития вплоть до самых совершенных структур, включая создание комплекса машин, орудий, энергетических установок и вообще всего того, что выполняет те или иные антиэнтропийные функции. И.Пригожин пишет: "Жизнь более не выглядит как островок сопротивления второму началу термодинамики или как деятельность каких-то демонов Максвелла. Она возникает теперь как следствие общих законов физики с присущей ей специфической кинетикой химических реакций, протекающих в далеких от равновесия условиях. Благодаря этим специальным кинетическим законам потоки энергии и вещества создают флуктуационный и структурный порядок в открытых системах".

Эволюция Вселенной, эволюция жизни, приспособляемости жизни к внешней среде и, в частности, эволюция технических



средств человечества, включая аэрокосмические средства, иерархия известных и предсказываемых структур — вот далеко не полный перечень проблем, стоящих перед современной неравновесной термодинамикой.

### 1.6. Закон И. Ньютона о конвективном теплообмене

В 1701 г. И. Ньютон предложил закон конвективной теплоотдачи между твердым телом и жидкостью (газом):

$$Q = \alpha (T_f - T_w) F, \text{ Вт,}$$

где  $\alpha$  — коэффициент конвективной теплоотдачи или просто *коэффициент теплоотдачи*;  $T_f$  — температура жидкости или газа;  $T_w$  — температура поверхности твердого тела;  $F$  — площадь теплопередающей или тепловоспринимающей поверхности.

В соответствии с этим законом *мощность теплового потока* или количество теплоты, передаваемое в единицу времени, пропорционально разности температур между стенкой и обтекающей ее жидкостью. Очевидно, что основная трудность состоит в теоретическом и экспериментальном определении коэффициента теплоотдачи, который зависит от огромного количества факторов: формы и размеров тела, физических характеристик и параметров течения жидкости (газа), механических колебаний тела и параметров этих колебаний, акустических колебаний в обтекающей среде и т.д.

В настоящее время решением многочисленных научных проблем, связанных с определением коэффициента теплоотдачи и его изменения в нужную для практиков сторону (*интенсификация* теплообмена или, наоборот, его *ослабление*), заняты огромные коллективы ученых. Фундаментальная научная дисциплина в области механики жидкости и газа, теснейшим образом связанная с интенсификацией или ослаблением конвективного теплообмена — *теория пограничного слоя*. Пограничный слой — это особый вид пристеночного течения, характеризующийся нелинейностью по высоте структурой потока (скоростью, термодинамическими параметрами и перемежаемостью линий тока, которая называется *турбулентностью*).

Переходом ламинарного течения в турбулентное впервые начал заниматься в 1880 г. О. Рейнольдс, именем которого назван один из

основополагающих *безразмерных критериев подобия* при обтекании тел вязкой жидкостью. Число Рейнольдса

$$Re = \frac{wl}{\nu} = \frac{\rho w^2}{\mu(w/l)}$$

характеризует отношение *сил инерции к силам вязкости* или вязкого трения жидкости о стенку и определяет наличие ламинарного или турбулентного режима течения ( $w$  — скорость, м/с;  $l$  — характерная длина, м;  $\nu$  — кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с;  $\mu$  — динамическая вязкость жидкости, кг/(м · с);  $\rho$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>). Динамическая вязкость  $\mu$  применяется также для определения силы сопротивления сдвигу  $\tau$  между двумя слоями жидкости или жидкостью и стенкой (сопротивление трения):

$$\tau = \mu \frac{dw}{dn},$$

где  $w$  — скорость, м/с;  $n$  — нормаль к скорости жидкости.

Впервые о возможности теоретического описания пограничного слоя заявил в 1904 г. Л. Прандтль в докладе «О движении жидкости при очень малом трении». Он же в 1914 г. показал экспериментально, что при обтекании шара, течение внутри пограничного слоя может быть либо ламинарным, либо турбулентным. В 1929 г. В. Толмин впервые теоретически определил *критическое число Рейнольдса* при обтекании плоской пластины. Экспериментально эта теория была подтверждена спустя более десяти лет Х. Драйденом и его сотрудниками. Интересно, что в середине пятидесятых годов в мире ежегодно публиковались около 100 работ по теории пограничного слоя, в середине шестидесятых — около 200, в семидесятые — около 250, в восьмидесятые и девяностые — примерно 300 работ в год. Интерес к этой проблеме не ослабевает и сейчас.

Имя Л. Прандтля присвоено одному из очень важных комплексных критериев подобия:

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a},$$

где  $a = \lambda / (c_p \rho)$  — коэффициент температуропроводности, м/с;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К);  $c_p$  — теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг · К);  $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>. Этот

критерий всегда применяется при определении коэффициента теплоотдачи, например, в *передней критической точке осесимметричного тела*:

$$\alpha_0 = 0,71 \left( 1 + 0,08 \frac{T_w}{T_{01}} \right) \left( \frac{\mu_1 \rho_1}{\mu_w \rho_w} \right)^{1/3} \sqrt{\mu_w \rho_w \beta c_{p_w} Pr_w^{-0,6}}$$

или в *передней критической точке плоского тела*, например, крыла орбитального корабля «Буран»:

$$\alpha_n = 0,51 \left( 1 + 0,12 \frac{T_w}{T_{01}} \right) \left( \frac{\mu_1 \rho_1}{\mu_w \rho_w} \right)^{1/3} \sqrt{\mu_w \rho_w \beta c_{p_w} Pr_w^{-0,6}}$$

### 1.7. Теплообмен излучением

При очень высоких температурах, характерных для камер сгорания двигателей, термоядерных энергетических установок, при нагреве *спускаемых аппаратов*, входящих в плотные слои атмосферы, а также для нашего Солнца, основную долю в передаче тепла составляют лучевой поток электромагнитной энергии. скорость которого составляет  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

Один из основных законов излучения — закон Стефана-Больцмана — был установлен экспериментально Стефаном в 1889 г. и теоретически Л. Больцманом в 1894 г.:

$$E_0 = \sigma_0 T^4, \text{ Вт/м}^2,$$

где  $\sigma_0$  — константа Стефана-Больцмана. Таким образом излучательная способность единицы поверхности нагретого тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры.

Теплопередача излучением происходит по закону, напоминающему ньютоновский:

$$Q = \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4), \text{ Вт/м}^2,$$

где  $T_1$  — температура нагретого тела, которое отдает тепло, а  $T_2$  — холодного, воспринимающего тепло тела. Везде значок "о" означает, что речь идет об *идеальном абсолютно черном теле*.

Давление электромагнитного излучения в замкнутом сосуде определяется по формуле

$$p_0 = 2,51 \cdot 10^{-16} T^4 \text{ Па} = 2,51 \cdot 10^{-21} T^4 \text{ ата},$$

откуда, сравнивая его с газовым давлением при постоянном объеме сосуда

$$p_v = \frac{T}{273} 10^5 \text{ Па},$$

получим, что равенство между ними устанавливается при  $T = 1130000$  К. Это означает, что при реакциях термоядерного синтеза (10—100 млн.К) *световое давление будет в сотни и тысячи раз превышать газовое*.

*Солнечное давление на орбите Земли* составляет для поглощающих поверхностей со *степенью черноты*  $\epsilon = 0,72$  около  $0,6 \cdot 10^{-5}$  Па, а для отражающих поверхностей около  $10^{-5}$  Па. Экспериментально давление солнечного света было впервые исследовано П.Н. Лебедевым в 1901 г.

В соответствии с *законом Кирхгофа* отношение излучательной способности нагретого тела к его лучепоглощательной способности зависит только от температуры, откуда  $\epsilon = A$ , то есть *степень черноты тела  $\epsilon$  равны его поглощательной способности  $A$* .

В соответствии с *законом Ламберта* излучательная способность нагретого тела в любом направлении равна

$$E_\phi = E_n \cos \phi,$$

где  $\phi$  — угол с нормалью к выделенной площадке тела. Иногда этот закон именуют *законом косинусов*.

Кроме рассмотренных интегральных законов существуют спектральные законы излучения и прежде всего — *закон Вина*, установившего в 1893 г., что *произведение абсолютной температуры на длину волн максимальной интенсивности излучения, есть величина постоянная*:

$$T \lambda_{\text{max}} = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}.$$

Этот закон можно применять до 1500 К, а далее постоянная возрастает. Экспериментально закон можно проверить, нагревая же-

лезный прут. Излучение сначала идет в красной области спектра, а затем постепенно переходит в его оранжевую и желтую часть.

*Закон Планка*, теоретически установленный М.Планком в 1901 г. позволяет математически описать *спектр электромагнитного излучения*:

$$E_{\lambda_0} = C_1 \lambda^{-5} \left[ e^{C_2/(\lambda T)} - 1 \right]^{-1} \quad \text{Вт/м}^2,$$

где *постоянные Планка*:

$C_1 = 0,37 \cdot 10^{-15} \text{ Вт м}^2$  и  $C_2 = 1,439 \cdot 10^{-2} \text{ м К}$ . Здесь  $\lambda$  длина волны, м.

Таким образом, существуют *три различных по физической природе способа передачи тепла*: теплопроводность, конвекция и лучистый теплообмен, которые в реальных условиях всегда действуют совместно, хотя изучаются (исследуются) чаще всего порознь. Роль наук о *теплообмене*, то есть наук, охватываемых неравновесной термодинамикой, будет неуклонно возрастать, причем не только в связи с развитием техники летательных аппаратов, увеличения скорости их полета в атмосфере, достижения и преодоления теплового барьера, выхода в дальнее и околосолнечное космическое пространство, но и в связи с проблемой глобального климата.

## 1.8. Теплофизические проблемы глобального климата

Система Земля-Луна существует примерно 4,5 млрд. лет. Земной климат реконструирован с высокой достоверностью примерно на 550 млн лет (рис.5). Видно, что за исключением периода больших возмущений (ПБВ) (50... 250 млн. лет назад) среднегодовая температура атмосферы Земли совершала крупномасштабные периодические колебания. Жаркие периоды с температурой более 25° сменялись холодными (ледниковые периоды) с температурой ниже 10° С. Период таких колебаний составляет примерно 150 млн.лет.

Совершенно очевидно, что люди, сумевшие приспособиться к холоду благодаря освоению пещер, горячих источников и умению обращаться с огнем, совершенно не готовы к будущему жаркому климату, который, как это видно из рис. 5, неизбежен. К 2030 г. температура может подняться еще на 1,5...2°, а это грозит неизбежными катастрофами, прежде всего, северным странам и, в частности, Рос-

сии, более 50% территории которой расположено в зоне Вечной мерзлоты (ВМ). Теплофизические расчеты показывают, что увеличение среднегодовой температуры атмосферы всего на 1°, снижает несущую прочность льда ВМ на 50%! А это означает, что всего через 20...30 лет железные дороги, магистральные трубопроводы, линии электропередач, жилые и производственные постройки на ВМ будут непредсказуемо разрушаться. На смену им должны придти новые технические решения, связанные, прежде всего, с новыми типами летательных аппаратов и новыми типами наземных построек, выполненных также по технологии строительства и эксплуатации ЛА.

Вместе с тем, предстоит решать и более трудную теплофизическую задачу — научиться *искусственно регулировать климат Земли*. Сделать это можно только в том случае, когда у землян будет достаточная энергетика, транспортные и технологические возможности космического масштаба. Пока же приходится с сожалением констатировать, что как валовая, так и среднедушевая энергия, потребляемая землянами, снижается (рис.2). Развитие ЛА и космических технологий, в том числе космических экранов, космических отражателей, космических электростанций и космических заводов — единственно возможный путь к выживанию человечества, но времени для практической реализации всего этого может быть мало, и тогда человечество окажется в крайне критическом состоянии — вплоть до полного исчезновения *цивилизации*.

## 2. ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

### 2.1. Потребности организмов и ресурсы для их удовлетворения

*Естественный* (природный) живой организм, то есть человек, животное, насекомое и т.д., *искусственный* (антропогенный) организм, то есть автоматически действующее устройство, *человекомашинный организм*, то есть техногенное устройство, управляемое человеком или экипажем (самолет, космический корабль и т.д.), а также *общественный организм*, состоящий, как правило, из соче-

тания естественных, искусственных и человеко-машинных организмов, существует благодаря потреблению *внешних ресурсов* в тех количествах, которые необходимы для устойчивого существования, функционирования или развития организма.

Основная базовая потребность любого организма — *энергетическая*. Энергия — это продукты питания, свет, тепло, топливо для самолетов, ракет и всех остальных видов транспорта, это основа жизни рудников, заводов и фабрик, испытательных полигонов истроек.

Любой из перечисленных организмов имеет либо созданные природой (органы дыхания, пищеварения, кровеносная система и т.д.), либо изготовленные техногенным способом (баки для горючего, двигатели, энергосистемы) органы или агрегаты, обеспечивающие получение энергии извне, ее преобразование, распределение по организму и усвоение. У естественных (природных) организмов «энергетические» органы занимают довольно большую долю от массы организма — от 32 до 44% или  $38 \pm 6\%$ , если говорить о математическом ожидании, то есть среднем значении (38%) и *дисперсии*, то есть отклонении от среднего ( $\pm 6\%$ ). Характерно, что приведенные величины самоподобны (фрактальны) для подавляющего числа организмов — от живой клетки, до самых огромных животных — слонов и голубых китов, то есть для всей *фауны*, всего живого мира. В данном случае самоподобие или фрактальность означает подобие части целому. Иначе говоря, и для всей фауны, и для любых ее структурных единиц (сообщества, популяции, симбиозы) — вплоть до индивидуальных организмов *относительные затраты массы на обеспечение энергетических функций — одни и те же!* Но фауна очень сложна и классификация организмов от простых к сложным строится по кластерному принципу как, впрочем, и любая конструкция. Вот почему фрактальная величина  $38 \pm 6\%$ , характерная для любого кластера, носит название фрактально-кластерной, а соотношение между всеми потребностями называются *фрактально-кластерными соотношениями* (ФКС).

Другой базовой потребностью любого организма является потребность транспортная или потребность в транспортировке. ФКС для транспорта составляет  $27 \pm 4\%$ , причем эта цифра характерна не только для массы организма (ноги и опорно-двигательный аппарат, крылья насекомых и птиц, мышцы тела и плавники рыб, крыло, шасси, киль, стабилизатор и тянущий винт самолетов, ходовая часть наземных транспортных средств, винты с приводами и рули плавс-

редств и т.д.), но и для других единиц измерения (*свойство мультифрактальности*). Например, в жилой квартире, в рабочем помещении или в салоне самолета относительная площадь пола, предназначенная для *перемещения*, составляет, как правило, ту же величину  $27 \pm 4\%$ . Рабочий относительный объем в кабине космического корабля или станции, предназначенный для перемещений космонавтов, тоже того же порядка. То же самое можно сказать и о других величинах. Время, затрачиваемое человеком на свою энергетику (сон, отдых и прием пищи), должно составлять  $38 \pm 6\%$  от времени суток, а время, затраченное на разного рода перемещения —  $27 \pm 4\%$ . То же самое можно сказать и о *затратах денежных средств*.

*Экологические потребности* оцениваются в  $16 \pm 3\%$ . Для человека — это защитные элементы организма: иммунная система, кожный и волосистой покровы, костная защита наиболее важных органов и т.д. Для космического корабля «Буран» — это теплозащита, теплоизоляция, защитные люки, створки, обшивка фюзеляжа и т.д. Для города или государства экологические (защитные) функции выполняют военизированные подразделения, пожарные, суд и прокуратура, органы природоохраны, здравоохранения и т.д.

*Технологические потребности* оцениваются в  $13 \pm 2\%$ . У человека для совершения технологических операций предназначены руки. У космического корабля «Буран» для тех же операций имеется манипулятор, стыковочный узел, элементы крепления полезного груза и т.д. Для государства — это все виды производств (фабрики, заводы, рудники, учебные заведения и т.д.).

*Информационные потребности* ( $6 \pm 1\%$ ) для человека удовлетворяются головным мозгом, рецепторами (пять органов чувств), половой системой, нервно-мозговой системой. Для летательного аппарата информационная система включает *систему управления движения, систему управления бортовым комплексом, систему измерений, системы обмена информацией*, то есть радиотехническую, бортовые огни, звуковые сигналы и т.д. Для государства в комплекс информационных ресурсов входит наука, культура, печать, образование, финансы, религия, почта, радио, телевидение, кино и т.д.

В заключение следует сказать, что организмы, для которых соблюдаются ФКС, называются *устойчивыми*, жизнеспособными для условий Земли и околоземного пространства.

## 2.2. Легенда о Дедале и Икаре. Планеры

Миф о Дедале и сыне его Икаре возник в Афинах и дошел до нас благодаря поэме Овидия «Метаморфозы».

Дедал, потомок Эрехтея, был художником, скульптором, зодчим и инженером, изобрел множество инструментов, в частности — топор и бурав. Афинский ареопаг (суд) приговорил Дедала к смерти за убийство своего талантливого ученика и племянника Тала, поэтому Дедал был вынужден бежать на остров Крит к могущественному царю Миносу, сыну Европы и Зевса. Знаменитый Лабиринт — дворец, из которого нельзя было найти выхода — одна из построек, выполненная Дедалом. В этом дворце Минос поселил своего сына — ужасного Минотавра, чудовище с телом человека и головой быка. Чтобы спастись от Миноса и стать свободным, Дедал изготовил из перьев, льняных ниток и воска четыре больших крыла — для себя и сына Икара. И вот крылья укреплены на спинах, а руки продеты в специальные петли. Хорошо известно, что молодой Икар во время полета приблизился к Солнцу, воск растопился, перья рассыпались, и он погиб в морской пучине, дав части Эгейского моря, между островами Самос, Парос и берегами Малой Азии, название Икарийского.

Существуют и другие — отрывочные, но более правдоподобные сведения о Дедале: «крылья» он начал делать в «тюрьме», «камера» которой представляла собой просто-напросто глубокую яму, выкопанную на побережье. Таких ям было много, и охранники только изредка убеждались в наличии всех узников.

Дедал, будучи хорошим инженером, из своей ямы мог наблюдать лишь за полетом птиц, поэтому нет ничего удивительного в том, что у него возникла мысль построить себе огромные крылья. В ямах гнездились дикие пчелы и голуби, росли молодые побеги ивы. Нитки можно было выдернуть из одежды. По-видимому, не составило большого труда убедиться, что пчелиный воск — такой мягкий днем на Солнце, ночью, когда холодно, приобретает исключительную прочность. Ивовые прутья — тоже уникальный строительный материал — у них, кроме гибкости, большое отношение прочности к весу. Работа, по-видимому, продолжалась много месяцев, а то и лет. Не обошлось, конечно, и без экспериментов и тренировок. И вот в одну из ночей Дедал, как по лестнице, выбрался по крыльям из ямы, надел эти крылья на себя и спланировал с их помощью на морской

берег к стоящим там лодкам. Все остальное придумали любители сочинять легенды, мифы и удивительные истории.

Дедала следует признать мифическим (а скорее всего — реальным) основоположником первых летательных аппаратов — планеров, конструкция которых была подсказана самой природой — парением птиц.

Среди хорошо известных первых планеров, то есть *безмоторных летательных аппаратов тяжелее воздуха, использующих аэродинамическую подъемную силу*, следует назвать планеры конструкции Отто Лилиенталя (1848–1896 г.), на которых он с 1831 г. налетал более 5 ч. и совершил более 2000 полетов, пока не погиб в одном из них в возрасте 46 лет.

Графическая зависимость между коэффициентами подъемной силы  $C_y$  и силы сопротивления  $C_x$  (рис. 7) называется в его честь *полярной Лилиенталя*.

До Лилиенталя были известны либо действующие модели планеров, либо привязные планера — воздушные змеи. В частности, создатель отечественного самолета А.Ф. Можайский (1825–1890 гг.) в 1876 г. построил змей-планер и дважды сам поднимался на нем в воздух. Но это не был свободнолетающий аппарат, как у О. Лилиенталя. Он буксировался тройкой лошадей.

Современная классификация планеров приведена в табл. 1

Среди привязных планеров широко распространены *воздушные змеи: декоративные*, напоминающие своей формой корабли, самолеты, ракеты, животных и насекомых, а также тренировочные жесткие, мягкие и надувные. Даже простой спортивный парашют при его транспортировке легковой автомашиной за специальный *леер* (шнур) способен поднять человека на высоту до 150 м.

Экспериментальные привязные планеры используются для натурных аэродинамических продувок, для испытаний на привязи свободнолетающих аппаратов в условиях реальной атмосферной турбулентности и т.д.

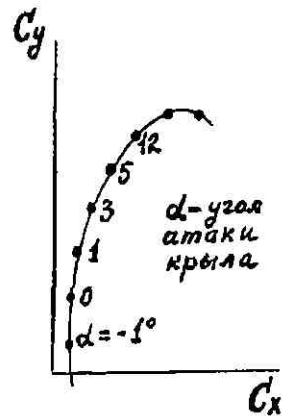


Рис. 7

Таблица 1

## Современная классификация планеров

Привязные (транспортируемые)				Свободнолетающие			
Спортивные	Экспериментальные	Энергетические	Информационные	Спортивные	Экспериментальные	Целевые	Космические
Декоративные	Жесткие	Тянущие	Сигнальные	Парители	Жесткие	Транспортные	Орбитальный корабль
Жесткие	Мягкие	Ветровые станции	Радиопередатчики	Дельтапланы	Мягкие	Десантные	«Буран»
Мягкие	Надувные	Солнечные станции	Фотографирующие	Пилотажные	Надувные	Разведывательные	«Спейс Шаттл»
Надувные		Атмосферно-статические		Рекордные		Пассажирские	

Энергетическое использование привязных планеров — воздушных змеев — пока весьма ограничено. Они могут, в частности, служить эффективным парусом для судов и сухопутных средств: ведь на высоте скорость ветра больше, и парус делается более эффективным. *Ветровые электростанции* по этой же причине также могут располагаться на змеях, где они более эффективны по сравнению с наземными. Большие площади солнечных батарей и их сравнительно невысокая масса позволяют применять змей-электростанцию в тех местах, где поверхность суши и моря не позволяют использовать их в стационарных условиях. Кроме того, известно несколько проектов змеев-электростанций, работающих от атмосферного электричества, особенно в период грозы.

Информационные планеры-змеи широко использовались против США во вьетнамской войне в качестве сигнальных средств, антенн и, возможно, носителей фоторазведывательной аппаратуры.

Свободнолетающие планеры используются намного чаще привязных. Из спортивных *парителей* (планёр — слово французское, означающее паритель) можно отметить высокие качества немецкого планера «Нимбус-3Д», созданного в 1986 г. (Размах крыла 24,6 м, площадь крыла 16,85 м<sup>2</sup>, удлинение, то есть отношение длины к по-

перечному размеру или *средней аэродинамической хорде* САХ-36, максимальное аэродинамическое качество  $K_{\max} = C_y / C_x = 57$ , скорость полета при  $K_{\max}$  равна 125 км/ч. Взлетная масса планера 750 кг, а пустого — 400 кг). Широко известны спортивные *дельтапланы*, пилотажные планеры, способные выполнять фигуры высшего пилотажа и специально созданные рекордные машины, предназначенные для установления рекордов дальности, продолжительности или маневренности полета. На взлете большинство планеров являются привязными, так как их тянут наземные транспортные средства, стационарные мотолебедки, резиновые амортизаторы или другие летательные аппараты (чаще всего — самолеты). Иногда для старта мотопланера используются поршневые, реактивные или даже ракетные двигатели-ускорители. В настоящее время спортивные планеры сертифицируются на стандартные (размах крыла 15 м), открытого класса (без ограничений размеров) и клубного класса. При этом все они в зависимости от назначения могут быть учебными, тренировочными и целевыми (пилотажными или рекордными).

Экспериментальное планеростроение получило широкий размах в 20-30-е гг. На Всесоюзные соревнования в Коктебель (Планерское) в Крыму почти ежегодно привозили все новые и новые конструкции О.К. Антонов, К.К. Арцеулов, В.К. Грибовский, Г.Ф. Грошев, В.И. Емельянов, С.В. Ильюшин, С.П. Королев, В.М. Мясичев, В.С. Пышнов, М.К. Тихонравов, А.Н. Туполев, Б.Н. Шереметев, А.В. Улыбин, Б.Н. Юрьев, А.С. Яковлев и другие. В 1935 г. в ОКБ П.И. Гроховского был построен первый надувной резиновый одноместный планер. С.П. Королев построил планер «Красная звезда», способный выполнять «петлю Нестерова». О.К. Антонов в 1942 г. разработал планер КТ (крылья танка) для десантирования легких танков. Под руководством М.В. Суханова был построен планер с дискообразным крылом и оперением «Дископлан II».

В 1932 г. по проекту Б.Д. Урлапова был построен первый в мире 18-местный пассажирско-десантный планер.

Целевые планеры, особенно транспортные и десантные, широко использовались во время Великой Отечественной войны и находились на вооружении армий ССР (Ил-32, Як-14, Ц-25), США, Великобритании, Франции, Германии, Японии и

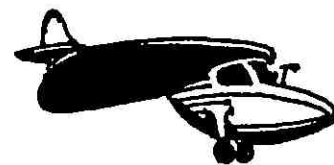


Рис. 8

других стран. На рис. 8 показан один из оригинальных отечественных планеров с дискообразным крылом.

Космические корабли «Буран» (СССР) и «Спейс Шатл» (США) — это тоже планеры, поскольку они совершают в атмосфере Земли безмоторный планирующий полет. Таким образом, планеры достигли космических высот полета (свыше 100 км) и космических скоростей входа в атмосферу (свыше 7 км/с или 27 М, где число М — отношение скорости полета к скорости звука). Для таких планеров первостепенное значение имеет решение ряда теплофизических проблем: теплозащиты, теплоизоляции, хранения на борту криогенных топлив для двигателей, обеспечивающих управление полетом в верхних слоях атмосферы, где аэродинамические органы имеют недостаточную эффективность, и др.

### 2.3 Братья Монгольфье и воздухоплавание

Жак Монгольфье (1745-1799) и его брат Жозеф Мишель (1740-1810) были не первыми изобретателями и строителями тепловых аэростатов, однако их имена оказались наиболее известны истории.

Первым был португальский священник отец Бартоломеу де Гужмаун, который поднялся на шаре, наполненном горячим воздухом в закрытом помещении в 1709 г. Подъячий рязанского воеводы Иван Крякутный сделал то же самое на открытом воздухе в 1731 г., что и было официально зафиксировано в летописи.

И только после этого, в июне 1783 г., состоялся первый полет «Монгольфьера» диаметром 11,4 м и объемом 600 м<sup>3</sup>. Аэростат поднялся до высоты 2000 м и за 10 минут преодолел расстояние около 2,5 км. Пассажиров на нем не было. Более крупный аэростат объемом 12000 м<sup>3</sup> уже имел «пассажиров»: барана, петуха и утку. 19 сентября 1783 г. он поднялся на высоту около 500 м и через 10 минут приземлился на расстоянии 4 км от места старта. Затем последовал непродолжительный подъем консультанта братьев Монгольфье физика Ж. Пилатра де Розье на высоту около 24 м. И, наконец, тот же Розье и маркиз д'Арланд 21 ноября 1783 г. поднялись на аэростате высотой 22,7 м и диаметром около 15 м на высоту 100 м и совершили при большом стечении публики 25-минутный полет на дальность около 9 км. Французская пресса поспешила назвать этот полет первым полетом людей на летательном аппарате. Аэростат был изготовлен из льняного полотна, обклеен бумагой с красочными узора-

ми, имел галерею для экипажа и топку для сжигания соломы для поддержания высокой температуры внутри оболочки. Общая масса оболочки и галереи составляла 675 кг.

В том же 1783 г. француз Ж. Шарль совершил первый в мире полет на аэростате, наполненном водородом.

Первый в истории научный полет на высоту 2600 м совершил в 1804 г. российский академик Я.Д. Захаров.

Первый полет управляемого аэростата объемом 2,5 тыс.м<sup>3</sup> — дирижабля — был совершен в 1852 г. Анри Жиффаром в Париже. Французское слово «дирижабль» и означает «управляемый».

В 1887 г. для наблюдения солнечного затмения совершил полет на воздушном шаре 53-летний Д.И. Менделеев.

В 1910 г. на вооружение русской армии поступили первые дирижабли «Кречет» и «Альбатрос», а к 1914 г. армия имела уже 11 воздухоплавательных рот и одно отделение, оснащенные 14-ю дирижаблями и привязными аэростатами. Дирижабли могли летать со скоростью до 70 км/ч и длительностью до 30 ч.

В дальнейшем на вооружении российской, потом Красной (с 1917 г.), а затем Советской армии находились дирижабли «Норвегия» (с 1923 г.), «Граф Цеппелин» (с 1928 г.), «Победа» (с 1944 г.), GA-42 (с 1987 г.), а в народном хозяйстве — дирижабли «СССР-В-1», «СССР-В-5», «СССР-В-6», «МС-2». Дирижабль В-1 был построен в 1932 г. ЦАГИ и заводом «Каучук» (объем 2,2 тыс.м<sup>3</sup>, длина 45 м), а В-5 соорудился «Дирижаблестроем» в 1932-1934 гг под руководством У. Нобиле (объем 2,158 тыс.м<sup>3</sup>, длина 47,5 м) как и В-6 (рис. 9, а). Дирижабль В-6, установивший в сентябре 1937 г. рекорд продолжительности полета 130 ч. 27 мин (объем 19,4 тыс.м<sup>3</sup>, длина 104,5 м, диаметр 18,38 м, аэростатическая подъемная сила на высоте 500 м — до 199,1 кН, масса конструкции 12 т, общая мощность трех двигателей 530 кВт).

О возможностях дирижаблей говорит такой факт: немецкий LZ-127 постройки 1928 г. (рис. 9, б) совершил 590 полетов, прошел 1700 тыс км и перевез 13000 пассажиров. Общий налет аппарата достиг 17177 ч (объем внешний 122000 м<sup>3</sup>, длина 236,5 м, диаметр 30,5 м, масса конструкции 62,1 т, общая мощность пяти двигателей 2020 кВт, крейсерская скорость 117 м/с). Только в Южную Америку из Германии этот аппарат совершил 136 полетов (расстояние 10000-11000 км)

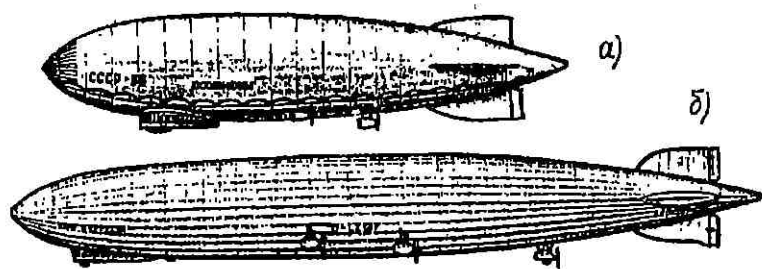


Рис. 9

В России проекты дирижаблей создавали В.Н. Архангельский, О.К. Костович, А.И. Лодыгин, Н.М. Соковнин, И.И. Третесский, К.Э. Циолковский и другие.

В частности, К.Э. Циолковскому принадлежит идея о создании цельнометаллического дирижабля с изменяемым объемом. Была построена крупномасштабная модель этого дирижабля, но натурная конструкция достроена не была.

К сожалению, дирижабли могут летать лишь на высотах 3-5 км, в то время как научные задачи требуют подъема на значительно большие высоты. Рекордная высота подъема неуправляемого стратостата «Осоавиахим» — 22 км была достигнута в 1934 г, однако его героический экипаж П.Ф. Федосеев, И.Д. Усыкин, А.Б. Васенко в результате аварии погибли. Гондола стратостата хранится в Мониинском музее авиационной техники ВВС под Москвой.

Одним из важных положительных результатов этого трагического полета было испытание герметичной кабины с людьми на высоте, где давление воздуха составляет всего  $5 \cdot 10^3$  Па. Не случайно группа инженеров, проектировавшая гондолы, была приглашена С.П. Королевым в ОКБ-1 для участия в создании кабины спускаемого аппарата знаменитого гагаринского «Востока», которая повторяет геометрию гондол стратостатов.

Рекорд высоты беспилотного стратостата установлен в 1972 г. и составляет 51,8 км (фирма «Уинзен», США), а пилотируемого (1966) — 37,7 км. Пилот США Николс Пиантаниде погиб при приземлении аппарата.

В настоящее время существуют проекты использования аэростатов на Марсе и Венере, то есть аппараты «легче воздуха» стали космическими.

Теория создания аэростатической подъемной силы основана на законе Архимеда. Сила, действующая на  $1\text{ м}^3$  объема любого тела, равна

$$R_A = \rho g = g / v = \gamma, \text{ Н/м}^3.$$

Особенно эффективно эта сила может быть использована на Земле и Венере, что видно из табл. 2.

Таблица 2

Аэростатическая подъемная сила для нулевой высоты над поверхностью Венеры, Земли и Марса

Планета	Плотность атмосферы, $\text{кг/м}^3$	Ускорение силы тяжести, $\text{м/с}^2$	Аэростатическая подъемная сила, $\text{Н/м}^3$
Венера	1,4	8,50	11,9
Земля	1,25	9,82	12,3
Марс	0,004	3,76	0,015

Охарактеризуем некоторые из аэростатических летательных аппаратов. В энергетике существуют проекты *переизлучателей*, а также *солнечных электростанций*, представляющих собой огромные, весом в десятки тысяч тонн, управляемые аэростаты, располагаемые на высоте 25-30 км, где *скоростной напор* от ветра минимален. Аэростат получает энергию в виде лазерного луча от космической солнечной электростанции (КСЭС) либо снабжается непосредственно солнечной энергией (концентраторы, солнечные батареи и т.д.), которая на борту преобразуется и в виде СВЧ-луча передается земным потребителям. Аэростат имеет двойную оболочку, заполнен несущим газом *при давлении окружающей среды*, что упрощает действия экипажа во время аварий, связанных с разрывом или пробоем оболочки. Форма аэростата и теплофизические режимы поддержания параметров в оболочках — главные проблемы создания таких конструкций.

Существуют также проекты привязных *ветроэлектростанций*, когда аэростат располагают на высоте максимальных скоростных напоров ветра (вплоть до 9-12 км) в зоне так называемых *струйных течений*.



**Транспорт** — основное назначение дирижаблей. Современные проекты используют новейшие материалы, методы расчетов, навигационные приборы и т.д. Дирижабли тихоходны, зато экономичны и экологически выгодны. Они нужны в условиях Крайнего Севера, где нет аэродромов и дорог. Их уникальная способность вертикального подъема и посадки, продолжительного зависания над одним местом и глубокого регулирования подъемной силы при помощи *балласта* и заполняемых воздухом *баллонов* позволяет надеяться на осуществление погрузочно-разгрузочных и монтажных операций.

В *экологии* аэростатические средства могут использоваться не только для наблюдения и диагностики, но и для активного воздействия на очаги пожара. В армии аэростаты и дирижабли использовались для корректировки огня артиллерии, поиска подводных лодок и т.д.

*Технологическое* использование дирижаблей пока весьма ограничено. Существуют проекты «летающих островов» для выращивания сельхозпродуктов, для освещения или затенения крупных или важных строек, открытых месторождений, ликвидации аварий, для организации особо чистых производств и т.д.

В *информатике* (навигация, связь, наука, реклама, наблюдения за земной поверхностью) дирижабли и аэростаты используются довольно широко — практически с самого момента их появления.

#### 2.4. Братья Райт и авиация

Младший из братьев Райт-Орвилл (1871-1948) — только в 1942 г. добился от правительства официального признания приоритета в создании первого в мире самолета. Для этого в знак протеста ему пришлось даже в 1928 году передать первый самолет в музей Великобритании, откуда он перекочевал в США только в 1948 г. Старший брат, Уилбер (1867-1912), скончался от тифа и в этих перепетях не участвовал. По сути дела, братья Райт создали не первый в мире самолет, а первый самолет, способный совершать *управляемый установившийся длительный полет*. Их самолет не имел пилотской кабины, а напоминал планер-биплан О.Лилиенталя, но снабженный бензиновым поршневым двигателем их собственной конструкции мощностью 8,8 кВт с двумя толкающими винтами. Назывался самолет «Флайер-1» (рис. 10, а). Первый полет он совершил 17.12.1903 г., пролетев за 12 с расстояние в 36,5 м. Самолет пи-

лотировал Орвилл Райт. Взлетная масса самолета составляла 355 кг. Разогнался он по направляющей длиной 18 м, а приземлялся на два полоза. В 1904 г. усовершенствованный самолет братьев Райт совершал полеты по кругу, в 1905 г. — по замкнутому 39-километровому маршруту (за 38 мин.), в 1908 г. за 2 ч.18 мин. новая модель пролетала расстояние в 123,8 км и была продана военному ведомству США. В 1910 г. самолет достиг высоты 2998 м.

К этому времени в Европе уже эксплуатировались (с 1906 г.) самолеты Трояна Вуя (Румыния), Луи Блерио, Эдуарда Ньюпора (Франция), Анри Фармана (Англия), работали школы летчиков, конструкторские бюро и заводы по изготовлению самолетов различного класса.

В 1910 г. поднялись в воздух первые отечественные самолеты А.С. Кудашева, И.И. Сикорского, Я.М. Гаккеля.

Американские ведомства не зря сомневались в первенстве братьев Райт. В том же 1903 г. Сэмюэл Ленгли (1834-1906), до братьев Райт, то есть 7 октября и 8 декабря испытывал свой самолет «Аэродром» (стартовая масса 385 кг, поршневой двигатель мощностью 37 кВт, два толка-

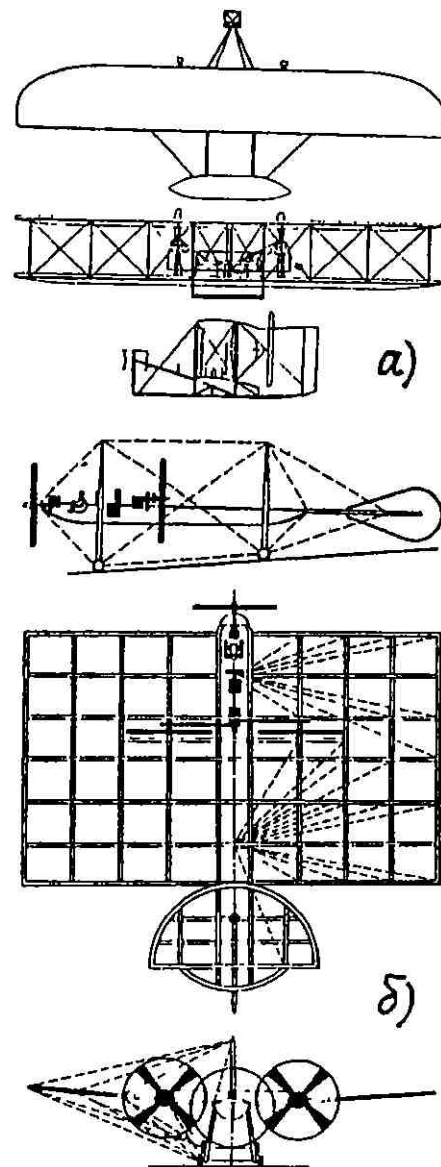


Рис. 10

ющих винта, два tandemно расположенных крыла, пилот У. Мэнди — создатель двигателя для этого самолета), заказанный ему правительством США для военных целей. Тот же самолет с бензиновым поршневым двигателем, но в масштабе 1/4 и в беспилотном варианте, прошел испытания в 1901 г., то есть за два года до полета самолета братьев Райт. Эти натурные испытания «Аэродрома» удачными назвать было нельзя. Оба раза, стартуя с *катапульты*, помещенной на баржу, самолет не справлялся с управлением и вскоре после взлета падал в воду. Что же касается моделей самолетов с паровыми двигателями, испытанных С.Ленгли в 1896 г., то они совершали полеты на расстояние до 1280 м.

По той же причине — *нетренированность* первого в мире пилота и несовершенство *системы управления* — не смог совершить удачный полет самолет А.Ф. Можайского (1825-1890) (рис.10, б). Модель этого самолета с *часовой пружиной* успешно и устойчиво летала в 1876-1877 гг. Самолет представлял собой *моноплан* с крылом малого удлинения, лодкой-*фюзеляжем* и *хвостовым оперением* с *рулями высоты и направления*. В 1982 г. в ЦАГИ были определены его основные характеристики: размах крыла 23,2 м, площадь крыла 329 м<sup>2</sup>, удлинение крыла 1,64, площадь горизонтального оперения 41,4 м<sup>2</sup>, длина самолета 25 м, высота 7,5 м, колея шасси 3 м, база 9,4 м, диаметр воздушных винтов 4,75 м, КДП винта 0,55, мощность паровых двигателей 22,36 кВт, масса двигателей с котлом, конденсатором и сепаратором 167,1 кг, взлетная масса самолета 1266 кг, нагрузка на крыло 3,85 кг/м<sup>2</sup>, энерговооруженность 0,0177 кВт/кг, аэродинамическое качество вдали от Земли 4,05, а у поверхности 4,6, центр масс — на расстоянии 38,6% средней аэродинамической хорды (САХ). Сейчас можно с уверенностью утверждать, что машина была работоспособной, но малая тяговооруженность, трудность и инерционность в управлении самолетом (спереди помещалось корабельное рулевое колесо управления *курсом*, сбоку по правому борту — такое же колесо управления *тангажом*, а управление *креном*, по-видимому, за счет перекоса крыла было вообще малоэффективным) привели к неминуемой его аварии. В июле 1885 г. в Красном селе под С.Петербургом была предпринята первая в мире попытка поднять самолет, управляемый пилотом. После долгого разогрева котлов и запуска паровых машин вращение четырехлопастных воздушных винтов стало ускоряться и достигло предельной величины — около трех оборотов в секунду (с такой скоростью сейчас вращаются лопасти тяжелых вертолетов). Самолет медленно

покатился по деревянным рельсам, как бы нехотя оторвался от них, но, потеряв опору, тут же накренился и, ударившись крылом о грунт, поломался. Подобная ситуация тысячекратно повторялась затем в авиации с самолетами, имеющими *трехточечное* шасси. И только у самолетов с *велосипедным двухточечным* шасси этого не происходит, поскольку пилот вынужден балансировать аппарат по крену еще до отрыва колес от *взлетно-посадочной полосы*.

Теоретические и экспериментальные основы авиации разрабатывали Леонардо да Винчи (1452-1519): сопротивление тел встречному потоку, подъемная сила плоской пластины под углом *атаки* к потоку, *тело наименьшего сопротивления* с тупой носовой и заостренной хвостовой частью, трактат "О летании птиц" (1505), конструкция искусственных крыльев, парашют пирамидальной формы, *махолет* или орнитоптер и *геликоптер* с винтом Архимеда (1475) — прообраз вертолета, И.Ньютон (1643-1727): сила сопротивления тел встречному потоку, теория обтекания, М.В. Ломоносов (1711-1765): модель «аэродинамической машины» (1754) — прообраз вертолета с соосными винтами, трактат «Размышления об упругой силе воздуха» (1745), Джордж Кейли (1773-1857): концепция ЛА с фиксированным крылом и отдельным движителем (1799), экспериментальная модель планера с крестообразным управляемым хвостовым оперением и скользящим балансировочным грузом (1804), стабилизирующий эффект V-образного крыла (1805), влияние кривизны профиля и перемещение центра давления крыла, двигатели на горячем воздухе и пороховых газах (1807-1809), основные принципы полета планера и самолета (1809-1811), колесное шасси со спицами, натурные планеры, на которых впервые выполнялись короткие полеты человека (1853) и т.д., братья Монгольфье предложили, разработали, участвовали в изготовлении и применении для спуска человека с аэростата парашюта (1797). Швейцарец Д.Бернулли (1700-1782), немец Л.Эйлер (1707-1783) и француз Ж.Лагранж (1736-1813) получили фундаментальные уравнения гидродинамики, применяемые при решении задач об обтекании ЛА. Уравнения гидродинамики *вязкой жидкости* получили француз А.Навье (1785-1836) и англичанин Дж.Стокс (1819-1903). Англичанин О.Рейнольдс (1842-1912) экспериментально установил наличие двух режимов течения вязкой жидкости — ламинарного и турбулентного, что сыграло большую роль при создании теории моделирования обтекания ЛА. Д.И. Менделеев (1834-1907) опубликовал в 1880 г. классический труд «О сопротивлении жидкостей и о воздухоплавании», изобрел высотомер, пред-

Классификация атмосферных ЛА тяжелее воздуха

I уровень	Авиация					
	моторная			безмоторная		
II уровень	ГВП	ВВП	КВП	ГВП	ВВП	КВП
III уровень	Самолеты	Самолеты	Самолеты	Планеры	Парашюты	Планеры
IV уровень	Автожиры	Вертолеты	Автожиры	Парашюты	Ротошюты	Парашюты
	Экранолет	Махолеты	Вертолеты	Ротошюты	Дельтапланы	Дископланы
	Махолеты	Автожиры	Махолеты	Дельтапланы	Спускаемые аппараты	Спускаемые аппараты
	Вертолеты	Платформы	Платформы	Дископланы	Гибриды	Гибриды

ложил герметичную кабину высотного аэростата (1875), предсказал большое будущее «аэродинамам», то есть аппаратам тяжелее воздуха. Н.Е. Жуковский (1847-1921) создал современную *гидроаэродинамику*, руководил сооружением аэродинамической трубы — одной из первых в Европе (1902), а в 1904 г. в Кучино, под Москвой, создал первый в мире аэродинамический институт и организовал воздухоплавательную секцию, создал и прочитал курс лекций «Теоретические основы воздухоплавания» в Императорском техническом училище (ныне МГТУ им. Н.Э. Баумана), разработал теорию бомбометания, в 1918 г. по его предложению был учрежден ЦАГИ (Центральный аэрогидродинамический институт), а сам он был назначен первым его руководителем, в 1920 г. при участии Н.Е.Жуковского был создан Институт инженеров Красного Воздушного Флота, ныне Военно-воздушная инженерная академия, носящая имя ученого. Его перу принадлежит большое количество теоретических трудов по аэромеханике, динамике и устойчивости полета аэропланов и геликоптеров, по методам расчета воздушных винтов, крыльев и других элементов ЛА. Им написана масса учебников и учебных пособий. В.И. Ленин назвал Н.Е.Жуковского «отцом русской авиации». Имя ученого увековечено премиями его имени, *стипендиями для студентов МАИ, МГУ и МГТУ*, его именем назван город в Московской области, ЦАГИ, ВВИА в г.Москве и т.д. Кроме Н.Е.Жуковского, основополагающие труды по аэродинамике, теории крыла конечного размаха, теории пограничного слоя принадлежат С.Н.Чаплыгину (1869-1942), Ф.Ланчестеру (1868-1946), Л.Прандтлю (1875-1953), Т.Карману (1881-1963), К.Э. Циолковскому (1857-1935) и др. Для развития теории и конструкции вертолета большое значение имели работы братьев Л. и Ж.Бреге, Ш.Рише, а также П.Карню, которые в 1907 г. продемонстрировали первые полеты с людьми на вертолетах. Б.Н. Юрьев разработал одновинтовую схему вертолета с рулевым винтом, изобрел автомат перекося, внес значительный вклад в теорию воздушного винта. В 1913 г. И.Сикорский создал первые в мире тяжелые четырехдвигательные самолеты «Русский витязь» и «Илья Муромец», которые выпускались серийно.

Кластерный анализ (классификация) атмосферных летательных аппаратов тяжелее воздуха представлен в табл. 3. Полная классификация включает не четыре, а восемь уровней — вплоть до марок ЛА (Ми-10К, Ту-144 и т.д.).

Определение: авиация — это полеты в пределах атмосферы (условная высота до 100 км) аппаратов тяжелее воздуха, включающая

сами ЛА, наземное обеспечение, личный состав и информацию по специальным отраслям знаний, действующая как сложный человек-машинный организм.

Относится ли к авиации полет брошенного камня или выпущенного из орудия артиллерийского снаряда?

Иначе говоря, является ли камень или артиллерийский снаряд летательным аппаратом? Для этого надо дать определение летательному аппарату: *ЛА — это техногенная система, предназначенная для полета или левитации (неподвижного висения) в поле силы тяжести. Различают аэростатические (воздухоплавательные), аэродинамические (авиационные), реактивные (ракетные) и баллистические (артиллерия, космонавтика) ЛА.*

Таким образом, камень или артиллерийский снаряд — это тоже ЛА, но ЛА не авиационного, а баллистического типа. При этом камень, падающий с горы, имеет не техногенное происхождение, как и огромная каменная бомба, вылетевшая из жерла вулкана, а поэтому их нельзя причислить к огромному семейству ЛА. И, напротив, огромный пушечный снаряд, на котором герои Ж.Верна отправились на Луну, является типичным ЛА, но разумеется, не имеющим ничего общего с авиацией.

Аэродинамическая сила сопротивления, действующая на этот снаряд, не *противодействует* силе тяжести, а суммируется с ней. В авиации же сила сопротивления (у парашюта) или *подъемная сила* крыла или винта (планеры, самолеты, вертолеты и т.д.) действу-

ет, как правило, *против силы тяжести* и создается за счет *атмосферы*, характеристики которой в связи с этим тщательно изучаются. Основные характеристики атмосферы приведены в табл.4. На практике используются подробным сводом разнообразных данных об атмосфере, называемых *Международной стандартной атмосферной*, или *MSA*, а также дополнительными (отраслевыми или территориальными) *стандартами*, содержащими данные о ветрах, турбулентности, колебаниях термодинамических параметров и т.д.

Таблица 4

Основные термодинамические параметры атмосферы

Высота, км	Давление, Па=н/м <sup>2</sup>	Температура, К	Скорость звука, м/с	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Ускорение силы тяжести, м/с
-1	$1,16 \cdot 10^5$	294,7	344	1,347	9,81
0	$1,03 \cdot 10^5$	288,2	340	1,225	9,807
10	$0,27 \cdot 10^5$	223,1	299	0,414	9,776
20	$0,56 \cdot 10^4$	216,7	295	0,089	9,745
30	$0,12 \cdot 10^4$	230,4	304	0,018	9,715
50	$0,86 \cdot 10^2$	274,0	332	0,001	9,655
75	2,69	202,0	285	$4,5 \cdot 10^{-5}$	9,58
100	$3,3 \cdot 10^{-2}$	209,0	273	$5,4 \cdot 10^{-7}$	9,506

*Летно-технические характеристики (ЛТХ)* авиационных ЛА в известной степени стандартизованы (табл. 5). Они определяются в процессе *летно-доводочных испытаний* и предъявляются в комиссию *ИКАО* (Международную организацию гражданской авиации) для получения сертификата на эксплуатацию и соответствие ЛТХ *нормам летной годности (НЛГ)*. Для боевых ЛА ЛТХ называются летно-тактическими характеристиками, либо пользуются ТТХ, тактико-техническими характеристиками.

Максимальная *скорость полета* — основная ЛТХ подавляющего числа ЛА. На рис. 11 представлены данные по увеличению скорости полета самолетов серии МиГ (Микоян и Гуревич).

В числе главных проблем современного авиационного строительства ЛА следует отметить увеличение их транспортной эффективности (отношение массы транспортируемого на заданную даль-

Таблица 5

Некоторые летно-технические характеристики авиационных ЛА

ЛТХ	Тип самолета					
	ИЛ-62М (пассажирск.)	ИЛ-2 (штурмовик)	Ан-225 «Мрия»	ВМ-Т «Атлант»	Як-3 (истребитель)	Ту-204 (пассажирский)
Размеры <i>l, h, b*</i>	53,12/12,35/42,5	11,65/2,95/14,6	84/18,1/88,4	51,2/11,5/53,14	8,48/—/19,2	46/13,9/42
Взлетная масса, т	165	6,06	600	190	2,66	93,5
Грузоподъемность, т	23	0,4—0,6	до 250	44	0,4	21
Скорость крейсерская, км/ч	870	до 400	700—850	550	660	810—850
Потолок, м	—	5440	—	8000	10800	—
Дальность полета, км	11050	800	4500	1700	до 2200	2500
Радиус действия, км	—	до 400	—	—	до 1000	—
Продолжительность полета, ч	до 13	до 2	до 6	до 3	до 3	до 3
Скороподъемность, м/с	—	—	—	—	20	—
Посадочная скорость, км/ч	240	150	220	220	120	220
Допустимый боковой ветер при посадке, м/с	17	10	17	20	10	17
Дата первого полета	1970	1939	1988	1981	1943	1989
Экипаж, чел.	5	2	6	6	1	3

\* Длина, высота и размах крыла самолета, м.

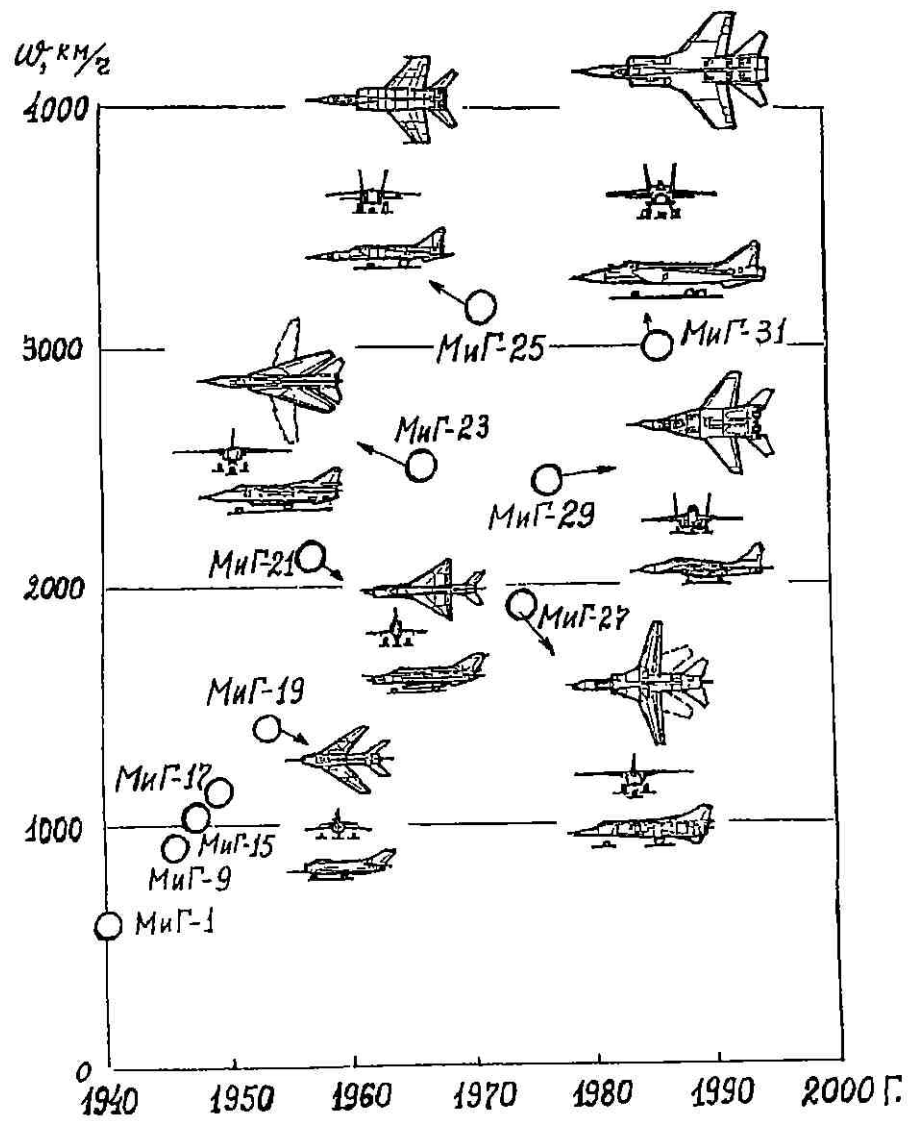


Рис 11

ность коммерческого груза к взлетной массе) и увеличение скорости полета. Первая задача решается конструктивно-схемными методами, включая и повышение термодинамических и массовых характеристик двигателей, использование композитных материалов, освоение новых сплавов и т.д. Вторая задача решается в основном теплофизическими методами, так как преодоление теплового барьера вслед за барьером звуковым требует как совершенствования методов теплофизических расчетов, так и методов и средств теплофизического эксперимента.

### 2.5. Ракета К.Э. Циолковского и космонавтика

В 1883 г. русский ученый-самоучка К.Э.Циолковский написал работу «Свободное пространство», в которой дал описание реально-го с точки зрения технических возможностей *космического корабля* с ракетным двигателем, открыв тем самым целую новую эпоху жизни человечества — эпоху устремления в космическое пространство. До К.Э.Циолковского мысли о возможности космических или ракетных полетов имели частное чисто техническое значение, не связанное с судьбой всей земной цивилизации: в 1849 г. русский военный инженер И.И. Третесский высказал идею об использовании реактивных двигателей для приведения в движение ЛА легче воздуха, в 1865 г. выходят книги французских писателей-фантастов Ж Верна «С Земли на Луну» и А.Эро «Путешествие на Венеру», в которых приводятся описания ракетных космических аппаратов, в 1866 г. опубликована книга адмирала русского флота Н.М Соковнина «Воздушный корабль», в которой приводится конструкция ракетного аэростата, в 1867 г. русскому капитану артиллерии Н.А Телешову выдан французский патент на реактивный самолет «Дельта» (рис 12) с пульсирующим ВРД, в 1880 г. русский изобретатель С.С Неждановский высказал мысль о возможности применения на ЛА ракетной топливной пары: керосин — азотная кислота, в 1881 г. приговоренный к смертной казни русский революционер и изобретатель Н.И Кибальчич выдвигает проект ЛА тяжелее воздуха с ракетным двигателем, в 1882 г. профессор Н.Е. Жуковский пишет статью «О реакции вытекающей и втекающей жидкости», ставшую основой для теоретического определения тяги реактивных и ракетных двигателей.

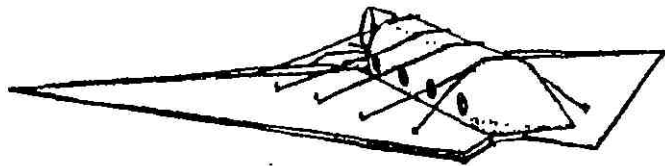


Рис. 12

Первый в мире полет ракеты с ЖРД произошел в 1926 г. Ее автор Р.Годдард (США). В Германии первая ракета с ЖРД конструкции И.Винклера взлетела в 1931 г. В России первый полет жидкостной ракеты с торидным РД конструкции М.К. Тихонравова произошел в 1933 г.

Первый в мире полет человека на ЛА с ракетным двигателем (пороховым) был выполнен в 1929 г. Ф.Штамером (Германия), а в 1939 г. был осуществлен первый полет ракетного самолета Э.Хейнкеля He-176, оборудованного ЖРД. Через восемь месяцев после этого события состоялся первый полет ракетоплана РП-318-1 конструкции С.П.Королева с включением ЖРД на высоте (летчик В.П.Федоров). Известно, что большинство аварий с ЖРД, а соответственно, и ЛА с ЖРД, случается в момент включения двигателя, поэтому полет РП-318-1 следует признать крупным достижением мирового значения. Лебединая песня советской космонавтики, чудо XX века — орбитальный корабль «Буран». Он полностью повторил все этапы полета РП-318-1: пассивный вывод на расчетную высоту, включение на этой высоте ЖРД и переход с набором скорости на большую высоту, планирующий спуск в атмосфере, горизонтальная (по-самолетному) посадка.

1942 г. ознаменовался для ракетной техники началом летных испытаний стратегического оружия массового уничтожения — ракеты «Фау-2» конструкции В.ф. Брауна. В 1945 г. после победы над Германией из архивов немецкого ракетного центра Пеенемюнде стало известно о проводившихся работах по ЖРД тягой 200 т., по трехступенчатой ракете для запуска ИСЗ, по крылатым ракетам.

4 октября 1957 г. в СССР запущен первый в мире ИСЗ, а через месяц, 3 ноября, — второй ИСЗ с животным (собакой Лайкой) на борту. Началась эра освоения космоса. 12 апреля 1961 г. полетом Ю.А. Гагарина на корабле-спутнике «Восток» началась эпоха пилотируемых космических полетов. В 1995 г. количество людей, побывавших в космосе, перевалило за 300 человек.

Сформировалась космонавтика — род человеческой деятельности, направленной на решение совокупности технических, медико-биологических, организационных и других проблем, связанных с освоением космического пространства. Космонавтика — это наука и практика освоения космоса. Для современной космонавтики первостепенное значение имеют проблемы ее технического обеспечения. В будущем же центр тяжести может переместиться на научно-прикладные, экономические, биологические, общечеловеческие (глобальные) и другие проблемы. Заметим, что в США и ряде других стран принята иная терминология — астронавтика, астронавт.

Классификационная схема ракетно-космических ЛА (РКЛА) представлена в табл. 6 (три начальных уровня). Полная классификация включает восемь уровней — вплоть до типов РКЛА. Например, беспилотные РКЛА (IV уровень) включают ракеты, мины, снаряды, космические аппараты военного, гражданского или экспериментального назначения. Ракеты — это РКЛА, перемещающиеся под действием собственной тяги. Мины перемещаются под действием усилий, создаваемых давлением газов от бортового источника в стволе или шахте. Шахтный старт относится именно к такому случаю, но основная роль современных шахт — защитная, а не динамическая, поэтому термин «мина» для таких ракет не применяется. Снаряды (V уровень) получают импульс от внешних средств: орудийный ствол, катапульта, пневматический, электродинамический, гидравлический ускоритель и т.д. Очевидно, что РКЛА с солнечным парусом — это снаряд, так как динамическое усилие он получает извне, от солнечного излучения. Космический аппарат (ИСЗ, ИСЛ, Луноход и т.д.) отделяется от носителя или функционирует при неработающем носителе и выполняет задачи в автоматическом режиме или с помощью дистанционного управления у планет, у астероидов, на планетах, в дальнем космосе и т.д. На рис.13 представлен

Таблица 6

Классификация РКЛА

I уровень	Ракетно-космические летательные аппараты					
	беспилотные			пилотируемые		
II уровень						
III уровень	военные	гражданские	экспериментальные	военные	гражданские	экспериментальные

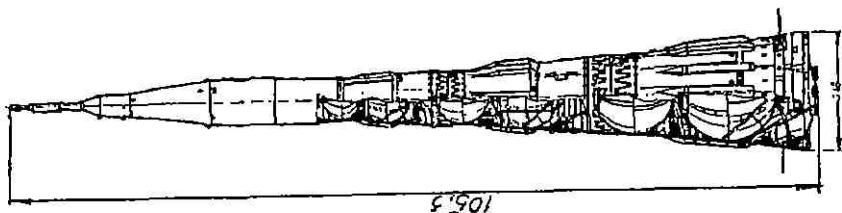
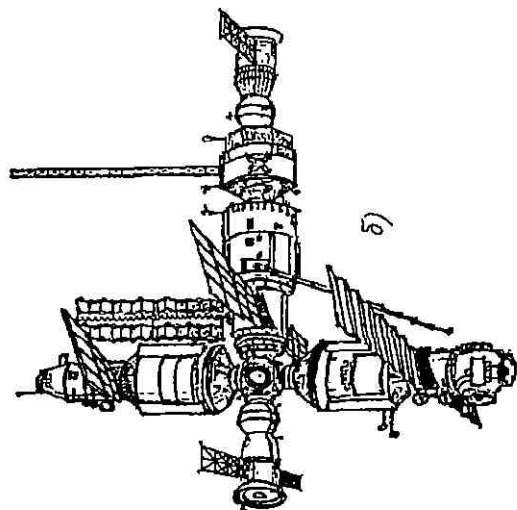
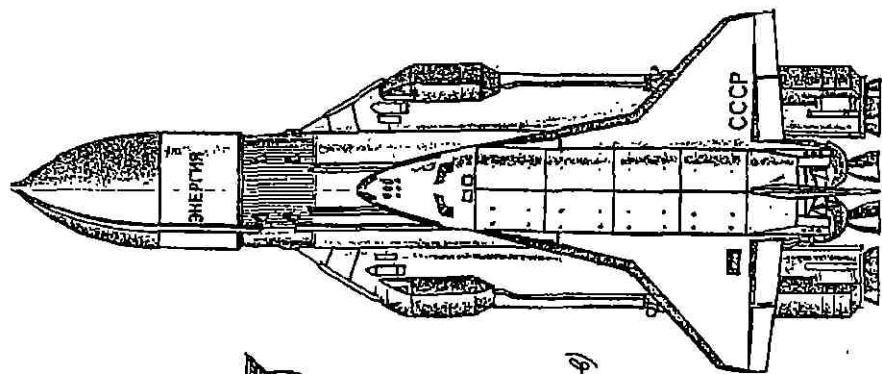


Рис. 13

общий вид РН Н-1 (а), долговременной орбитальной станции «Мир», и РН «Энергия» с орбитальным кораблем «Буран» (г).

Пилотируемые РКЛА, как правило, называются *космическими кораблями (КК)*, если с помощью РН взлетают с Земли и функционируют в космосе («Восток», «Восход», «Союз» и т.д.) или *орбитальными кораблями («Буран»)*, если не только взлетают с Земли и функционируют на орбите планеты, но и целиком возвращаются на ее поверхность (у КК для этой цели используются герметичные *спускаемые аппараты (СА)*).

Пилотируемые РКЛА Земля-Земля еще только создаются. Ракетный вариант — демонстратор системы США «Дельта Клиппер» — изображен на рис.14. Кроме этого разрабатывается система с горизонтальным взлетом и горизонтальной посадкой, рассматриваются и гибридные варианты, например, с вертикальным взлетом-горизонтальной посадкой, как это предусмотрено для ОК «Буран».

Пилотируемые РКЛА космос-космос — это целая гамма аппаратов, начиная от небольших ручных реактивных «пистолетов», служащих для перемещения космонавтов вблизи космических объектов, и вплоть до огромных межзвездных кораблей будущего.

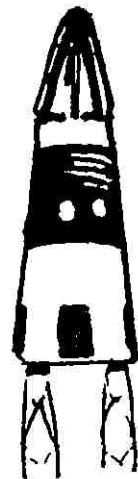


Рис. 14

## 2.6. Комбинированные ЛА

Теория комбинированных ЛА пока не создана, так как в основном они разрабатываются по инициативе изобретателей. Тем не менее, проблема сочетания свойств разнородных ЛА (воздухоплавательные, авиационные, ракетно-космические) для получения положительного суммарного эффекта интересна, хоть и сложна. Комбинированный ЛА может унаследовать от своих «родителей» как отрицательные, так и положительные качества, причем отрицательные качества, к сожалению, более устойчивы и живучи, как впрочем, это наблюдается и в селекции новых гибридных видов растений. Однако комплексные (комбайновые) характеристики, или «эффект Окуджавы» (поэт, композитор, вокальный исполнитель и аккомпаниатор в одном лице) настолько привлекательны, что комбинированные ЛА

не сходят со сцены технического прогресса и неизменно являются «гвоздем программы» любого авиационного праздника, аэрокосмического салона или выставки.

По-видимому, первая публичная демонстрация гибридного ЛА (ГЛА) произошла в 1808 г. в Вене, когда изобретатель Я. Деген поднялся в воздух с помощью махолета (орнитоптер), соединенного с водородным баллоном (аэростат). В 1847 г. в Брюсселе другой изобретатель Ван Гекк продемонстрировал полет вертолета-аэростата.

Гибриды могут быть и в одном классе ЛА, например, авиационных. Автожир сочетает свойства вертолета и самолета. На рис. 15 показан один из первых отечественных экспериментальных автожиров «ЦАГИ А-4», конструкции Н.К. Скржинского. Как правило, любой самолет сочетает в себе и свойства планера, то есть может совершить посадку без работающих двигателей. Свойства вертолета — вертикальный взлет и посадка, но в сочетании с высокой скоростью горизонтального полета (у вертолета эта скорость ограничена величиной 250 км/ч из-за неодинаковости обтекания лопастей, движущихся навстречу потоку и в обратном направлении) характерны для самолетов вертикального взлета и посадки (ВВП). К их числу относятся получившие распространение палубные самолеты ВВП «Харрпер» (Великобритания) рис. 16.

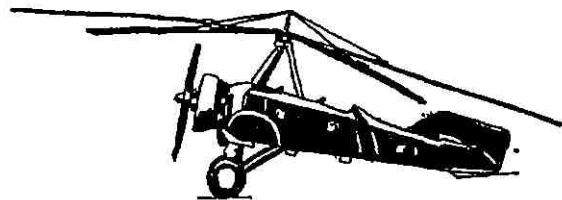


Рис. 15

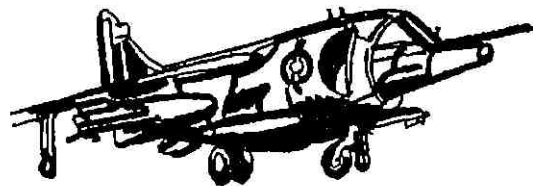


Рис. 16

Одно из первых сочетаний самолета и ракеты было выполнено в 1944 г. в Германии В.ф. Брауном. Крылья, установленные на ракету «Фау-2», хоть и подняли стартовую массу аппарата с 12493 кг до 19020 кг, то есть на 52%, но зато позволили при неизменных длине 14,02 м, диаметре 1,7 м, тяге двигателя 25 тс, продолжительности его работы 63 с и удельной тяге 203 с увеличить дальность полета с 355 км до 650 км или на 83%, то есть почти в два раза. Ранее уже говорилось о надувных самолетах и планерах, которые наряду с высокой скоростью полета используют аэростатическую подъемную силу, о сочетании вертолетов и аэростатов (вертостатах), об использовании аэростатической силы в ракетной технике и т.д.

Таким образом, только двойных сочетаний свойств у ГЛА может быть (принимая во внимание лишь третий уровень классификации, то есть 10 ЛА для авиации, 10 ЛА для воздухоплавания и 6 для ракетно-космической техники, то есть всего 26) огромное количество

$$N = \frac{n}{2} (n - 1) = \frac{26}{2} (26 - 1) = 325,$$

практически не поддающееся классификационному анализу. А ведь есть ЛА как, например, ОК «Буран», сочетающие не два, а три и более признаков!

В заключение следует коротко рассказать об *амфибиях*, то есть аппаратах, способных передвигаться в разных средах (в космосе, в атмосфере, на поверхности воды, под водой, на твердом грунте и под землей).

Первый в мире успешный взлет с воды на гидросамолете был совершен А. Фабером в 1910 г. Первые экранолеты, то есть гибриды самолетов и кораблей на воздушной подушке, использующих экранный эффект (увеличение подъемной силы вблизи экрана, то есть водной или земной поверхности), были построены в 1935 г. В.И. Левковым (СССР) и Т. Карно (Финляндия). На рис. 17 показан самолет-амфибия PS-1 (Япония). В США проводятся натурные эксперименты с ныряющими под воду самолетами (гибрид самолета и подводной лодки). Самая обычная

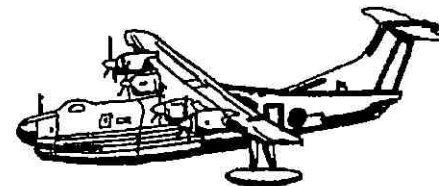


Рис. 17



фугасная авиационная бомба может проникнуть глубоко под землю и совершить там маневр, иногда заканчивающийся тем, что она снова выныривает из-под земли. Этот же принцип заложен в конструкцию специальных исследовательских ЛА, *пенетраторов*, сбрасываемых с самолетов или с КА (скорость до 1000 м/с), внедряющихся в грунт с исследовательскими целями. К амфибиям также относятся стартующие из-под воды ракеты и торпеды, сбрасываемые с самолетов в воду.

### 3. ЭНЕРГЕТИКА И ДВИГАТЕЛИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

#### 3.1. Энергетическое обеспечение ЛА

Любая *машина* или *орудие* требуют энергетического обеспечения: у часов это батарейка или пружина, у молотка — мускульная сила человека, а у ЛА — *энергосистема*. Основное назначение энергосистемы ЛА — создание тягового усилия, управление полетом и обеспечение энергией всех бортовых устройств.

Тяговое усилие создается *двигателем*, преобразующим различные виды энергии в силу тяги, (лопасти воздушного винта самолета или несущего винта вертолета, реактивное сопло, машущие поверхности, солнечный парус, аэростатическая емкость, заполненная газом легче воздуха и т.д.).

Наибольшее распространение получили *воздушные винты*, отбрасывающие окружающий воздух со скоростью, превышающей скорость полета, и *реактивные сопла*. Зависимость относительной тяги воздушных винтов  $R/N_B$ , Н/кВт от коэффициента мощности  $N_B/D_B^2$ , кВт/м<sup>2</sup>, где  $D_B$  — диаметр воздушного винта, приведена на рис.18 (1 — открытые винты: а — вертолетов, б — ТВД, в — винто-вентиляторы; 2 — вентиляторы ТРДД).

Реактивное сопло и у авиационных, и у ракетно-космических ЛА входит в состав *двигателя* и отдельно как движитель не рассматривается. В качестве движителя у аппаратов с *реактивными* или *ракетными двигателями* могут рассматриваться *тяговые элементы* взаимодействующие с реактивной струей (струями). Такими элементами могут быть: донный срез ракеты, *эжекторный увеличитель*

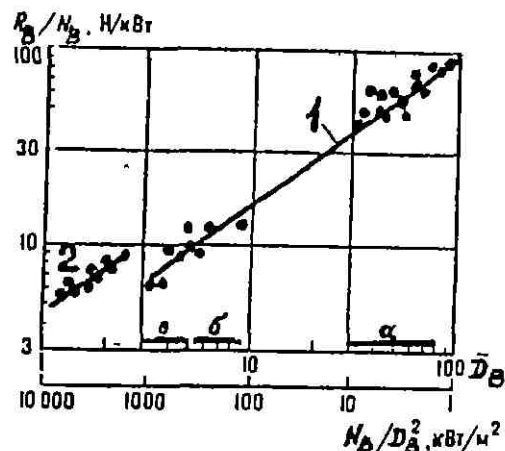


Рис 18

*тяги*, элементы, реализующие эффект «прилипания» струи к твердой криволинейной поверхности (эффект Коанда) и др. Анри Коанда (1886-1972) — румынский ученый и изобретатель, открывший в 1910 г. эффект прилипания струи к твердой поверхности, широко используемый в механизации крыла и в управлении вектором реактивной тяги на самолетах укороченного взлета.

Основной энергетической установкой любого ЛА является двигатель. Классификация двигателей приведена в табл.7

#### 3.2. Источники энергии для двигателей

Энергия может аккумулироваться на борту ЛА или извлекаться из окружающей среды. К наиболее распространенным бортовым источникам энергии относятся различные пружины (толкатели, вращатели и т.д.), резиновые нити, маховики, сжатые газы, тепловые аккумуляторы и химические топливные компоненты (табл.8). Из табл.8 понятно, почему в настоящее время большое распространение получили химические источники энергии.

Существует множество проектов использования изотопных, ядерных и даже термоядерных источников энергии, но все они из-за экологических соображений ограничены по своим эксплуатационным возможностям.

Таблица 7

## Классификация двигателей летательных аппаратов

I уровень	Двигатели ЛА					
II уровень	тепловые			нетепловые		
III уровень	поршневые	реактивные	ракетные	реактивные	полевые	вытеснительные
IV уровень	Паропоршневые	ПВРД ПуВРД	ЖРД ГРД	Квантовые Радиационные	Электро- статические	Аэростатические Газобаллонные
	Газопоршневые с внутренним нагревом	ТРД	РДТТ	Электрореактивные	Магнито- статические	Реактивно- баллонные
	Газопоршневые с внешним нагревом	Вихревые	Газобаллонные нагреваемые	Электромагнитные	Гравистатические Светостатические	Механические Пневмостатические (воздушная подушка)
	Снарядометательные Минометательные	Газореактивные	Жидкобаллонные нагреваемые	Механические	Аэростатические	

Бортовые источники электроэнергии могут зависеть от работы основных (тяговых) двигателей и даже входить в их состав, а могут быть и независимыми (табл.9). Из таких независимых источников наиболее распространен на РКЛА топливный элемент. На других типах ЛА применяются все виды перечисленных в табл. 9 аккумуляторов.

*Внешние источники энергии* в околоземном пространстве возглавляет, естественно, атмосферный кислород в нижних (до высоты 30 км) слоях атмосферы и лучистая энергия Солнца. Для определе-

Таблица 8

## Удельная энергия бортовых аккумуляторов энергии

Аккумулятор	Рабочая температура, °С	Удельная энергия рабочего элемента, Дж/кг	Удельная энергия аккумулятора, Дж/кг
Стальная пружина	0—30	503—840	167—250
Резиновые нити	20—35	4187—8374	2920—5850
Маховик	- 40 ... + 100	$2 \cdot 10^5$ — $10^7$	$10^3$ — $2 \cdot 10^4$
Воздух сжатый до $2,5 \cdot 10^7$ Па в баллоне из армированного стекловолокна	27	$8 \cdot 10^5$	$10^5$
Водород, сжатый до $2,5 \cdot 10^7$ Па в баллоне	1000	$10^7$	$10^6$
Тепловой аккумулятор на LiH	- 188		$2 \cdot 10^6$
Жидкий кислород и углеводородное горючее	- 30 ... + 50	$10^7$	$8 \cdot 10^6$
Самые энергоемкие химические компоненты (Li + F и Be + O <sub>2</sub> )	- 50 ... + 50	$2,5 \cdot 10^7$	$10^7$

Таблица 9

## Характеристика электрических аккумуляторов

Аккумулятор	Удельная энергия, теоретическая, Дж/кг	Удельная энергия практическая, Дж/кг	Количество циклов зарядки
Кадмиево-никелевый	220	30	8000
Серебряно-цинковый	523	90	150
Серебряно-кадмиевый	295	60	1000
Никелево-водородный	300	60	2000
Водородно-кислородный (топливный элемент)	3360	650	30

ния эффективности авиационного химического бортового аккумулятора, учитывая, что кислород на борту не запасается, а черпается из атмосферы, следует данные табл.8 умножить для углеводородного горючего на 3,5.

**Солнечная энергия** на космических аппаратах используется практически с первых шагов космонавтики (1-й американский и 3-й советский ИСЗ), то есть с 1958 г. В космосе на орбите Земли на  $1 \text{ м}^2$  поверхности, расположенной перпендикулярно к солнечным лучам, поступает энергия  $1,4 \text{ кВт/м}^2$ . В атмосфере Земли эта энергия постепенно ослабляется за счет *рассеяния и поглощения* и на ее поверхности составляет всего лишь  $1 \text{ кВт/м}^2$ .

Характеристики других видов внешней энергии в околоземном пространстве приведены на рис. 19.

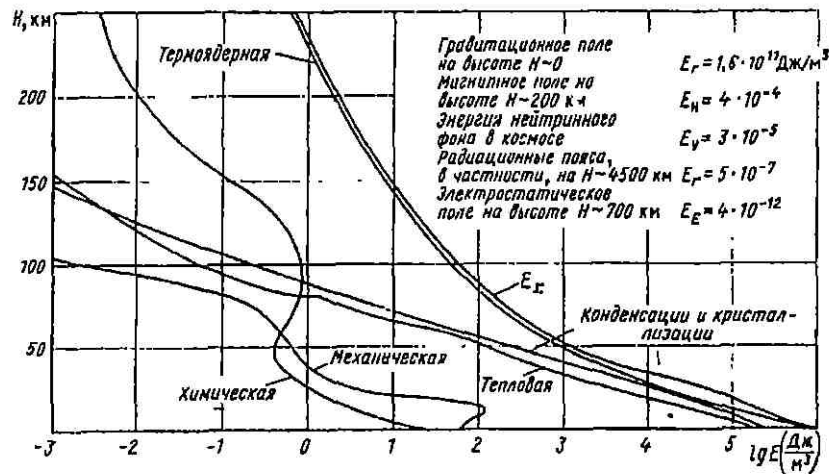


Рис. 19

Используемые энергоресурсы оказывают решающее влияние на облик, конструкцию и характеристики двигателей ЛА.

### 3.3. Паровые двигатели

Как известно, первые в мире самолеты, например самолет А.Ф. Можайского, были оснащены паровыми двигателями, то есть двига-

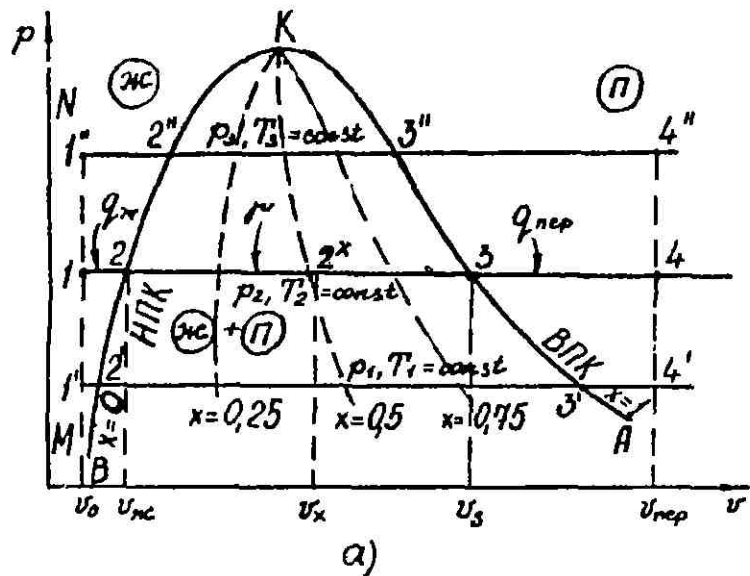
телями *внешнего сгорания* или в более общем случае — *внешнего подвода тепла* к ТРТ.

Как это ни странно, но спустя более 100 лет, паровые двигатели снова стали рассматриваться в качестве перспективных для ЛА самого разного назначения. *Диаграммы состояния* ТРТ ( $pV$  и  $Ts$ ) вблизи критической или тройной точки К, характеризующейся тем, что в ней жидкое, парожидкое и парообразное состояние вещества неотличимы, приведена на рис. 20, а и б

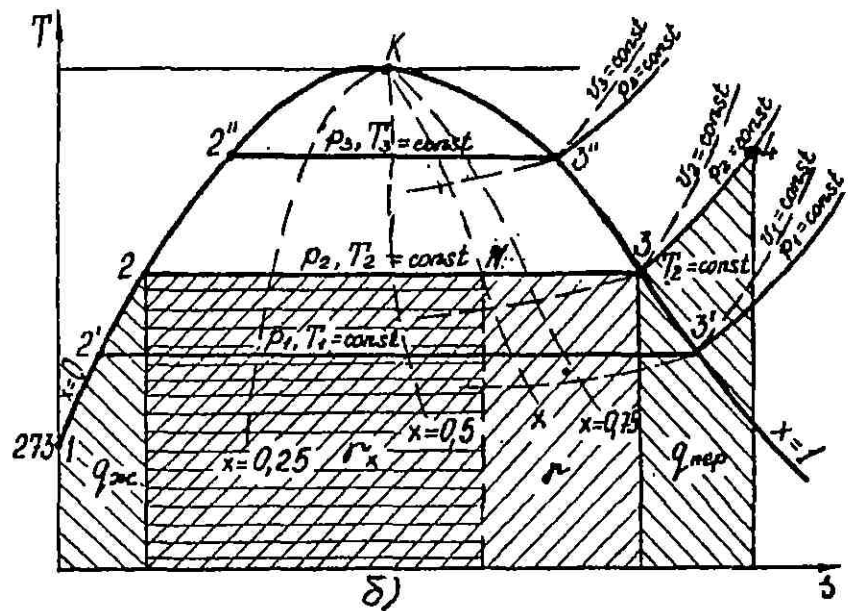
Изотермы, или линии постоянных температур, имеют характерные изломы на *линии насыщения* НПК (линии начала кипения) и на линии конца кипения ВПК. В промежутке между этими линиями, называемыми *нижней и верхней пограничными кривыми* НПК и ВПК, изотермы и изобары (линии постоянных давлений) совпадают, так как при квазиравновесном кипении при постоянном давлении температура остается постоянной как у жидкости, так и у пара. Пар в этом случае называется *влажным насыщенным*, то есть содержит мелкие капли жидкости. Под влагой обычно понимают только воду, но здесь термин «влажный» имеет более широкое значение, так как относится ко всем кипящим жидкостям.

На практике нагрев жидкости, как и охлаждение пара, происходит не бесконечно медленно-квазистатически, а в реальное, то есть конечное время. В этом случае наблюдается *перегрев жидкости*, сопровождаемый *отставанием начала испарения* от НПК, а также *переохлаждение пара*, сопровождающееся отставанием *начала конденсации* от ВПК. Существуют, однако, характерные для каждой жидкости *линии предельных перегревов* и *линии предельных переохлаждений* для паров (на диаграммах не показаны). При этом ВПК для ряда жидкостей, например этилового эфира, могут проходить почти вертикально или даже с отрицательным наклоном. Вот почему этиловый эфир оказался подходящим веществом для создания *камеры Вильсона*, позволяющей в переохлажденном паре наблюдать *треки элементарных частиц* — следы мгновенной конденсации пара в местах, возмущенных движением этих частиц. *Пузырьковые* (водородные) *камеры* служат для тех же целей, но используют эффект мгновенного испарения перегретой жидкости.

Существуют также жидкости, например нефть, у которой НПК и ВПК вообще не наблюдаются, а точнее, сильно размыты из-за того, что они не совпадают для различных *фракций* нефти (бензин, легроин, керосин и т.д.).



a)



б)

Рис. 20

Вода в этом отношении является классической жидкостью. Для нее критические значения равны:  $p_{кр} = 221,3 \cdot 10^5$  Па,  $T_{кр} = 647,3$  К,  $V_{кр} = 0,0032$  м<sup>3</sup>/кг.

Критическим коэффициентом называется выражение

$$N = \frac{R T_{кр}}{p_{кр} V_{кр}}$$

являющееся критерием термодинамического подобия веществ. Для воды  $N_{H_2O} = 4,22$  для большинства газов:  $N_{H_2} = 3,35$ ,  $N_{Cl} = 3,35$ ,  $N_{O_2} = 3,34$ , то есть водород, гелий и кислород можно считать веществами термодинамическими подобными.

Паровой двигатель — устройство, использующее все фазы вещества, изображенные на диаграмме рис. 20, а и б. Схема парового двигателя приведена на рис. 21, а, а pV — диаграмма замкнутого термодинамического цикла его работы — на рис. 21, б.

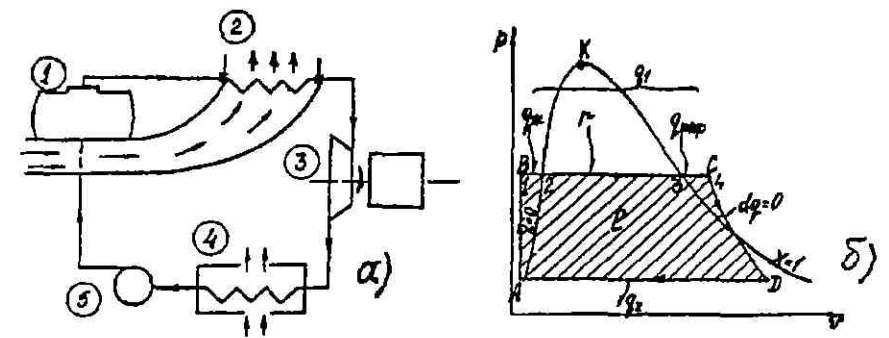


Рис. 21

Процесс нагрева жидкости BC, то есть процесс подвода к ней тепла, происходит при постоянном давлении и называется *изобарическим*, или *изобарным*. Процесс этот реализуется в *котле* 1 и *пароперегревателе* 2. Подведенное тепло как бы состоит из трех частей

$$q = q_{ж} + r + q_{пер}, \text{ Дж,}$$

где  $q_{ж}$  — тепло, необходимое для нагрева жидкости до температуры кипения;  $r$  — теплота испарения жидкости (тепло и теплота — понятия эквивалентные и применяются согласно установившейся терминологии);  $q_{пер}$  — теплота перегрева пара, Дж.

Процесс СД — рабочий. Перегретый пар высокого давления поступает на турбину 3 или в поршневую машину, превращающую потенциальную энергию пара в механическую работу. Процесс расширения СД идет, как правило, без подвода или отвода тепла и тогда он называется *адиабатическим*, или *адиабатным*, а замкнутый паровой цикл — *циклом Ренкина*, но могут быть и другие варианты. Конденсация пара ДА происходит в конденсаторе 4, а нагнетание жидкости в котел АВ осуществляет насос 5.

В частности, возможен ступенчатый процесс, в котором процессы расширения в ступенях турбины могут чередоваться с процессами дополнительного перегрева пара, а получившаяся «лесенка» приблизится к более выгодной кривой для расширения — изотерме. Площадь над кривой процесса эквивалентна произведенной паром работе и под изотермой эта площадь выше. В энергоустановках ЛА, особенно космических, процесс конденсации организовать чрезвычайно трудно. Применяются большие по площади и громоздкие холодильники-излучатели, поскольку тепло возможно отвести от ТРТ только с помощью его излучения в космическое пространство.

### 3.4. Поршневые двигатели внутреннего сгорания

Термодинамические циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания называются *газовыми*, поскольку ни в одном из термодинамических процессов, составляющих эти циклы, не присутствует конденсированная фаза ТРТ. Кроме того, эти циклы называются *прямыми*, поскольку позволяют получить механическую работу, в отличие от *обратных* циклов орудий (компрессор, например), требующих подвода механической работы извне.

Наконец, название циклу дает процесс, при котором подводится тепло (изобарный, изохорный или смешанный цикл).

Основными элементами поршневого двигателя являются (рис.22, а) цилиндр 1, поршень 2, шатун 3, прикрепленный к поршню с помощью поршневого пальца 4 и соединенный с кривошипом 5 коленчатого вала 6.

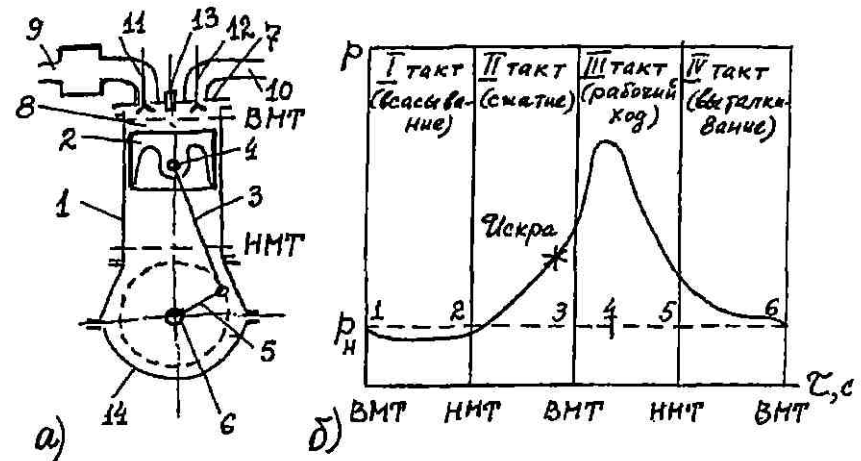


Рис 22

Верхняя крышка 7 цилиндра, внутренние стенки цилиндра и верхняя поверхность поршня образуют в верхней мертвой точке (ВМТ) поршня камеру сгорания 8, периодически сообщающуюся с впускным 9 и выпускным 10 коллекторами при помощи впускного 11 и выпускного 12 клапанов. Если вспышка топлива производится от постороннего источника, то этот источник, например электрическая свеча 13 зажигания, также располагается в камере сгорания. Все детали двигателя монтируются на его картере 14.

Индикаторная диаграмма поршневого двигателя с помощью датчика давления, расположенного в камере сгорания, регистрирует изменение давления в зависимости от положения поршня, то есть в зависимости от геометрического объема надпоршневого пространства или времени (рис. 22,б). Для четырехтактных поршневых двигателей характерны такт всасывания 1-2, такт сжатия 2-3, заканчивающийся процессом сгорания 3-4, захватывающим и часть такта расширения 4-5 и, наконец, такт выхлопа-выталкивания (5-6).

Для термодинамического анализа реальную индикаторную диаграмму представляют в идеальном виде: убирают такты всасывания и выталкивания, в качестве ТРТ рассматривают идеальный газ, процесс сгорания заменяют условным процессом подвода тепла, строят идеальный термодинамический цикл только из простейших политропных ( $pV^n = \text{const}$ ) процессов: изохорного ( $V = \text{const}$ ), изобарного ( $p = \text{const}$ ), изотермного ( $T = pV = \text{const}$ ) и адиабатного ( $pV^k = \text{const}$ ,

где  $k = C_p / C_v$  — отношение теплоемкости ТРТ при постоянном давлении к его же теплоемкости при постоянном объеме).

Двигатели легкого топлива (бензиновые) работают по изохорному циклу (циклу Отто) рис.23, а. Двигатели тяжелого топлива (дизельные) работают по изобарному циклу (циклу Дизеля) рис.23, б. Быстроходные двигатели работают по смешанному циклу. У них часть теплоты подводится при постоянном объеме, а часть — при постоянном давлении рис.23, в.

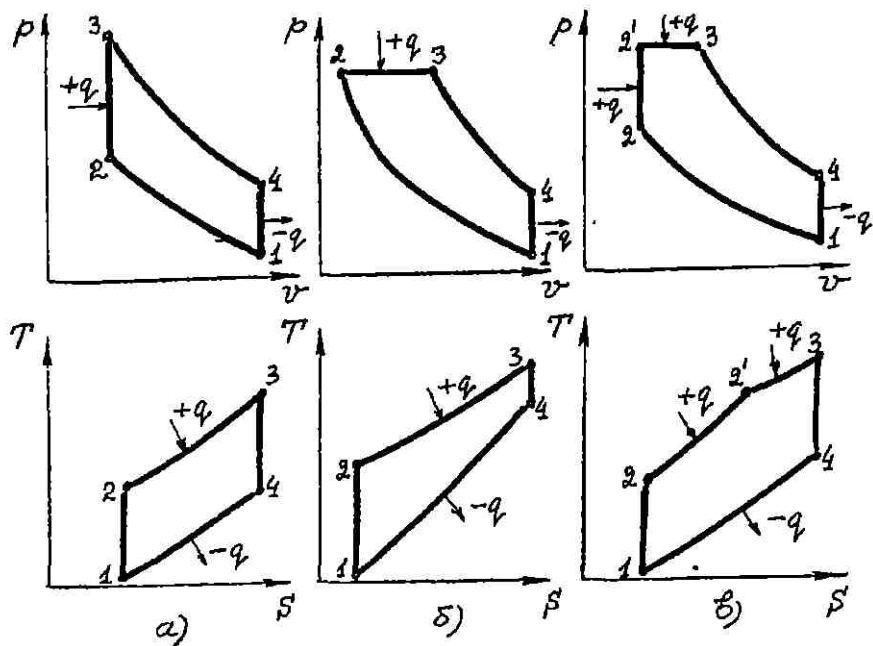


Рис. 23

Авиационные поршневые двигатели делают многоцилиндровыми воздушного АИ-14р (рис.24, а) или водяного (рис.24, б) охлаждения (АМ-34).

В последнее время пристальное внимание инженеров привлекает поршневой двигатель Стирлинга и ему подобные, реализующие теоретический коэффициент полезного действия (КПД), численно равный КПД цикла Карно, состоящего из двух изотерм и двух адиабат:

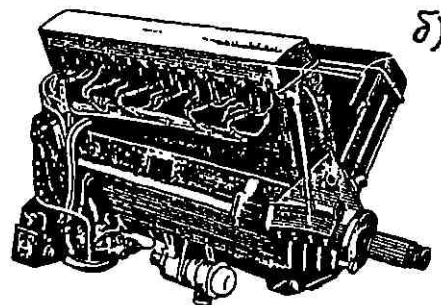
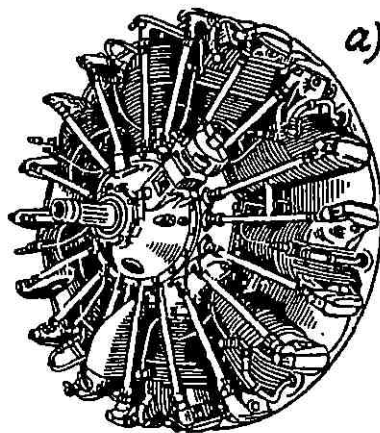


Рис. 24

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_3}$$

Но двигатель с циклом Карно неосуществим из-за малой работы цикла (мала площадь, ограниченная кривой цикла), соизмеримой с механическими потерями. Таким образом, очевидно, что любой двигатель не только должен иметь высокий КПД, но, прежде всего, должен быть работоспособным. Двигатель Стирлинга работоспособен. Более того, его термический КПД равен КПД цикла Карно.

### 3.5. Воздушно-реактивные двигатели

Двигатели, использующие реакцию втекающего и истекающего окружающего газа, называются реактивными. Этот же окружающий газ может применяться и как основное ТРТ при организации термодинамических процессов в таком двигателе, как источник энергии (окислитель). Реактивный двигатель, использующий атмосферу Земли, называется воздушно-реактивным двигателем (ВРД).

Надутый воздухом детский воздушный шарик представляет собой простейшую модель ВРД и даже ЛА с ВРД, поскольку летает

под действием силы реакции  $R_a$  истекающего воздуха или силы тяги

$$R_a = m_a w_a, \text{ Н},$$

где  $m_a$  — секундный расход массы воздуха через *реактивное сопло*, кг/с, а  $w_a$  — скорость его истечения, м/с.

Другой пример, который воспроизвести будет не так просто: оставим тот же воздушный шарик своеобразным *энергетическим источником* — сжатой пружиной, которая смогла бы очень быстро растянуть его, увеличив объем и была бы достаточно легкой. Шарик снова полетит, но теперь уже не за счет реакции истекающего воздуха, а за счет реакции воздуха, *втекающего* в шарик:

$$R_b = m_b w_b, \text{ Н},$$

где  $m_b$  — секундный расход, кг/с, а  $w_b$  — скорость втекающей массы, м/с.

Работающий *на стенде*, то есть неподвижный ВРД, использует для создания тяги и ту и другую реакции; главное суметь эффективно организовать термодинамический процесс работы такого ВРД. При полете ВРД со скоростью  $w_n$  в составе ЛА реакция захватываемого (а не всасываемого) воздуха будет отрицательной, то есть превратиться в сопротивление движению.

$$R_x = \dot{m}_n w_n, \text{ Н},$$

поскольку воздух, попавший в двигатель, был неподвижен, а налетевший на него ВРД этот воздух ускорил до собственной скорости  $w_n$ . Правильнее было бы учитывать и скорость всасывания

$$R_x = -m_n (w_n - w_b), \text{ Н},$$

но этого на практике не делается из-за ее малости

$$w_n \gg w_b.$$

Существо процесса функционирования ВРД заключается в получении возможно более высокой скорости истечения  $w_a$ , поскольку именно она определяет результирующую реактивную тягу:

$$R = R_a - R_x = \dot{m}_a w_a - \dot{m}_n w_n \approx \dot{m}_n (w_a - w_n), \text{ Н}.$$

Расход истекающей массы  $m_a$  больше  $m_n$  на величину расхода горючего, поданного в двигатель, но это превышение невелико, что и дает нам право полагать

$$\dot{m}_a \approx \dot{m}_n.$$

Сказанное позволяет понять, почему в случае применения ВРД не говорят о движителях, ибо движителем является сам ВРД. Более того, поршневой двигатель с гребным воздушным винтом — это тоже своеобразный ВРД, его частный случай, как, впрочем, и паровой двигатель с тем же воздушным винтом. Морские паруса, приводящие в движение суда и некоторые типы аэростатов — это тоже ВРД, как и парашюты и крыло самолета. Но парашют создает *тормозную силу*, а крыло — *подъемную*, уравнивающую вес самолета. Естественно, что обе эти силы — реактивные, то есть действующие на парашют и крыло *реакции* заторможенного, разогнанного или отклоненного в нужную сторону воздуха. А может ли крыло создавать и подъемную и толкающую силу? Конечно! Лучше всего это удастся при сверхзвуковом полете (рис. 25), но возможно и на дозвуке, когда с помощью выбора геометрии или небольшого щитка, т. е. *интерцептора*, создается *срывная область* 4, в которую либо вдувают газ, либо подают горючее 3 и организуют (это также задача теплофизиков) его сгорание. Скачки уплотнения (2), возникающие на передней кромке крыла (1) на сверхзвуке существенно улучшают эффективность процесса. На задней кромке возникает избыточное давление и создается тем самым реактивная толкающая крыло вперед сила тяги.

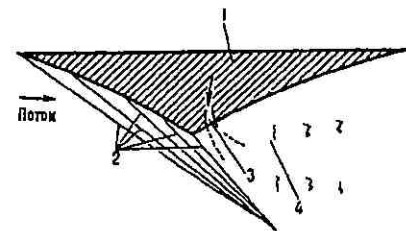


Рис 25

Классификации ВРД сложны и многообразны, однако наибольшей популярностью пользуются разделение двигателей *по принципу их действия*: прямоточный, пульсирующий, турбореактивный, турбопоршневой, эжекторно-поршневой и т.д. Другие классификации используют *высотно-скоростные диапазоны* оптимальной

применимости ВРД, третьи — их экономические характеристики и т.д.

Основоположником термодинамической теории ВРД является наш соотечественник, академик Б.С. Стечкин (1891-1969), опубликовавший в 1929 г. в журнале «Техника воздушного флота» свою классическую работу «Теория воздушно-реактивного двигателя».

Рассмотрим особенности работы наиболее распространенных типов ВРД.

**Прямоточный ВРД**, или ПВРД — это собирательное название целого ряда двигателей, не имеющих механически-движущихся частей и работающих по *изобарному термодинамическому циклу полного расширения* (рис.26). К их числу относятся: дозвуковые ПВРД (скорость полета 0,6...0,9 М, где М — отношение скорости полета к скорости звука), сверхзвуковые ПВРД или СПВРД (0,9...5 М), гиперзвуковые ПВРД или ГПВРД с дозвуковым горением (5...7 М) и со *сверхзвуковым горением* (скорость потока больше местной скорости звука) в камере сгорания или на внешней поверхности ЛА (7...12 М), с детонационным горением или горением на детонационной волне (12...20 М), супергиперзвуковые ПВРД или СППВРД, предназначенные для полетов в верхних слоях атмосферы (скорость полета 28 М или до 8000 м/с), в межпланетном пространстве (скорость до  $10^5$  м/с) и в межзвездном пространстве (скорость до  $3 \cdot 10^8$  м/с).

Естественно, что обычные химические источники энергии для СППВРД не годятся, а требуется применение *ядерной, термоядерной или аннигиляционной энергии*, а также особых массозаборных устройств, способных «всасывать» в двигатель очень разреженную «межзвездную пыль» с огромных пространств. Классификация реактивных двигателей и области их применения приведены на рис.27.

Принцип работы СПВРД ясен из рис.26. Набегающий поток воздуха предварительно *тормозится* в системе косых скачков уплотнения, формируемых иглой массозаборника 1. При этом скорость воздуха снижается, а давление возрастает. Затем воздух далее тормозится в дозвуковой части массозаборника и проходит через выравнивающую поток решетку или хонейкомб и попадает на стабилизаторы горения 4, расположенные уже в камере сгорания 2. Топливо распыливается с помощью форсунок 3 и поджигается электрической свечой. Поддержание пламени происходит за счет возвратной циркуляции горячих газов за плохообтекаемыми стабилизаторами.

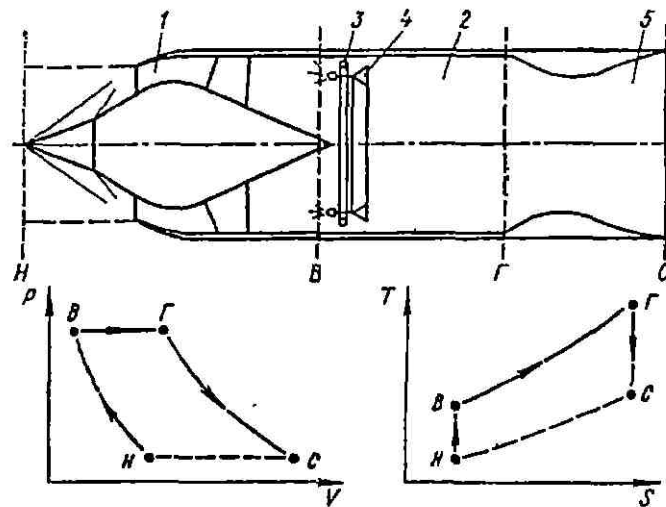


Рис. 26

Горячие газы снова и снова поджигают топливно-воздушную смесь. Камера сгорания — это одно из сложнейших устройств. *Тепловое и гидравлическое сопротивления* в ней должны быть минимальны, а полнота сгорания — максимальная при весьма ограниченных продольных размерах, иначе возрастает масса двигателя. Но самое трудное — обеспечить заданный ресурс работы особенно для многоразовых двигателей. После камеры сгорания горячий газ поступает в сверхзвуковое *сопло Лавала* 5, обеспечивая скорость истечения, превышающую скорость захвата воздуха и создавая тем самым реактивную тягу.

**Пульсирующий ВРД** или ПуВРД (рис.28, а) работает по *циклу Лемуара* (рис.28, б). В отличие от ПВРД, который не может развивать тягу при нулевой скорости полета и требует разгона посторонними источниками тяги, Пу ВРД устойчиво работает в *стендовых условиях*. Сжатый в массозаборнике 2 воздух 1 проходит через *клатанную решетку* 3 и вместе с горючим поступает в камеру сгорания 6, где быстро (по *изохоре*) сгорает после воспламенения от свечи 5, повышая при этом давление в камере сгорания, запирающее решетку 3. Истекая через сопло 7 и удлиненный *резонансный канал* 8, горячий воздух в силу инерции истечения понижает давление в ка-



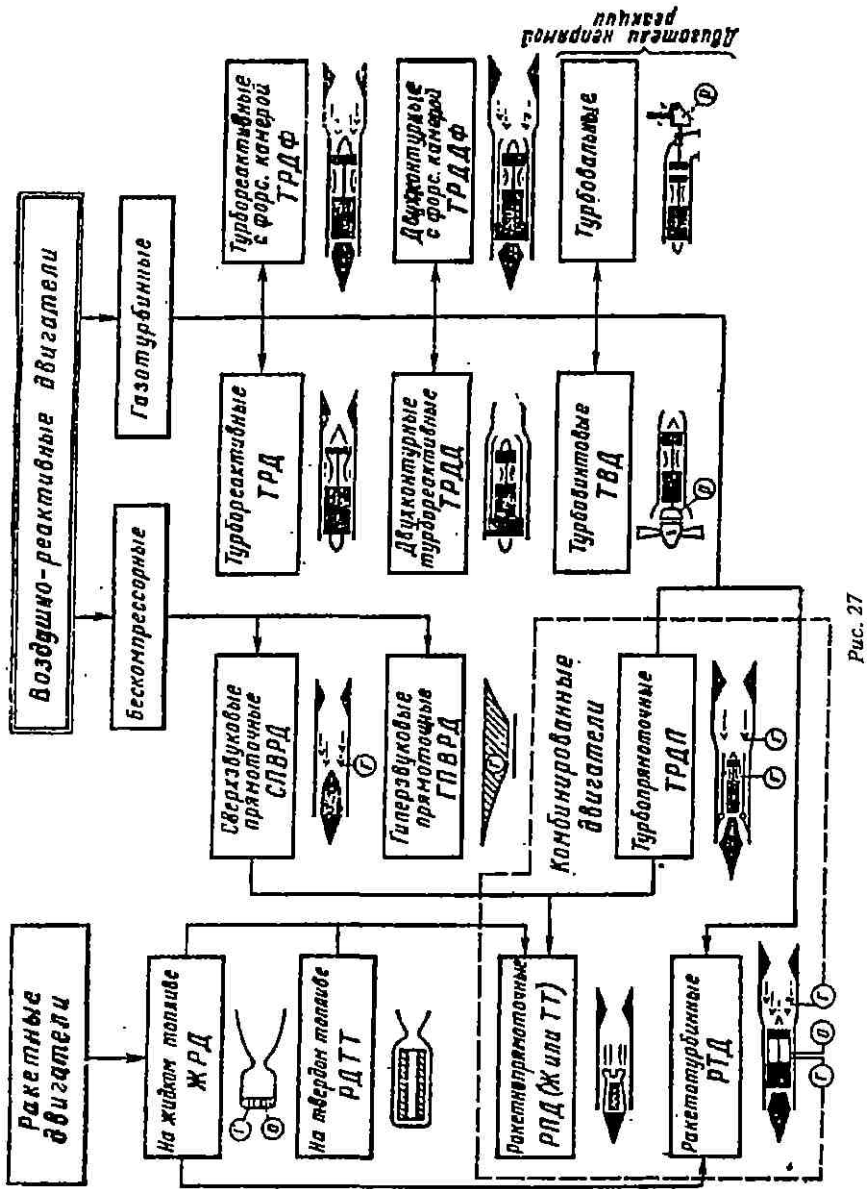


Рис. 27

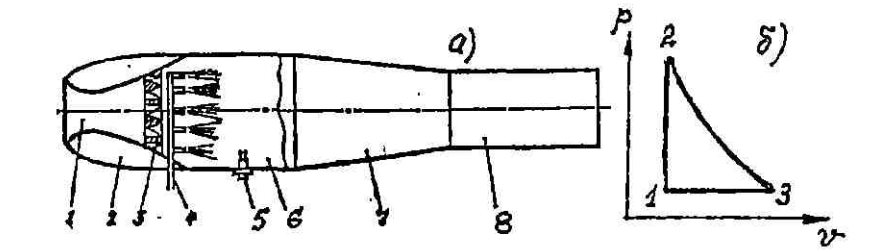


Рис. 28

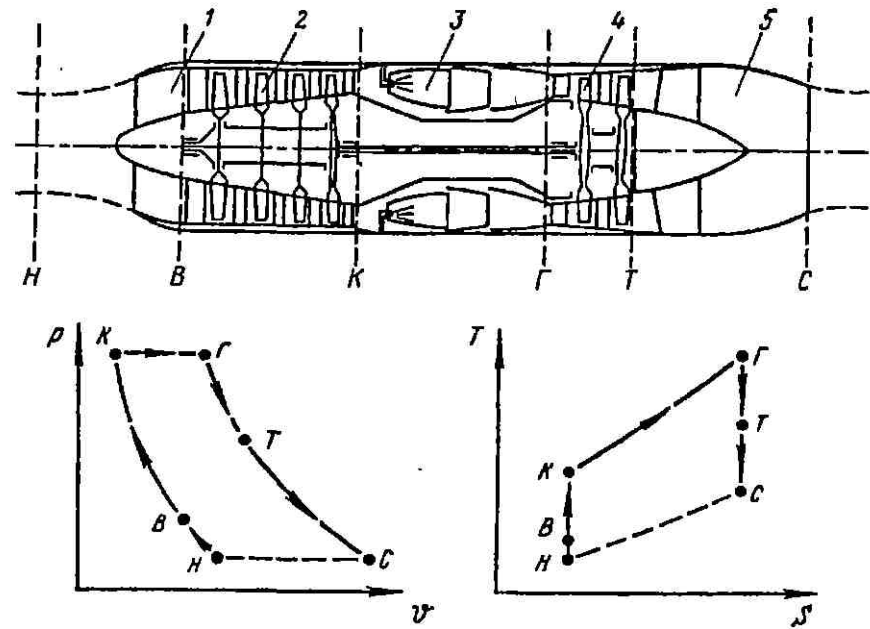


Рис. 29

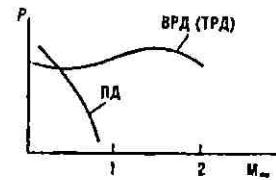


Рис. 30

мере сгорания, благодаря чему вновь открываются впускные клапана, и цикл повторяется.

Как известно, Германия во второй Мировой войне, начиная с июня 1944 г. применяла самолет-снаряд (название не соответствует современной терминологии) Фау-1 против Великобритании. Тяга ПуВРД фирмы «Аргус» составляла 3285 Н. Дальность полета ЛА доходила до 370 км, а его скорость — до 550 км/ч.

Известны случаи применения ПуВРД и ПВРД в качестве *концевых двигателей* на лопастях вертолетов, и на самолетах-мишенях, в малой авиации (авиамоделный спорт). Разновидностью ПуВРД являются *бесклапанные резонансные* или *волновые двигатели*, у которых массозаборник выполнен в виде загнутой назад второй резонансной трубы.

*Турбореактивный ВРД* или ТРД отличается от ПВРД наличием турбокомпрессора, то есть насаженных на один вал турбины и компрессора (рис.29). При этом термодинамический цикл работы остается таким же, как у ПВРД, но основное сжатие захватываемого двигателем воздуха происходит не в *диффузоре* 1, а в компрессоре 2, а расширение газа после камеры сгорания 3 — не только в сопловом устройстве 5, но и в турбине 4. Мощность турбины рассчитывается таким образом, чтобы ее хватило на привод компрессора. А если ТРД служит для привода воздушного винта самолета или несущего винта вертолета, то мощность турбины увеличивается в расчете на привод этих винтов. Такой двигатель называется *турбовинтовым* или ТВД. Он в целом напоминает *винтомоторную установку* с поршневым двигателем, однако отличается от нее более высокими характеристиками. В целом именно ТРД «сделали погоду» в авиации: позволили ей перейти *звуковой барьер* (рис. 30). Классификация современных ТРД включает, кроме двигателей приведенной классической схемы, целую серию дозвуковых ТВД (*турбовинтовой* и *турбовентиляторный* двигатель с воздушным винтом, расположенным в кольце или в контуре двигателя, это необходимо для уменьшения уровня шума самолета, а также *турбовальный двигатель*, применяемый для привода несущих винтов вертолета). Дозвуковая авиация снабжена также большим количеством *двухконтурных* ТРД или ТРДД, имеющих различные конструктивные особенности. Чем меньше расчетная скорость полета, тем более выгодна большая *степень двухконтурности*. В отличие от ТВД с вентилятором воздушный или внешний контур такого двигателя может иметь свою камеру сгорания, регулируемое сопло, выполненное со-

вместно с соплом центрального контура по оптимальной *эжекторной* схеме, и другие элементы. Внешний контур может представлять собой многорежимный ПВРД либо ПВРД с вентилятором и т.д. Использование расположенной за турбиной классического ТРД форсажной камеры, напоминающей камеру сгорания ПВРД, дает название новому классу двигателей — ТРД с форсажем или ТРДФ (рис.31), широко применяемых на современных сверхзвуковых самолетах. ТРДФ (как и другие ТРД) может иметь и *двухвальную* схему, то есть иметь два *соосных* турбокомпрессора, вращающихся в разные стороны для уменьшения *кориолисовых* нагрузок при маневрах самолета и позволяющих получить более оптимальные термодинамические параметры. Такие двигатели называются ТРДФД. Важным элементом любого ТРД является сопло — особенно *регулируемое*, то есть изменяющее свою геометрию. Такое сопло может изменять площади критического и выходного сечений, направлять часть потока вперед по ходу движения самолета, создавая тормозящее усилие (используется после посадки наряду с реверсом винтов), отклонять весь поток газа вниз при взлете с целью создания подъемной силы для ЛА ВВП. Созданы и специальные подъемно-маршевые ТРД или ПМТРД для таких ЛА. Конкурирующим направлением является создание подъемных ТРД или ПТРД, устанавливаемых на ЛА вертикально, имеющих небольшие габариты, а главное — низкие значения удельного веса (отношение веса двигателя к его тяге). На рис. 32 показаны диапазоны применения ВРД (1-ПТРД, 2-ТВД, 3-ТРДД, 4-ТРД, 5-ТРДФД, 6-СПВРД, РТД РПД, 7-ГПВРД, ЖРД, а на рис.33 — внешние виды наиболее характерных ТРД: а — ТРДД Д-36; б — силовая установка вертолета Ми-8 с ТВД ТВ2-117А; в — подъемно-маршевый ТРД Р27В-300; г — ТРД АМТКРД-01; д — турбовинтовой двигатель АИ-20).

Основной теплофизической проблемой улучшения характеристик ТРД является повышение температуры газа  $T_{Г^*}$  перед турбиной, так как и удельный вес  $\gamma_p$  двигателя (а) как маршевого 1, так и подъемного 2, и удельный расход топлива  $C_{уд_0}$  (б) зависят именно от этой температуры (в): 3 — неохлаждаемые; 4 — охлаждаемые; 5 — экспериментальные турбины (рис. 34).

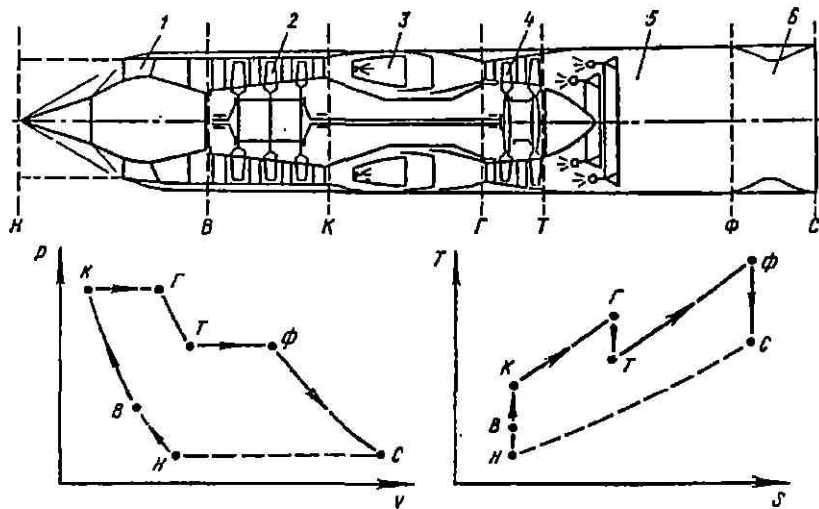


Рис. 31

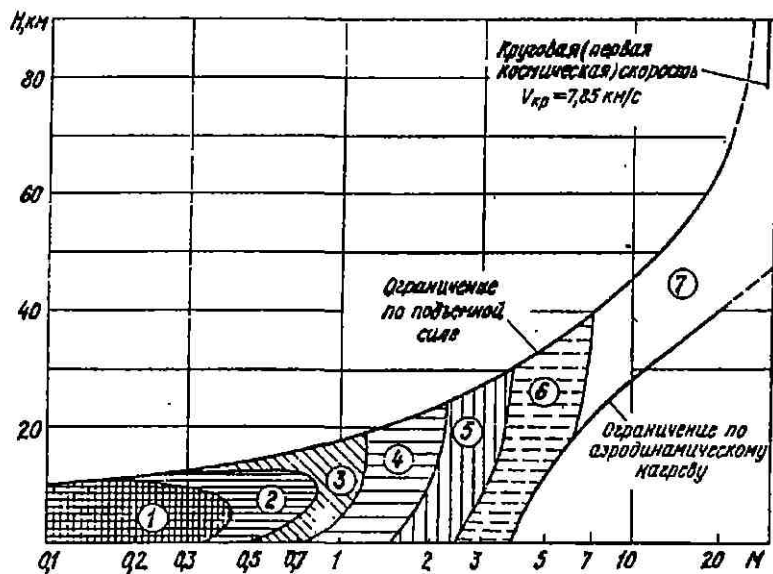


Рис. 32

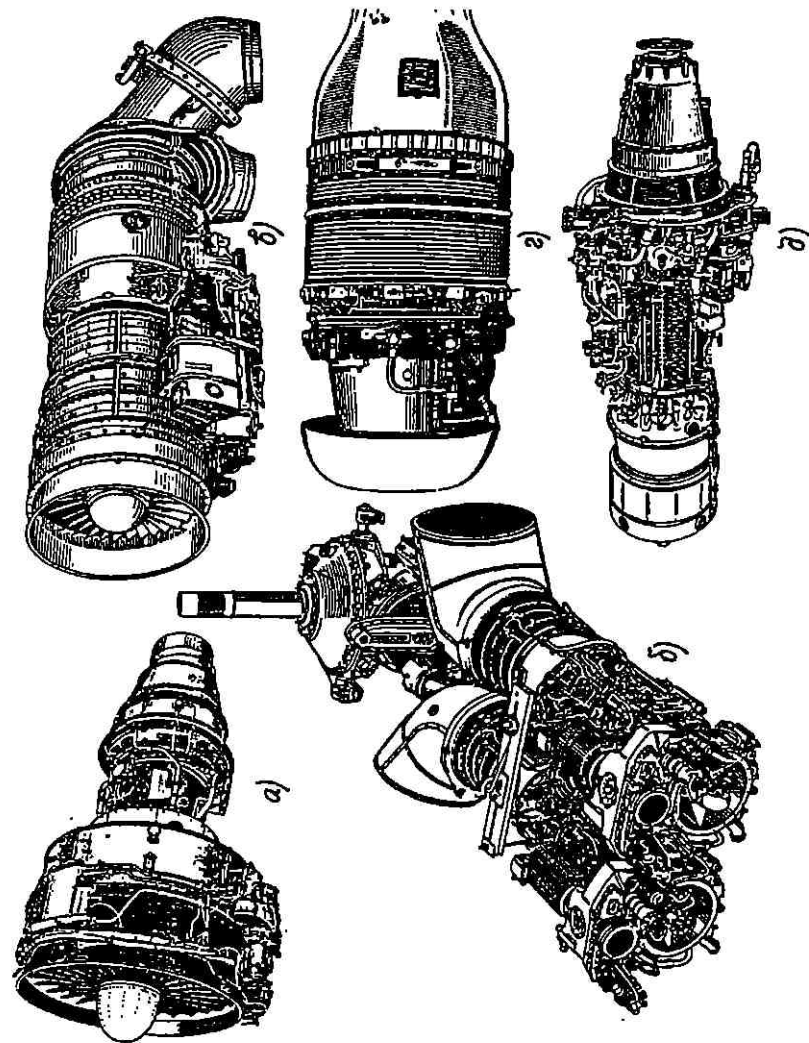


Рис. 33

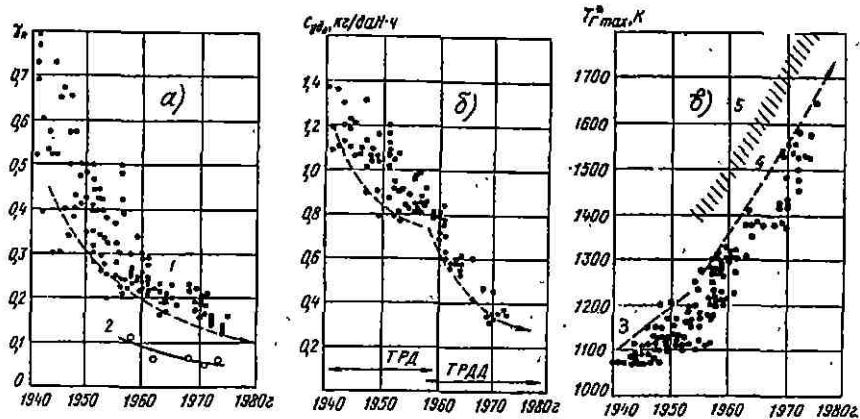


Рис. 34

### 3.6. Ракетные двигатели

К тепловым двигателям относят жидкостные, твердотопливные и гибридные ракетные двигатели: ЖРД, РДТТ, ГРД. Схема ЖРД приведена на рис. 35, а; термодинамический цикл его работы — на рис. 35, б. Основные элементы ЖРД: 1 — выпускной патрубок газовой турбины; 2 — теплообменник-испаритель жидкого окислителя; 3 — теплообменник-подогреватель холодного газа; 4 — насос окислителя; 5, 6 — газовые магистрали наддува баков ракеты; 7 — баллон сжатого газа; 8 — бак жидкого окислителя; 9 — бак жидкого горючего; 10 — насос горючего; 11 — газовая турбина; 12 — газогенератор; 13 — камера сгорания.

Жидкие компоненты топлива из баков в ЖРД поступают при давлении  $p_1$  (сумма давления наддува и гидростатического давления) и нагнетаются насосами в двигатель и частично в газогенератор под давлением  $p_2$  (давление за насосами) — изохорный процесс 1-2 (жидкость считается несжимаемой). Сгорание (подвод тепла  $q_1$ ) — изобарный процесс 2-3, реализуемый в камере сгорания, переходит в адиабатное расширение газа 3-4 в сверхзвуковом сопле 14. Замыкающая изобара цикла 4-1 условная, так как в насосы поступает новая порция ТРТ.

Семейство современных ЖРД весьма многообразно: одно- и многокамерные двигатели, двигатели, работающие на криогенных

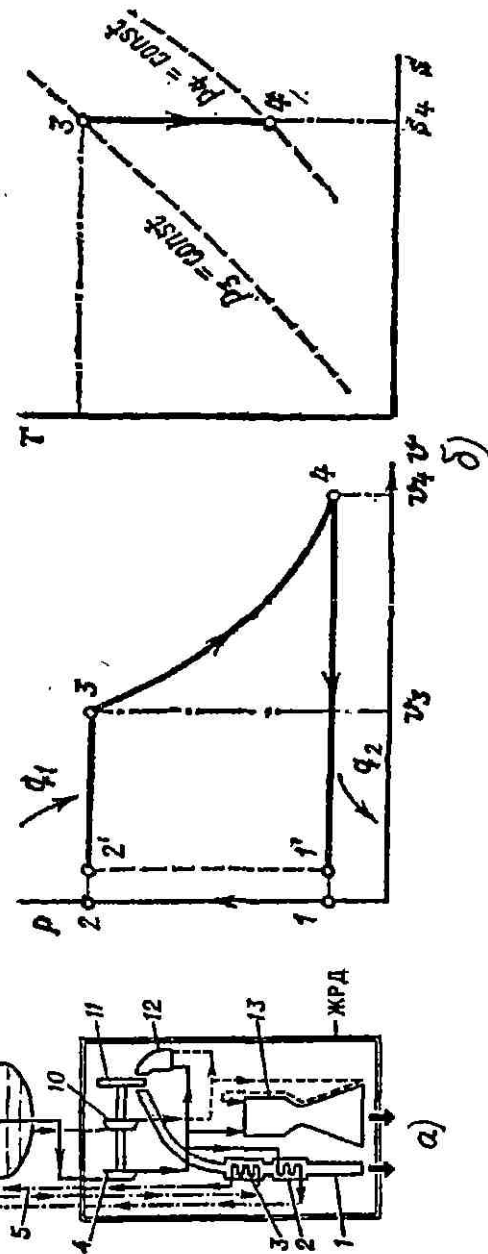


Рис. 35

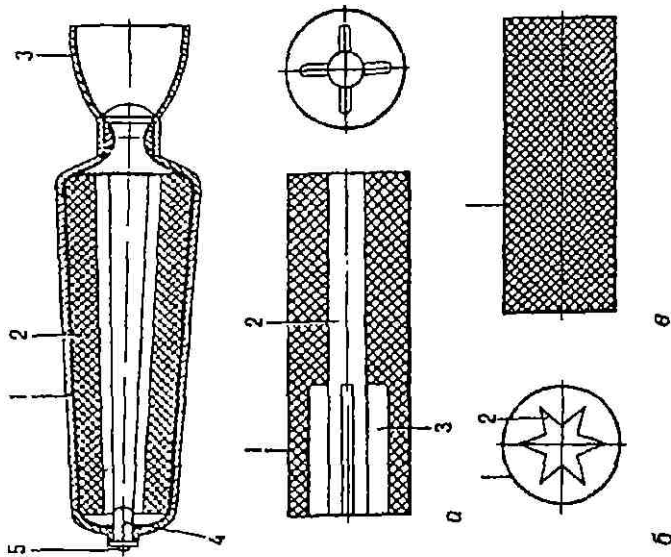


Рис. 37

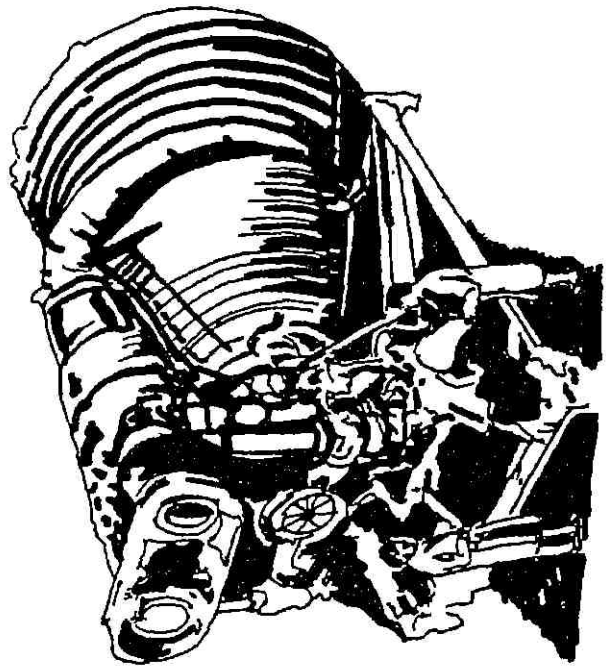


Рис. 36

(жидкий водород, жидкий кислород) и *высококипящих* компонентах (азотный тетроксид, несимметричный диметилгидразин, углеродородное горючее, керосин), двигатели, реализующие подачу в камеру сгорания *разных фаз* топливных компонентов (жидкость-жидкость, жидкость-газ, газ-газ, *шуга* — жидкость и т.д.). Шуга — это мелкодисперсная твердая фаза. Есть и еще один способ использования твердого топлива в ЖРД — это подача в камеру сгорания мелкодисперсного порошка, *продуваемого газом*, то есть *псевдооживленного* компонента ТРТ. Большое разнообразие ЖРД объясняется и способами *зажигания* топлив: самовоспламенение, электроискра или тлеющий разряд, химическое зажигание, акустический нагрев поджигающего элемента и т.д. Общий вид одного из реальных ЖРД представлены на рис.36 (двигатель F-1 «лунного» носителя США «Сатурн-5»).

По *термодинамическому циклу* ЖРД работают и РДТТ (рис.37), и ГРД, принцип действия которых во многом сходен, но в ГРД в камеру сгорания с твердым горючим подается жидкий или газообразный окислитель. На рис.37 изображены: 1 — корпус РДТТ; 2 — заряд твердого топлива; 3 — сопло; 4 — воспламенитель; 5 — запал. Заряды могут быть: а — канально-щелевыми: 1 — экранирующие РДТТ; 2 — канал; 3 — щель; б — звездообразными; в — торцевыми.

### 3.7. Аэростатические тепловые двигатели

Подъемная сила не только аэростата или дирижабля, но и тяжелой космической ракеты возникает всегда, если конструкция ЛА «вытесняет» значительные массы воздуха. Когда масса вытесняющего объема больше массы вытесняемого воздуха на данной высоте, возникает подъемная сила, равная разности этих масс, умноженной на ускорение силы тяжести, а масса вытесняющего объема больше массы вытесняемого воздуха, то вес ЛА уменьшается на величину веса вытесненного воздуха. Таким образом, при взвешивании тел гирями или пружинными весами (так производится *весовая заправка* топливных емкостей ЛА на стартовой позиции) необходимо учитывать аэростатическую (архимедову) силу. Если этого не сделать, то количество топлива будет больше расчетной величины, то есть ЛА будет *неоправдано перетяжелен*.

Другой случай. Двигательная установка ракеты-носителя Н-1, которая была предназначена для осуществления отечественной лунной программы (см. рис. 20, а), представляла собой замкнутую

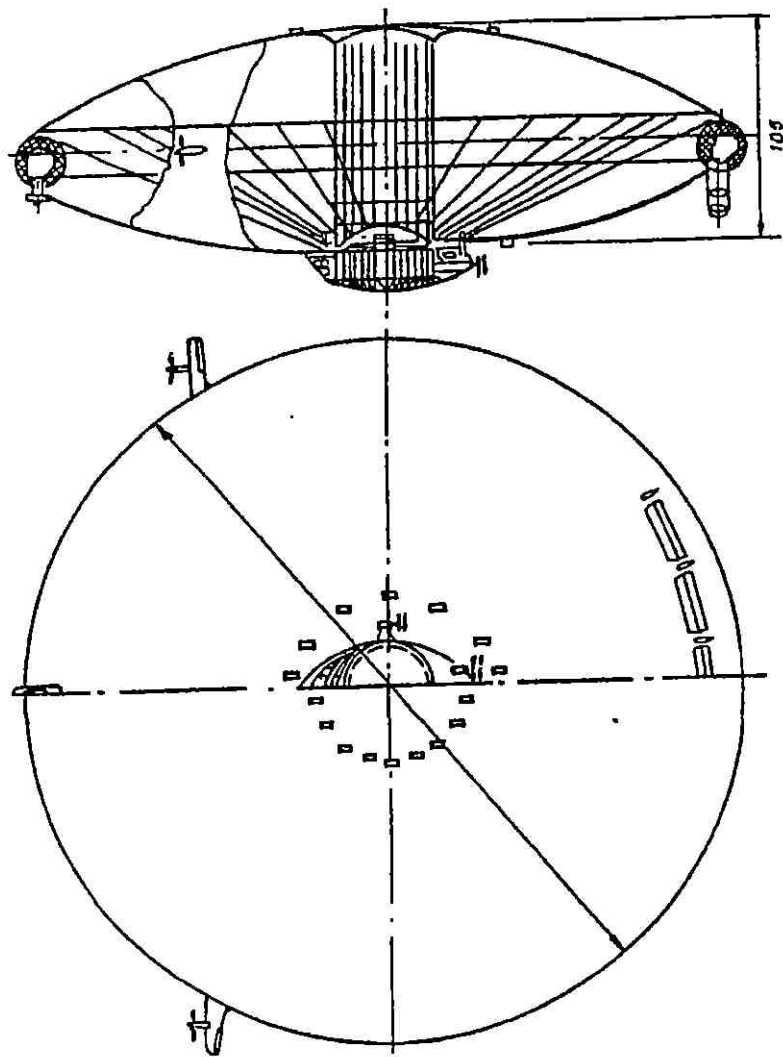


Рис. 38

многосопловую двигательную компоновку, в донной полости которой объемом  $V$  более  $150 \text{ м}^3$  циркулировал нагретый от струй до  $1000 \text{ К}$  воздух. Воспользовавшись уравнением состояния идеального газа, определим подъемную силу этого объема в момент старта ракеты:

$$P_A = Vg(\rho_B - \rho_r) = Vg \left( \frac{P_B}{R_B T_B} - \frac{P_r}{R_r T_r} \right) =$$

$$= 150 \cdot 9,81 \cdot \left( \frac{10^5}{277 \cdot 300} - \frac{0,5 \cdot 10^5}{277 \cdot 1000} \right) = 150 \text{ Н},$$

где индексом «в» отмечены параметры окружающего «г» — горячего воздуха в объеме  $V$ .

Как видим, для сверхтяжелой ракеты, у которой суммарная тяга всех двигателей на старте составляла 4500 тонн, добавок тяги в 150Н или 0,015 тонн, казалось бы, незначителен. Не следует забывать, однако, что этот добавок *бесплатен*. На получение этой тяги бортовое топливо не затрачивается. Вот почему ракета, выводящая около 100 тонн *полезного груза*, получает за счет аэростатической силы гарантированный добавок массой в несколько десятков килограмм, а этим пренебрегать уже нельзя, так как стоимость выведения на СИСЗ 1 кг полезного груза оценивается в 1,5-2 тыс. долларов США.

В Московском авиационном институте ведутся работы по ЛА нового типа — *термоплану* (рис. 38), принцип действия которого основан на создании подъемной аэростатической силы за счет несущего газа (гелия) и горячего воздуха от двигателя или подогревателя, то есть аналогичен только что рассмотренному.

### 3.8. Нетепловые двигатели

К нетепловым двигателям, то есть устройствам, в которых конечное преобразование энергии в тягу, крутящий момент или электрический ток происходит *без участия тепловой энергии* как основного ее носителя, относят *плазменные, ионные, полевые, квантовые* и др. Такие двигатели получают энергию от *энергоустановки*, которая зачастую рассматривается как их составная часть.

Характерным примером нетепловой энергоустановки является *топливный элемент*. Первый топливный элемент создал Гровс в 1839 г. (две платиновые пластины погружались в раствор серной кислоты). Было обнаружено, что выделяющиеся при электролизе газы  $H_2$  и  $O_2$  обладают *электрохимической активностью*, то есть после выключения внешнего напряжения на клеммах сохранялась разность потенциалов порядка 1В, правда, при ничтожной емкости из-за малого количества активных газов.

О целесообразности прямого (нетеплового) превращения химической энергии в электрическую высказался в 1894 г. В.Оствальд применительно к окислению угля кислородом. Его идея затем была использована В.Нернстом, Ф.Габером и их сотрудниками при попытках создать *высокотемпературные* топливные элементы, работающие на углероде и кислороде. Первый вариант действующего устройства такого типа сконструировали Буар и Прайс (магнетитовый катод и угольный анод, ЭДС = 0,7 В;  $T=1370$  К).

Исследования О.К. Давтяна, опубликованные в 1947 г. в работе «Проблема непосредственного превращения химической энергии в электрическую», казалось бы, показывали бесперспективность избранного нового направления, потому что во всех исследованных случаях температура была не меньше 1250 К, а мощность нагрева топливного элемента всегда превосходила вырабатываемую им электроэнергию (это без учета расходуемой химической энергии). Время работы и срок службы системы были очень малы.

Пришлось вмешаться специалистам в области термодинамики и определить КПД и его составляющие. Выяснилось, что общая эффективность топливного элемента величина сложная:

$$\eta_{эфф} = \eta_{теор} \eta_E \eta_F,$$

где  $\eta_{теор}$  — теоретический КПД, равный для водородно-кислородной пары (рис. 39) 0,83;  $\eta_E$  — КПД, связанный с потерями на *поляризацию* электродов и омическим сопротивлением (его называют еще КПД по напряжению и определяют как отношение напряжения над нагрузкой к напряжению при нулевом токе  $i$ ;

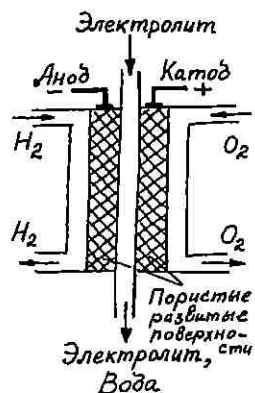


Рис. 39

$$\eta_E = \frac{E_i}{E_{i=0}} \approx \frac{0,83}{1,23} \approx 0,67),$$

а  $\eta_F$  — фарадеевский КПД, равный отношению количества электричества  $Q$ , полученного от одного моля топлива, к его электрохимическому эквиваленту  $\mathcal{E}$ , и включающий также неиспользованные потери водорода

$$\eta_F = \frac{Q}{\mathcal{E}} \approx 0,95$$

Оказалось, что общий КПД может быть весьма высок:

$$\eta_{эф} = 0,83 \cdot 0,67 \cdot 0,95 = 0,53,$$

если решить основную проблему *работоспособности топливного элемента*: научиться изготовлять развитую пористую (выше, чем у активированного угля) поверхность электродов, а когда ясно, что и для чего делать, успех придет обязательно.

Сейчас топливные водородно-кислородные элементы устанавливаются на КК «Шаттл» и «Буран», входили в состав лунного пилотируемого комплекса США, являются наряду с *солнечными батареями* основным энергоисточником космических ЛА.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

(круг обязанностей инженера-теплофизика)

В данной работе были рассмотрены основные технические вопросы, решаемые создателями ЛА и двигателей для них. Не случайно факультет авиационных ЛА Московского авиационного института имеет №1, а факультет двигателей ЛА №2. Но *аэрокосмических специальностей* — сотни, в том числе десятки *инженерного профиля*, связанные не только с определением общего облика и назначения ЛА и его основной системой — энергодвигательной, но и с решением множества других важных вопросов:

- управления движением и навигацией;
- управления бортовым комплексом;
- жизнеобеспечения;

- теплоизоляции и теплозащиты;
- активного обеспечения теплового режима;
- вооружения и активной боевой защиты;
- электрооборудования;
- пневмогидрооборудования;
- измерений;
- информационного (запись информации, радиообмен с земными службами и между ЛА);
- создания антенно-фидерных устройств и т.д.

Кроме инженерного обеспечения аэрокосмической инфраструктуры общества существуют службы перевозок, экономические, банковско-кредитные, службы безопасности, экологические, социально-психологические и т.д.

Инженер-теплофизик, освоивший основы термодинамики — суперфундаментальной науки об эффективности — и основы теплопередачи, то есть науки о работоспособности большинства теплонеприжатых систем и устройств, сможет приложить свои знания во многих областях: экспертиза, консультации, теплофизические расчеты, создание инженерных методик для таких расчетов, проведение экспериментальных и теоретических исследований и разработки новых методов теплофизических расчетов, теплофизическое проектирование новых конструкций, их стендовые и натурные (летно-конструкторские) испытания, выдача заключений о пригодности новых конструкций к испытаниям и эксплуатации, личное участие в полетах испытываемых и эксплуатируемых аэрокосмических ЛА — вот далеко не полный круг возможных обязанностей инженера-теплофизика, требующий от него обширного инженерного и социального кругозора и, конечно, надежных, прочных знаний.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бурдаков В.П., Данилов Ю.И. Ракеты будущего. 2-е изд. -М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. Бурдаков В.П. Электроэнергия из космоса. -М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Бурдаков В.П. Основы неравновесной термодинамики. - М.: Изд-во МАИ, 1989.
4. Бурдаков В.П., Данилов Ю.И. Внешние ресурсы и космонавтика. -М.: Атомиздат, 1976.
5. Бурдаков В.П., Зигель Ф.Ю. Основы космонавтики (физика космоса): Учебное пособие для авиационных вузов. -М.: Атомиздат, 1975.
6. Бурдаков В.П. Груз на спине самолета. — М.: Наука и жизнь, 1990, №1.
7. Теория воздушно-реактивных двигателей/ Под ред. С.М. Шляхтенко, — М.: Машиностроение, 1975.
8. Шаталов А.Я. Введение в электрохимическую термодинамику.-М.: Высшая школа, 1984.
9. Авиация: Энциклопедия/ Гл.ред. Г.П. Свищев. — М.: Изд-во Большая Российская энциклопедия, 1994.
10. Макаров Ю.В. Летательные аппараты МАИ. Очерки по истории развития конструкций и систем летательных аппаратов. — М.: Изд-во МАИ, 1994.
11. Космонавтика: Энциклопедия/ Гл.ред. В.П. Глушко. — М.: Изд-во Советская энциклопедия, 1985.
12. Техническая термодинамика. Изд-е 2-е переработанное и дополненное/Под ред. В.И. Крутова.— М.: Высшая школа, 1981
13. Кошкин В.К., Михайлова Т.В. Термодинамика реальных газов и паров. —М.: Изд-во МАИ, 1982.
14. Бурдаков В.П., Данилов Ю.И. Физические основы космической тяговой энергетики. —М.: Атомиздат, 1969.
15. Бурдаков В.П. Озон, вулканы и ... ракеты//Квант, 1991, №8. — С.50.



## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Условные обозначения , принятые в аэрокосмической технике . . . . .	4
1. Проблемы развития человечества и место теплофизических дисциплин . . . . .	6
1.1. Проблемы эффективности . . . . .	6
1.2. Термодинамика — суперфундаментальная наука . . . . .	9
1.3. Хроника системотехники от Вселенной до человека . . . . .	21
1.4. Классическая термодинамика С. Карно и неравновесная термодинамика . . . . .	25
1.5. Ж.Б.Фурье и неравновесная термодинамика . . . . .	27
1.6. Закон И.Ньютона о конвективном теплообмене . . . . .	30
1.7. Теплообмен излучением . . . . .	32
1.8. Теплофизические проблемы глобального климата . . . . .	34
2. История и перспективы развития летательных аппаратов . . . . .	35
2.1. Потребности организмов и ресурсы для их удовлетворения . . . . .	35
2.2. Легенда о Дедале и Икаре. Планеры . . . . .	38
2.3. Братья Монгольфье и воздухоплавание . . . . .	42
2.4. Братья Райт и авиация . . . . .	46
2.5. Ракета К.Э. Циолковского и космонавтика . . . . .	55
2.6. Комбинированные ЛА . . . . .	59
3. Энергетика и двигатели летательных аппаратов . . . . .	62
3.1. Энергетическое обеспечение ЛА . . . . .	62
3.2. Источники энергии для двигателей . . . . .	63
3.3. Паровые двигатели . . . . .	66
3.4. Поршневые двигатели внутреннего сгорания . . . . .	70
3.5. Воздушно-реактивные двигатели . . . . .	73
3.6. Ракетные двигатели . . . . .	84
3.7. Аэростатические тепловые двигатели . . . . .	87
3.8. Нетепловые двигатели . . . . .	89
Заключение . . . . .	91
Литература . . . . .	93

Тем.план 1996, поз.33

Бурдаков Валерий Павлович

### АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА. ВВЕДЕНИЕ В СПЕЦИАЛЬНОСТЬ

Редактор *Р.Н. Фурсова*  
Техн.редактор *В.Н.Горячева*

---

Сдано в набор 01.02.96. Подписано в печать 29.01.97  
Бум. газетная. Формат 60x84 1/16. Печать офсетная  
Усл.печ.л. 5,58. Уч.-изд.л. 6,0. Тираж 250  
Зак. 2013/1093. С. 1

---

Типография Издательства МАИ  
125871, Москва, Волоколамское шоссе,4