

## КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

## К 100-летию со дня рождения академика Л.А. Арцимовича

*Научная сессия Отделения физических наук  
Российской академии наук, 18 февраля 2009 г.*

*Совместное заседание Учёного совета Российского научного центра  
"Курчатовский институт", Президиума Российской академии наук  
и Госкорпорации "Росатом", 18 марта 2009 г.*

И.М. Халатников; В.Е. Фортов, А.А. Макаров; А.М. Фридман; Ю.В. Мартыненко

PACS number: 01.10.Fv

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200912j.1335

18 февраля 2009 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева РАН состоялась Научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук, посвящённая 100-летию со дня рождения академика Л.А. Арцимовича. На сессии были заслушаны доклады:

1. **Халатников И.М.** (Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Черногоровка, Московская обл.). *Воспоминания о встречах с Л.А. Арцимовичем.*

2. **Пашинин П.П.** (Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва). *Л.А. Арцимович и инерционный термоядерный синтез.*

3. **Фортов В.Е.** (Институт теплофизики экстремальных состояний Объединённого института высоких температур РАН). *Мощные ударные волны и экстремальные состояния плазмы.*

4. **Фридман А.М.** (Институт астрономии РАН, Москва). *Предсказание и открытие сильнейших гидродинамических неустойчивостей, вызванных скачком скорости: теория и эксперименты.*

5. **Смирнов В.П.** (Российский научный центр "Курчатовский институт", Москва). *По пути Арцимовича к термоядерной энергетике.*

Краткое содержание доклада 1 и вступительной части доклада 4 (основное содержание доклада 4 соответствует ранее опубликованному одноимённому обзору А.М. Фридмана [УФН 178 225 (2008)]) публикуется ниже. Поскольку основное содержание доклада 3 отображено в обзорах В.Е. Фортова "Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества" [УФН 177 347 (2007)] и "Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе" [УФН 179 653 (2009)], то вниманию читателей предлагается статья В.Е. Фортова и А.А. Макарова "Направление инновационного развития энергетики мира и России", освещающая современные проблемы и перспективы энергетики, развитию которой посвятил значительную часть своей жизни Л.А. Арцимович.

\* \* \*

18 марта 2009 г. в Российском научном центре (РНЦ) "Курчатовский институт" (КИ) состоялось совместное заседание Учёного совета РНЦ КИ, Президиума Российской академии наук и Госкорпорации "Росатом", посвящённое 100-летию со дня рождения академика Л.А. Арцимовича. Были заслушаны доклады:

1. **Велихов Е.П.** (Российский научный центр "Курчатовский институт", Москва). *Академик Л.А. Арцимович — основатель нашей отрасли.*

2. **Смирнов В. П.** (Российский научный центр "Курчатовский институт", Москва). *По пути Л.А. Арцимовича к термоядерной энергетике.*

3. **Боярчук А.А.** (Отделение общей физики и астрономии РАН, Москва). *Л.А. Арцимович и астрономия.*



Лев Андреевич Арцимович  
(25.02.1909 – 01.03.1973)

4. **Мартыненко Ю.В.** (Институт ядерного синтеза Российского научного центра "Курчатовский институт", Москва). *Электромагнитное разделение изотопов и его наследие.*

5. **Стрелков В.С.** (Институт ядерного синтеза Российского научного центра "Курчатовский институт", Москва). *Наши учителя — Лев Андреевич Арцимович.*

6. **Мирнов С.В.** (Институт ядерного синтеза Российского научного центра "Курчатовский институт", Москва). *Л.А. Арцимович глазами бывшего аспиранта.*

Краткое содержание доклада Ю.В. Мартыненко публикуется ниже.

PACS numbers: 01.60.+q, 01.65.+g, 52.55.-s  
DOI: 10.3367/UFNr.0179.200912k.1336

## Неслучайные совпадения (Лев Андреевич Арцимович)

И.М. Халатников

О мирном использовании атомной энергии физики стали задумываться ещё до завершения работ по созданию водородной бомбы. Необходимо было найти способ удержания газообразного дейтерия и трития при сверхвысоких температурах порядка ста миллионов градусов (электрон-ионная плазма).

По-видимому, первыми предложили способ удержания в ограниченном объёме плазмы И.Е. Тамм и А.Д. Сахаров. Они поместили её в магнитное поле специальной конфигурации (магнитные ловушки). Сразу стало ясно, что задача это трудная и что до создания промышленных термоядерных реакторов пройдёт много времени. Прошло уже пятьдесят лет с начала этого проекта и только теперь путём объединения международных усилий наметился сдвиг к первым практическим результатам. Однако задача исследования поведения плазмы в магнитном поле оказалась не только трудной, но и интересной для физиков. Во главе этого мирного атомного проекта был поставлен Лев Андреевич Арцимович — ближайший сотрудник И.В. Курчатова, так же как и он, выходец из школы Ленинградского физико-технического института.

Я впервые услышал о Льве Андреевиче от начальника Первого Главного управления КГБ Б.Л. Ванникова, который как-то при встрече пожаловался мне, что у Л.А. медленно движется дело с разделением изотопов лития. А именно, изотоп лития-6, предложенный В.Л. Гинзбургом в спецотчётах в 1948–1949 гг. в качестве "горючего", должен был играть важную роль в сжигании водородной компоненты "слойки" — первого варианта водородной бомбы предложенного А.Д. Сахаровым. Это было в 1952 г., а первые испытания намечалось произвести в 1953 г. Л.А. в конце концов уложился в срок, и испытания были проведены.

Отдел физики плазмы в институте Курчатова был расширен, были собраны теоретики всех поколений — от М.А. Леонтовича до "святой троицы" молодых: Роальда Сагдеева, Евгения Велихова, Саши Веденова. Важную роль триггера идей играл Андрей Будкер. Запомнилось большое собрание физиков, заполнивших клуб Института атомной энергии (ИАЭ), на котором главной сенсацией была идея Будкера о "магнитных бутылках" — конфигурациях магнитного поля, напоминающих бутылку, из которой ионы могли выходить только через узкое горлышко. Несмотря на кажущийся всеобщий оптимизм, И.В. Курчатова оценивал перспективы более сдержанно. Его здоровье уже было подорвано, а он хотел ещё при жизни увидеть "мирный термояд". Как-то летом 1957 г. он меня пригласил, хотел от меня услышать какие-либо альтернативные идеи. Это свидетельствовало о том, что, как теперь говорят, я у него имел высокий рейтинг. Когда мы с ним покидали административный корпус ИАЭ, И.В. увидел мой новый серый "Москвич" второй модели ("новинка"), он заинтересовался машиной и захотел поехать со мной. Он собирался на Ордынку в министерство, а я ехал в ту же сторону. Так и поехали —

И.В. в моём "Москвиче", а его огромный ЗИС с охраной нас эскортировал.

Мой серый "Москвич" заслуживает небольшого отступления. В то время наиболее популярной и престижной автомашиной была "Победа". За ней следовало стоять в очереди несколько лет, у меня были на неё деньги, но не было очереди. Пришлось купить менее престижную автомашину "Москвич" второй модели. Однако вскоре сотрудница А.И. Шальникова по университету Татьяна Белова, встретив меня в Институте физических проблем (ИФП), спросила, не хотел ли бы я поменять мой "Москвич" на новую "Волгу-21", выпущенную к открытию Фестиваля молодёжи и студентов 1957 года. Оказалось, что её друзья, писательница Наталья Ильина и её муж филолог, профессор МГУ А. Реформатский имеют разрешение купить "Волгу-21", но им не хватает средств. Они охотно бы приобрели мой "Москвич", а взамен уступили бы мне свои права приобрести "Волгу". Так и поступили — обе стороны остались довольны. А моему "Москвичу", можно сказать, повезло — удалось попасть в историю. Наталья Ильина возвратилась из эмиграции перед войной из Харбина. В Харбине была большая русская колония, имевшая отношение к КВЖД. Железную дорогу вернули Китаю, а почти всю русскую колонию вывезли в Россию. Так в России оказались А. Вертинский, Н. Ильина и другие яркие личности. Нужно сказать, что уже вскоре (1938 г.) большинство вернувшихся "харбинцев" были арестованы и высланы в дальние края. Однако Н. Ильина уцелела — ей повезло; она хорошо вписалась в литературное сообщество. Она была близка к Анне Ахматовой, и когда та жила в Москве у Ардовых на Ордынке, которые её опекали, Наталья Ильина часто вывозила Анну Ахматову за город подышать свежим воздухом. Поездки совершались на бывшем моём сером "Москвиче". Таким образом мой серый "Москвич" дважды вошёл в историю. И.В. Курчатова и Анна Ахматова ездили на нём.

Вернёмся к Льву Андреевичу. После того, как я посетил А.П. Александрова (1963 г.) и получил его поддержку для создания Института теоретической физики (ИТФ), он поручил Л.А. дальнейшую деятельность в Академии наук по созданию "цыганского табора" теоретиков. Л.А. был в Академии наук очень влиятельной фигурой — занимал высокую должность академика-секретаря Отделения общей физики и астрономии. Таким образом, создание нового института в составе Отделения входило в его обязанности, поэтому в ту пору мы с ним тесно взаимодействовали. Лев Андреевич был доброжелательным, чувствовалось во всём его облике и манерах хорошее дворянское воспитание. Ранее мы с ним уже встречались на семейных торжествах у Петра Леонидовича на даче на Николиной горе.

К 1971 году ИТФ прочно встал на ноги, и мы проводили второй Советско-американский симпозиум в Ленинграде, где к нам было приковано внимание местных властей. Слишком бесконтрольно советские участники симпозиума контактировали с иностранцами. Итоги симпозиума мне пришлось обсуждать с Львом Андреевичем в не очень приятном контексте: Л.А. мне позвонил и очень нервно стал выговаривать за то, что наши сотрудники вели себя в Ленинграде очень "бурно", а один даже попал не то в больницу, не то в вытрезвитель. Совершенно несвойственно стилю академического обра-

щения Л.А. потребовал по этому поводу "объяснения". Такого ранее никогда не было, видно на нас в Ленинграде обратили внимание и написали серьёзную "телегу". Не буду описывать подробно, как сочинялся "ответ запорожцев", и страдания нашего сотрудника, который так потрудились на симпозиуме, что попал в больницу. Я никогда не писал "объяснений" начальству и не хотел создавать прецедента. К счастью, на одной площадке в доме, где жил Лев Андреевич, жил также Аркадий Мигдал. И они дружили. Я решил "объяснение" Л.А. не посылать, а передать его через А.Б. Мигдала "пососедски". По-видимому, Л.А., получив "объяснение" на лестнице, почувствовал некоторую неловкость и тут же порвал его. Так закончилась деликатная история с "объяснениями". Мы сумели не опуститься до уровня написания "объяснений" о поведении уважаемых молодых учёных. Может быть, Л.А. вспомнил, что, когда его резкие "некорректные" высказывания по поводу Корейской войны в 1950 г. стали известны Л.П. Берии, всё обошлось "приветом", переданным через И.В. Курчатова, с предупреждением Л.А. быть поосторожней с высказываниями.

Кстати, о Корейской войне. Когда она окончилась вместе с концом Сталина, то всем организациям было предложено отправить подарки Северной Корее, которая была почти полностью стёрта с лица земли. Академия наук составила список возможных подарков и прислала его на заключение в Институт физических проблем. Список попал ко мне и Абрикосову на заключение. Запомнилось, что на первом месте в "списке подарков" стояли: ножка канделябра из Нахичевани и список кушаний, подававшихся при дворе Патриарха Иова. Этот список не потерял "актуальности" для Северной Кореи, возможно, до сих пор.

Л.А. был нетерпим к моральной нечистоплотности. Вспоминаю такой случай. В ИАЭ многие годы работал хороший теоретик Борис Давыдов, это был скромный человек, но обстоятельства его семейной жизни сложились непросто. Произошло так, что он женился на бывшей жене аккомпаниатора известного в то время певца А. Вертинского. Вертинский со своим аккомпаниатором Брехесом часто выступал в иностранных посольствах. Соответствующие службы не исключали при этом, что и жена Брехеса могла бывать в посольствах, что рядовым гражданам категорически запрещалось. О женитьбе Б. Давыдова знали только близкие друзья, однако кто-то из них информировал "кого следует". Всё кончилось трагически — Б. Давыдова лишили допуска и уволили из Курчатковского института. Многие догадывались, кто был автором доноса.

В отделе Л.А. однажды происходила, как теперь говорят, "тусовка" по случаю "события" (это мог быть революционный праздник или подведение итогов успешной работы). Гуляние в разгаре, открывается дверь и входит лицо из круга "друзей" Давыдова. Л.А. смотрит на вошедшего и громким, хорошо поставленным голосом, обращаясь к аудитории, говорит: "А этот стукач что здесь делает?" Вошедший заплакал и поспешил ретироваться, закрыв лицо руками. В скором времени он перешёл на основную работу в другой институт, где о нём не всё знали.

На днях рождения на даче у Петра Леонидовича Капицы на Николиной горе, где собирался цвет Московской интеллигенции, все по очереди произносили тосты.

Очередь выступающих регулировал известный скульптор Никогосьян, говоривший с характерным армянским акцентом. Запомнилось его восклицание: "Эй! Арцимович, хотим тебя слушать!" Л.А. послушно поднимался и произносил, как всегда, блестящий тост.

Л.А. рано умер, его улыбающееся лицо всегда у меня перед глазами. Его личная жизнь сложилась удачно, и это было написано на лице.

PACS numbers: 89.20.Bb, 89.30.-g, 89.60.-k  
DOI: 10.3367/UFNr.0179.2009121.1337

## Направления инновационного развития энергетики мира и России

В.Е. Фортов, А.А. Макаров

### 1. Введение

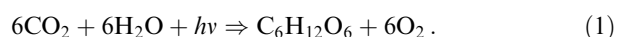
В статье рассмотрены ожидаемые направления научно-технологического прогресса (НТП) в энергетике, а также возможные результаты инновационного развития энергетики в ближайшие двадцатилетия с перспективой до 2050 г. Ускоряющееся развитие общества и глобализация экономики настоятельно требуют изучения перспектив, возможностей и стратегических приоритетов инновационного развития антропогенной энергетики — охватывающей всю населённую территорию планеты совокупности средств преобразования энергии в формы, полезные для человеческой жизнедеятельности. Сегодня антропогенная энергетика, которая в 15 раз превышает совокупную энергию живущих на Земле людей и в 60 раз — их мощность, уже заметна в биосфере планеты, достигая 5% энергии процессов фотосинтеза, обеспечивающих жизнь на Земле, но пока неразличима на космическом уровне, составляя менее двух десятитысячных поступающей на Землю энергии Солнца.

Энергетика представляет собой основу современной и будущей цивилизации, влияет на направления и темпы экономическо-социального развития мира, его безопасность и международные отношения. Практически все стороны жизни человека в той или иной мере связаны с преобразованием и использованием энергии. Обеспечение пищей, одеждой, сооружение жилищ и поддержание в них комфортных условий, транспорт грузов и перемещение людей, связь и обмен информацией — всё это примеры сфер деятельности, требующих затрат энергии.

### 2. Этапы развития энергетики

В доисторические времена человек мог рассчитывать только на свою мускульную энергию, располагая средней мощностью около 150 Вт. Сегодня по нашим расчётам на одного человека в среднем по миру приходится 3 кВт мощности электродвигателей, в развитых странах электровооружённость приближается к 20 кВт на одного жителя и продолжает расти. С учётом топливных двигателей общая энерговооружённость каждого человека более чем удваивается.

Со времён овладения огнём человек пользовался погибшими растениями, которые накопили солнечную энергию в химической реакции фотосинтеза



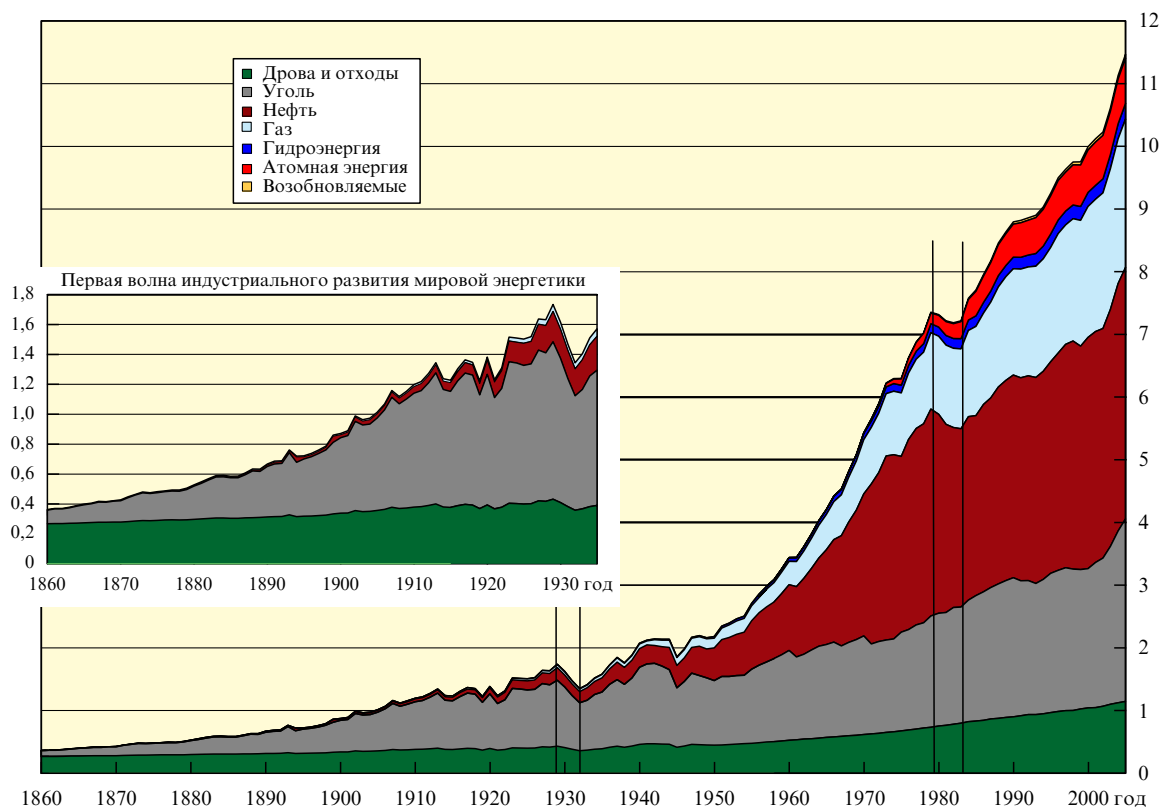
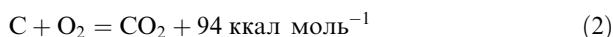


Рис. 1. Динамика мирового производства энергетических ресурсов, млрд т.н.э.

Однако это было лишь "собирачество", а антропогенная энергетика возникла при дополнении тепловой энергии от биомассы механической энергией. Сначала это была мускульная сила прирученных животных, живущих за счёт тех же зелёных растений, а потом — энергия текущей воды и ветра. Это открыло второй (помимо биологического — через фотосинтез к животному) канал преобразования радиации Солнца в механическую энергию. С медного века (третье тысячелетие до н.э.) и до заката Римской империи (IV век н.э.) такая энергетика устойчиво обеспечивала до 6 ГДж на человека в год в земледельческих цивилизациях и до 4,5 ГДж для остального населения Земли, возросшего за это время в 30 раз [1].

Происшедшая около трёхсот лет назад индустриальная революция была вызвана открытием методов преобразования тепловой энергии в механическую работу. Она создала третий канал преобразования солнечной радиации в тепловую и механическую энергию — через химическую энергию горючих ископаемых (угля, нефти и природного газа), которые запасли её через фотосинтез миллионы лет назад. Этот недешёвый, но огромный источник высококонцентрированной энергии разительно изменил нынешний облик мира, вызвав бурный рост населения и беспрецедентно быстрое развитие цивилизации.

Но лишь спустя полтора века, в последней четверти XIX в., химическая реакция получения энергии при сжигании ископаемых топлив



превратилась в основной источник энергии индустриального мира (рис. 1). А энергетическая статистика, восста-

новленная с 1860 г., обнаружила "длинные волны" развития мировой энергетики [1].

Первая волна длилась 70 лет, до разгара великой депрессии (1929–1933 гг.), и увеличила мировую энергетику в 4,5 раза (см. рис. 1) — от 0,36 до 1,6 млн тонн нефтяного эквивалента (т.н.э.)<sup>1</sup> при утроении среднего по миру душевого производства энергии — от 0,29 т.н.э. до 0,7–0,8 т.н.э. (соответственно 13 и 31–36 ГДж) в год. На смену дровам и двигательной силе животных пришли уголь и работающие на нём паровые машины, а в последней трети этой волны получили распространение двигатели внутреннего сгорания, что подорвало доминирование угля в мировом производстве энергоресурсов (62% в 2015–2020 гг.) из-за ускоренного роста использования нефти (рис. 2). Но ещё более важным событием первой волны стал технологический прорыв в преобразовании не только химической (гальванические элементы), но и механической энергии в электрическую и её передаче на большие расстояния. Этим была заложена энергетическая база не только индустриального, но и постиндустриального общества.

Вторая волна протяжённостью 50 лет увеличила производство энергоресурсов ещё в 4,5 раза (с 1,6 до 7,3 млн т.н.э. (см. рис. 1)) при очередном удвоении среднедушевого энергопроизводства до 1,65 т.н.э. (75 ГДж) и завершилась около 1980 г. нефтяным кризисом. Это был подлинный "век моторов" и доминирования нефти в общем производстве энергоресурсов — её доля увеличилась с 11% до 47% в 1975 г., но после нефтяного кризиса стала снижаться при росте доли угля

<sup>1</sup> 1 тонна нефтяного эквивалента равна 44,76 ГДж, или  $10^7$  ккал.

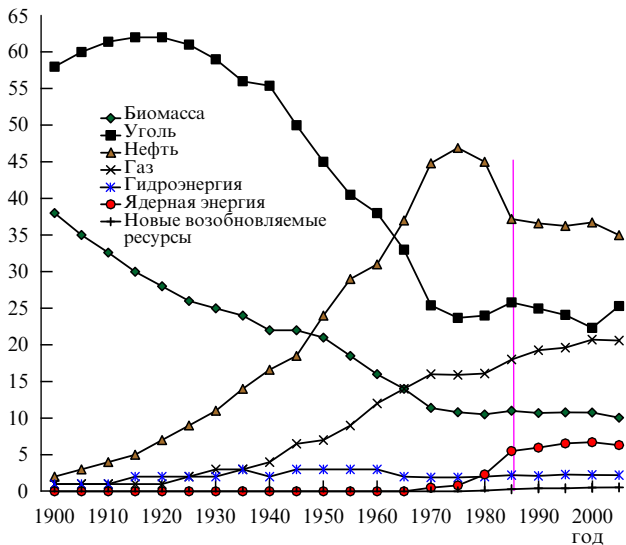
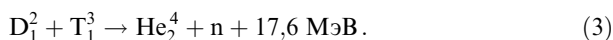


Рис 2. Структура мирового производства энергоресурсов, %.

и атомной энергии (см. рис. 2). Промышленное применение первого "внесолнечного" источника энергии — деления атомов — стало главным технологическим прорывом этого периода. Тогда же начались эксперименты по военному и затем мирному освоению управляемого термоядерного синтеза.

Речь идёт о практически неисчерпаемом источнике энергии звёзд (и нашего Солнца), возникающем при экзотермическом слиянии ядер лёгких (легче железа) элементов. На Солнце (согласно Г. Бэте) — это гелиевый цикл, в котором четыре протона превращаются в ядро He<sup>4</sup> с выделением 26,7 МэВ энергии. В земных условиях исследования нацелены на практическую реализацию более низкороговой реакции синтеза дейтерия и трития



Третья волна отождествляется со становлением постиндустриального общества и качественно отличается от предыдущих. Во-первых, на протяжении большей её части (до 2002 г.) впервые в индустриальную эпоху среднечеловечье производство энергии в мире практически не изменялось (1,56–1,68 т.н.э., или 70–75 ГДж в год), и в случае окончания этой волны около 2010 г. из-за экономического кризиса рост мировой энергетики будет почти втрое меньшим, чем в каждой из предшествующих волн. Во-вторых, с началом этой волны быстрая циклическая перестройка производственной структуры мировой энергетики сменилась её плавной эволюцией с уменьшением доли нефти в пользу экологически наиболее благоприятных энергоресурсов — природного газа и новых возобновляемых источников энергии (см. рис. 2).

Рисунки 1 и 2 показали динамику и структуру производства первичной энергии, но подлинным назначением антропогенной энергетики является удовлетворение потребностей общества в энергии, непосредственно используемой в производственных процессах и при жизнедеятельности людей. На пути к этой финальной энергии первичные энергоресурсы проходят несколько стадий преобразований, неизбежно сопровождающихся потерями. На рисунке 3 [2] основные потоки энергии представлены предельно агрегировано — от главных ресурсов первичной энергии через их преобразование в основные энергоносители (электроэнергия, пар и горячая вода, разные виды бытового, технологического и моторного топлива) до получения финальной энергии в процессах её непосредственного использования (средне-, низко- и высокотемпературные процессы, силовые станции и мобильные процессы и др.); в действительности энергетические потоки гораздо более многообразны и быстро усложняются во времени.

С середины XX в. в большинстве индустриальных стран и по миру в целом финальная энергия составляет только 37–39 % от первичной, что даже меньше коэффициента использования энергии первобытного костра в

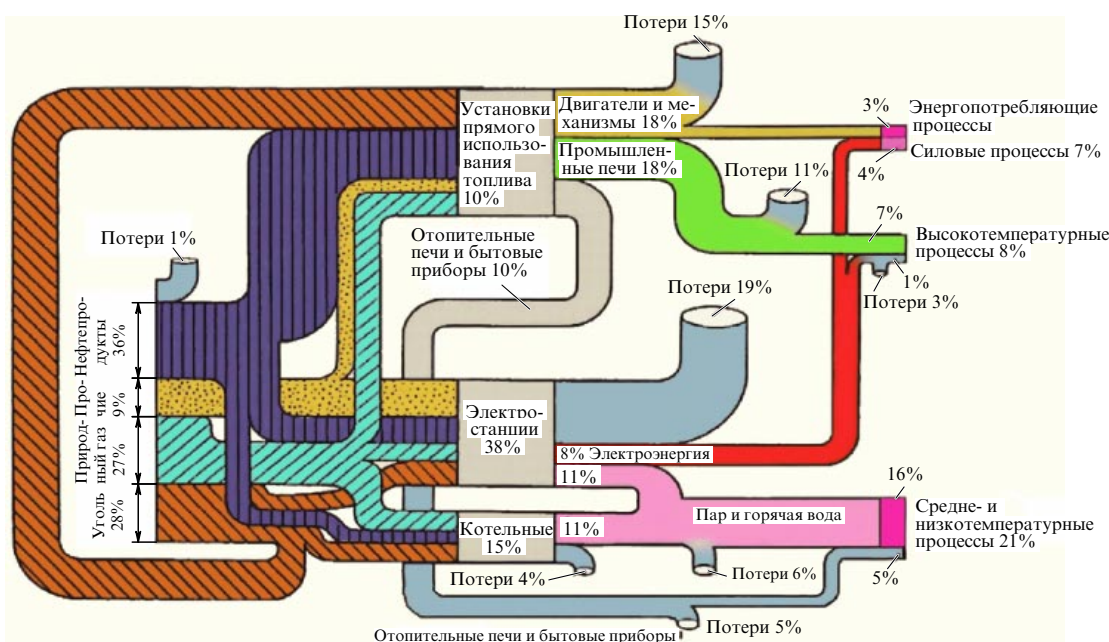
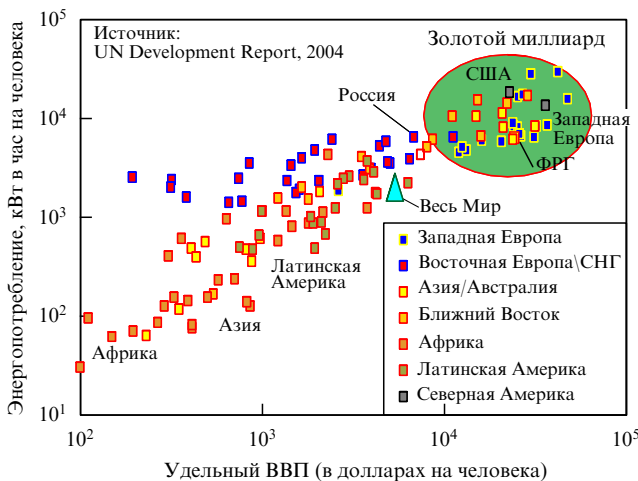


Рис. 3. Укрупнённая схема потоков преобразования энергии (по [5]).





**Рис. 4.** Связь между ВВП и энергопотреблением на душу населения. До 1970-х годов: на 1 % роста ВВП — 1 % роста энергопотребления, сейчас 0,3–0,5 %.

пещере. Этот парадокс объясняется действием противоположных тенденций: постоянное повышение к.п.д конкретных технологий преобразования энергии нивелировалось всё более высокими требованиями к качеству используемой энергии, которые обеспечиваются с большими потерями энергии (меньшими к.п.д. процессов  $\eta$ ). Действительно, 1 МДж тепла в помещении можно получить сжиганием топлива с  $\eta = 0,9–0,95$ , то же количество энергии при плавке металлов получим с  $\eta = 0,45–0,5$ , при производстве электроэнергии  $\eta = 0,35–0,42$ , а в автомобиле лишь  $\eta = 0,25–0,3$ . В то же время с середины прошлого века доля отопления в конечном энергопотреблении мира уменьшилась втрое при удвоении мобильных процессов и росте электрофизических и электрохимических процессов почти на порядок. Нарушить сложившееся равновесие и перейти к устойчивому возрастанию общего коэффициента использования энергии как основного индикатора НТП в энергетике — одна из главных задач её инновационного развития в предстоящий период.

Другая задача состоит в смягчении большой неравномерности обеспечения энергией населения разных стран и регионов. П.Л. Капица, по-видимому, первым обратил внимание на связь между уровнем экономического развития страны и её энерговооружённостью: на протяжении большей части XX в. (до начала 1970-х годов) по миру в целом и во многих странах валовой внутренний продукт (ВВП) и потребление первичной энергии возрастали практически одинаковыми темпами. Однако с движением к постиндустриальному обществу эта синхронность всё больше нарушается из-за повышения роли качества (а не только количества) используемой энергии. Тем не менее рис. 4 [3] демонстрирует хорошую корреляцию индекса развития человека (учитывающего продолжительность жизни, образование, удельный ВВП) с его энерговооружённостью в разных странах. Видно, что высших показателей добились (вошли в так называемый золотой миллиард) только страны, сумевшие создать у себя мощную и современную энергетику. Вместе с тем сейчас около 2 млрд человек на Земле не имеют доступа к электроэнергии и 3 млрд испытывают её недостаток. Устранение столь вопиющего неравенства должно стать задачей будущего.

### 3. Перспективы мировой энергетики

Предвидеть будущее в конкретных деталях невозможно, и даже предсказание основных тенденций — занятие рискованное, но необходимое для принятия широкого круга ответственных решений, особенно столь долгосрочных, как создание новых технологий, освоение топливных баз (например, шельфов морей, в том числе арктических), развитие энергетических систем и другой инфраструктуры и т.п. В современных условиях неопределённость будущего усугубляется тем, что мировая энергетика переживает очередную бифуркацию: первый глобальный экономический кризис (один из главных симптомов которого — лопнувший "пузырь" цены нефти) прервал начавшееся очередное ускорение роста мирового энергопотребления. Поэтому, не претендуя здесь на глобальные обобщения, мы ограничимся анализом основных определяющих факторов развития энергетики — возможной динамикой потребностей общества в энергии и выдвигаемых им ограничений (прежде всего экологических), доступных человечеству (по приемлемой цене) энергетических ресурсов, прогресса энергетических технологий, — осуществляя системную взаимосвязку этих трёх составляющих в приемлемых и посильных для общества сценариях развития энергетики.

#### 3.1. Спрос на энергоресурсы

Динамику спроса на энергоресурсы определяет в первую очередь рост благосостояния населения. На волне экономического либерализма международные организации в последнее десятилетие давали всё более оптимистические прогнозы ВВП, а вслед за этим повышались и прогнозы энергопотребления (рис. 5). Так, в последнем базовом сценарии Международного энергетического агентства (МЭА) [4, 5] спрос на энергию с 2005 г. должен увеличиться более чем в полтора раза к 2030 г. и почти удвоиться к 2050 г. И хотя мировой экономический кризис скорректирует эти прогнозы в сторону уменьшения, такой рост энергопотребления представляется тупиковым.

Действительно, с переходом в 1980-х годах к постиндустриальному развитию, казалось, возникла обнадеживающая тенденция стабилизации среднемирового энергопотребления на душу населения, но за последние годы оно опять быстро возросло и восходящая тенденция продолжается в базовом сценарии МЭА (см. вставку на рис. 5). Сохранение душевого потребления на среднем уровне конца XX в. (см. гипотетический сценарий на рис. 5) уменьшило бы прирост спроса на энергию втрое, что, наверное, утопично. Но представляется достаточно реалистичным (с учётом необходимого повышения благосостояния и энергообеспеченности населения развивающихся стран) показанный на рис. 5 целевой сценарий с почти двойным замедлением роста душевого энергопотребления. Это невозможно без снижения потребительских устремлений так называемого золотого миллиарда в развитых странах и замедления их возрастания в развивающихся странах. Будем надеяться, что переживаемый мировой кризис заставит выработать экономические и социальные меры ухода от потребительской парадигмы развития общества, но без существенной потери напряжённости и продуктивности деятельности людей, которые сегодня всемерно поощряются в развитых странах доступностью потребительских кредитов и

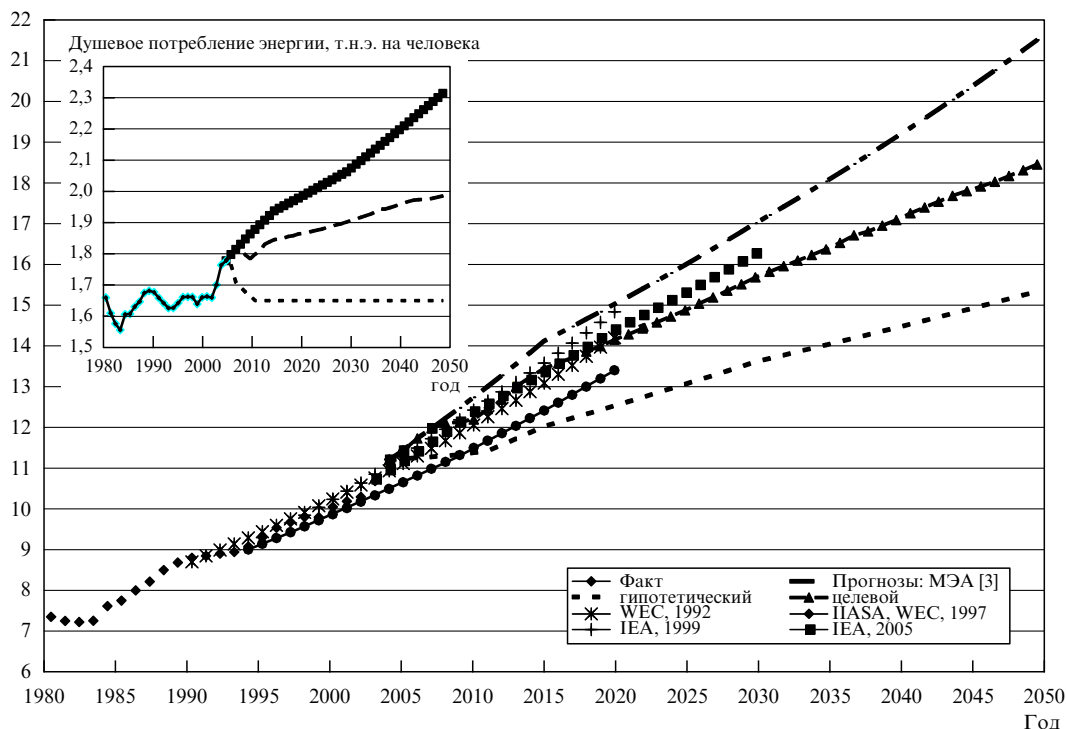


Рис. 5. Прогнозы энергопотребления, млрд т.н.э. (WEC — World Energy Council, IEA — International Energy Agency, IIASA — International Institute for Applied Systems Analysis).

наказываются жёсткими мерами за их невозвращение. Это замедлило бы рост энергопотребления почти в полтора раза, облегчая нагрузку на энергетику и окружающую среду.

Не желая ограничивать себя в расходе энергии, общество вместе с тем выдвигает всё более жёсткие экологические требования к энергетике. В ответ с переходом к постиндустриальному развитию были созданы энергетические технологии, позволившие без существенного удорожания уменьшить до приемлемых уровней негативные локальные воздействия энергетики на окружающую среду. Современные технологии практически устранили когда-то очень острую проблему кислотных дождей и загрязнений атмосферы твёрдыми частицами. И хотя они ещё не получили повсеместного применения, в научно-техническом плане проблему локальных загрязнений можно считать взятой под контроль. Но взамен в полный рост встала проблема глобальных экологических воздействий антропогенной энергетики.

Эта проблема имеет несколько аспектов. Прямое тепловое влияние антропогенной энергетики на тепловой баланс Земли пока ещё исчезающе мало по сравнению с влиянием энергии солнечного излучения, достигающей поверхности Земли. Согласно [3] она составляет 3 % от изменений инсоляций, вызванных периодическим изменением земной орбиты и порядка 0,1 % от изменения солнечного излучения в 11-летнем цикле. Но уже серьёзным может оказаться воздействие энергетики на химический состав атмосферы через изменение углеродного цикла и глобального теплового баланса вследствие парникового эффекта [3]. Этот, предсказанный С. Аррениусом более 100 лет назад, эффект напрямую вмешивается в один из фундаментальных циклов, на которых построена жизнь на Земле, и поэтому является предметом наиболее пристального внимания энергетиков и

климатологов, политиков и бизнесменов (торговля квотами на выбросы парниковых газов и т.п.).

Согласно [3] в процессе фотосинтеза зелёные растения поглощают из атмосферы примерно 100 Гт углерода и столько же выбрасывают обратно при своём разложении. Приблизительно столько же (90 Гт) даёт планктон в океане. Полное количество углерода в биомассе оценивается в 220 Гт, а в океане углерода почти в 200 раз больше, и он ежегодно забирает из атмосферы около 2 Гт углерода. Геологические источники углерода (например, вулканы) интегрально невелики (около 0,1 Гт в год), но дают опасные залповые выбросы.

Антропогенная энергетика выбрасывает около 5,5 Гт углерода в год, из них 2 Гт поглощает океан, а примерно 0,2 Гт — леса и другая растительность. Естественные способности биосферы, вероятно, компенсируют только около 40 % антропогенных выбросов углерода, и его концентрация в атмосфере возрастает, создавая серьёзные барьеры для развития энергетики. Если к 2050 г. энергопотребление удвоится (см. рис. 5), то энергетика выделит в атмосферу 400 Гт углерода и увеличит его содержание с 750 Гт до 1000 Гт. Вряд ли экосистема Земли справится с такой нагрузкой.

По сути, энергетика в течение нескольких столетий возвращает в атмосферу и океаны углерод органического происхождения, накопленный в осадочных породах в течение нескольких миллионов лет [2]. Это рискованный эксперимент с плохо предсказуемым результатом. Поэтому глобальная задача инновационного развития отрасли — ограничить выбросы органического топлива или попытаться вообще уйти от углеродной энергетики.

Требование глобальной экологической безопасности определяет динамику (через энергоэкономный образ жизни (см. целевой сценарий на рис. 5)) и структуру антропогенной энергетики, а в конечном итоге то, во

что она будет обходиться обществу. Действительно, по базовому сценарию МЭА порождаемая энергетикой эмиссия парниковых газов с 2005 г. по 2050 г. возрастёт от 28 до 62 млрд тонн  $\text{CO}_2$  (что повысит температуру Земли на  $6^\circ\text{C}$  от сегодняшнего уровня), и на такое развитие мировой энергетики до 2050 г. потребуется 65 трлн долларов. Для уменьшения эмиссии парниковых газов в 2050 г. более чем вдвое (с возвращением к уровню 2005 г.) потребуется дополнительно 17 трлн долларов капиталовложений, а для её сокращения ещё наполовину (до 14 млрд тонн  $\text{CO}_2$ , что по существующим оценкам обеспечит стабилизацию климата планеты) нужны почти вдвое большие капиталовложения [5]. Важнейшая междисциплинарная задача науки — не только определиться с реальностью угрозы климату от эмиссии парниковых газов, но и выработать наиболее эффективные меры противодействия, включая научные основы и методы геоинженерии. В противном случае сохранение климата посредством снижения эмиссии парниковых газов почти удвоит капиталовложения в энергетику — с 65 до 115 трлн долларов.

### 3.2. Обеспеченность энергоресурсами

Беспрецедентный взлёт цен топлива накануне глобального экономического кризиса в очередной раз актуализировал столетнюю дискуссию о том, способны ли природные ресурсы Земли обеспечить возрастающие потребности в энергии. Наглядно положительный ответ даёт приведённое на рис. 6 сравнение современного годового энергопотребления мира с доступными на Земле запасами разных видов энергоресурсов, а количественные данные приведены в табл. 1. Из них следует, что за последние 150 лет использовано 8 % традиционных (доступных современным технологиям) ресурсов органического топлива и лишь 2 % его общих запасов на Земле, если учесть нетрадиционные ресурсы, требующие, однако, применения новых технологий. Следовательно, даже при удвоении энергопотребления в каждое из следующих полстолетий человечество за два века не сожжёт и половины всех ресурсов органического топлива. Особенно это относится к богатой энергоресурсами России, на жителя которой их приходится в 10–11 раз больше, чем в среднем по планете [7].

Широкое применение новых технологий использования солнечной, ядерной (с реакторами-размножителями и вторичным топливным циклом) и в перспективе —

Суммарные энергетические ресурсы

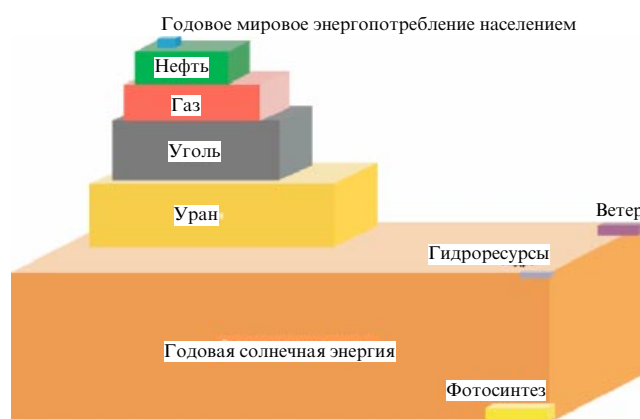


Рис 6. Соотношение потенциально доступных на Земле энергетических ресурсов. (Источник: National Petroleum Council, 2007, after Craig, Cunningham and Saigo).

термоядерной энергии даст окончательное решение энергетической проблемы человечества на "загоризонтную" многовековую перспективу. В этом, несомненно, состоит историческая миссия физики перед человечеством — освобождение его от предсказываемой многими "энергетической смерти". И тогда существование нашей цивилизации и вообще жизни на Земле (если отвлечься от мрачных сценариев типа ядерных войн и масштабных эпидемий) будет определяться не истощением земных энергетических ресурсов, а глобальными процессами космической эволюции Солнца — главного нашего энергоисточника. Согласно современным представлениям [8] Солнце является заурядной звездой класса "жёлтый карлик", в котором основное энерговыделение идет за счёт гелиевого и углеродно-азотного термоядерного циклов. Время стабильного термоядерного горения Солнца составит ещё около 5 млрд лет, после чего Солнце будет расширяться, а его поверхность коснётся орбиты Земли, убив всё живое.

Таким образом, угрозы общей нехватки энергоресурсов на Земле нет, но существует реальная проблема истощения запасов дешёвой нефти. Как показано в табл. 1, за прошедшие полтора века использована треть ресурсов традиционной нефти, и это была самая дешёвая нефть. В последнее десятилетие сложилось нарастающее

Таблица 1. Доступные ресурсы органического топлива и ядерного горючего\*, млн т.н.э.

Энергоресурсы	Нефть и конденсат	Естественный газ	Газовые гидраты	Уголь	Итого топливо	Уран и др.	Реакторы-размножители	Всего
Извлечённые	146	66		159	371	27		398
Доказанные	150	141		606	897	57	3390	4344
Возможные	145	279		2800	3224	203	12150	15577
Итого традиционные**	441	486	0	3565	4494	287	1540	20319
Использовано, %	33	14		4	8	9		2
Нетрадиционные***	525	850	18650		20025	150	8900	29075
Всего ресурсы	966	1336	18650	3565	24519	437	4440	49396
Использовано, %	15	5		4	2	6		1

\* По данным Energy Information Administration US 2007, *British Petroleum* (2007).

\*\* Ресурсы, доступные по приемлемой цене при использовании современных технологий.

\*\*\* Ресурсы, освоение которых будет экономически приемлемым только при использовании новых технологий.



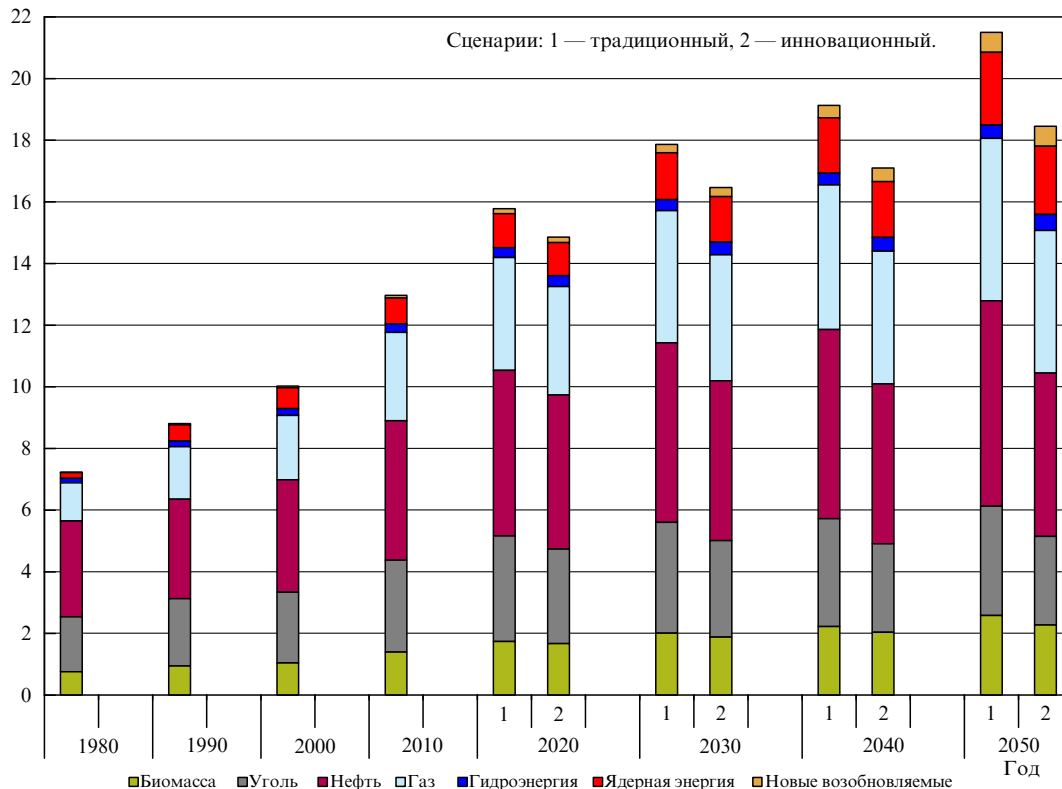


Рис. 7. Прогнозы мирового производства энергоресурсов, млрд т.н.э.

отставание подготовки запасов нефти от объёмов её добычи и сильное недофинансирование отрасли в целом. К сожалению, на очереди и природный газ, традиционные ресурсы которого использованы к настоящему времени на 14 % (см. табл. 1).

Несмотря на высокий процент извлечения, прогнозируется продолжение сложившегося тренда добычи нефти и при большом разбросе прежних оценок в последние базовые прогнозы МЭА закладывается её возрастание на 50 % к 2050 г. (рис. 7). Предусматривается также ускорение роста добычи природного газа почти вдвое к 2050 г. Хотя прогнозы добычи нефти и газа периодически корректируются в сторону снижения, органическое топливо останется основой мировой энергетики, обеспечивая по базовому сценарию до середины века современные 55–56 % общего производства первичной энергии (см. вставку на рис. 7).

Увеличение добычи нефти не может опираться на разрабатываемые сейчас запасы — они обрушат её втрое уже к 2020 г. Вовлечение в разработку уже разведанных запасов позволит поддерживать сегодняшнюю добычу до 2015–2020 гг. Следовательно, практически весь прогнозируемый прирост придётся обеспечивать прогнозными традиционными, а затем и нетрадиционными ресурсами нефти. Это требует новых методов разведки и освоения месторождений углеводородов на суше и шельфе (включая подлёдную добычу), которые позволили бы увеличить экономически приемлемые запасы углеводородов в 1,7 раза к 2030 г. и утроить их к 2050 г. Без этого рост добычи нефти остановится и перейдёт в падение через 10–15 лет, а газа — через 20–25 лет, что резко повысит требования к технологической перестройке энергетики и, вероятно, замедлит развитие мировой экономики.

Основная добыча нефти по-прежнему будет сосредоточена на Ближнем Востоке (с возрастанием от 1,7 млрд тонн в 2005 г. до 5–6 млрд тонн к 2050 г.), а остальная её часть распределится примерно поровну между странами бывшего СССР, Африкой и Южной Америкой. Неравномерность распределения энергоресурсов делает необходимым создание межгосударственных, трансконтинентальных и глобальных систем энергетики. В ближайшие десятилетия действующую нефтяную систему дополнит глобальная газовая (рис. 8) система.

### 3.3. Научно-технический прогресс в энергетике

Обсудим кратко ряд инновационных энергетических направлений.

Научно-технологический прогресс в энергетике аккумулирует достижения и является одним из важнейших каналов практической реализации результатов фактически всех наук, которые и создают идейные и научно-технические базовые условия для инновационного развития энергетической основы человечества. На примере теплоэнергетики это иллюстрирует рис. 9. Результаты одних наук (прежде всего, наук об экономике и экосфере) влияют на требования общества к развитию энергетики, другие (геология, биология, физика) определяют доступные энергоресурсы, третьи (физика, химия, механика) создают конкретные предпосылки для энергетических инноваций, четвёртые (математика, информационные технологии, процессы управления) обеспечивают управляемость и устойчивость создаваемых энергетических технологий и энергосистем.

Инновации в энергетике имеют ярко выраженный интернациональный характер и глобальные тренды. Рассмотрим их на основе последнего технологического прогноза МЭА [5], подготовленного по результатам



Рис. 8. Газовая система Евразии.

двухлетних исследований, проведённых почти 2000 специалистами из стран, входящих в Организацию экономического сотрудничества и развития (ОЭСР)<sup>2</sup>. Приоритетными признаны восемь классов ключевых технологий производства энергии (табл. 2) в составе более 120 новых технологий и девять классов (почти 170 новых технологий) использования энергии. Для каждого класса технологий разработаны достаточно подробные "дорожные карты" их включения в инновационную энергетику со сроками и объёмами научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), размерами использования и требуемыми на это капиталовложениями. В частности, для электроэнергетики разработана дорожная карта мер по сохранению выбросов CO<sub>2</sub> на уровне 2005 г. при среднегодовом росте производства электроэнергии примерно на 5% (примерно 110 ГВт в год) путём ежегодного ввода:

- 30 станций на угле с улавливателем CO<sub>2</sub> по 500 МВт — 15 ГВт в год;
- 24 атомных станций по 1000 МВт — 24 ГВт в год;
- 30 гидростанций по 500 МВт — 15 ГВт в год;
- 5000 ветровых турбин по 4 МВт — 20 ГВт в год;
- 45 CSP-станций (Concentrated Solar Power) по 250 МВт — 12 ГВт в год;
- солнечных панелей общей площадью  $115 \times 10^6 \text{ м}^2$  — 17 ГВт в год.

В таблице 2 приведены выделенные МЭА классы ключевых технологий и необходимые для их реализации

затраты только на исследования и разработки. Для возвращения в период до 2050 г. эмиссии парниковых газов к уровню 2005 г. потребуется от 4,5 до 5,5 трлн долларов, причём главным образом на технологии производства электроэнергии. Сокращение эмиссии ещё вдвое для стабилизации климата планеты утроит эти затраты, что в основном связано с транспортными технологиями.

Таким образом, "парниковая угроза" обещает мировому научному сообществу 15 трлн долларов, что почти вдвое больше затрат на исследования и разработки в военных целях в случае сохранения их текущих годовых объёмов. Неудивительно, что такие перспективы встречают горячий отклик в определённых кругах.

В прогнозе МЭА сделан вывод о том, что технологии, уже доведённые до стадии опытно-промышленной проверки, способны решить стоящие перед энергетикой задачи, как минимум, до 2030 г. Казалось бы, проблема инновационного развития энергетики на данном этапе решена.

Но следует подчеркнуть, что этот технологический пакет МЭА целиком ориентирован на конъюнктуру западных энергетических рынков, причём две трети этих технологий (по стоимости) направлены на агрессивное снижение эмиссии парниковых газов. Как будет показано ниже, приоритеты и, главное, технико-экономические характеристики этих технологий в значительной мере не являются рациональными для энергетики России.

Нарастающий поток возможных энергетических технологий создаётся на основе фундаментальных достижений физики, химии, а теперь и биологии такими физико-техническими дисциплинами, как электрофизика и электротехника, теплофизика и теплотехника, гидравлика и гидротехника, атомная физика и техника. В этом состоит существо исследований и основа технологического про-

<sup>2</sup> По целям, масштабу и методологии они близки к энергетическому разделу разработанной в 1980-е годы под руководством сначала В.А. Котельникова и затем А.И. Анчишкина "Комплексной программы научно-технического прогресса СССР". Эти исследования, конечно же, нужно возобновить в России в новых социально-экономических условиях, на новом уровне знаний и методологии.

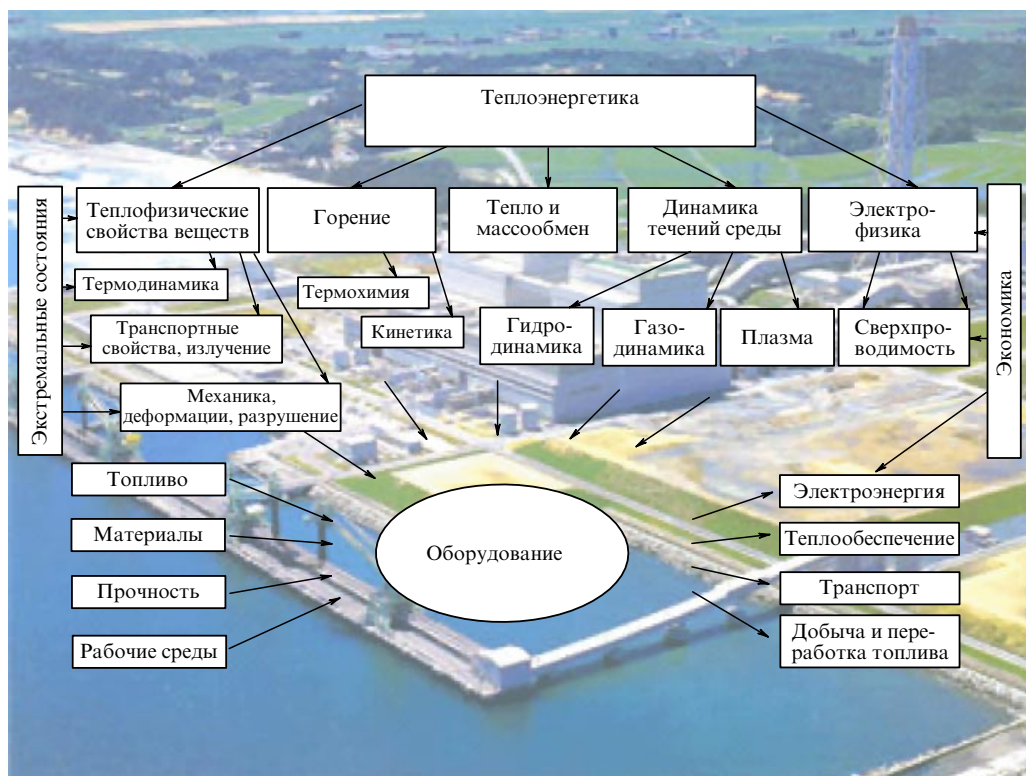


Рис. 9. Научно-технические аспекты теплоэнергетики.

Таблица 2. Затраты на исследования и разработки по ключевым технологиям в энергетике, в трлн долларов США, 2007 г. [1, табл. 3.1]

Ключевые технологии в энергетике	Исследования и разработки	
	ЭПГ1*	ЭПГ2**
Производство электроэнергии	3,2–3,8	3,9–4,5
Атомные электростанции	0,6–0,75	0,6–0,75
Ветровые электростанции	0,6–0,7	0,6–0,7
Угольные установки с суперсверхкритическими параметрами пара	0,35–0,4	0,35–0,4
Парогазовые электростанции с внутрицикловой газификацией угля	0,35–0,4	0,35–0,4
Парогазовые электростанции с газификацией биомассы	0,1–0,13	0,1–0,13
Преобразователи солнечной энергии в электрическую	0,2–0,24	0,2–0,24
Концентраторы солнечной энергии	0,3–0,35	0,3–0,35
Улавливание и захоронение CO <sub>2</sub> на тепловых электростанциях	0,7–0,8	1,3–1,5
Сооружения, здания	0,32–0,42	0,32–0,42
Энергоэффективные здания и бытовые приборы	Нет данных	Нет данных
Тепловые насосы	0,07–0,12	0,07–0,12
Солнечное отопление и нагрев воды	0,25–0,3	0,25–0,3
Транспорт	0,26–0,3	7,6–9,2
Энергоэффективные транспортные средства	Нет данных	Нет данных
Биотопливо второго поколения	0,09–0,12	0,09–0,12
Электрический и подключаемый к сети транспорт	0,17–0,2	4–4,6
Транспорт на водородных топливных элементах	Нет данных	3,5–4,5
Промышленность	0,7–0,9	1,4–1,7
Улавливание и захоронение CO <sub>2</sub> в промышленности, производство водорода, синтетического топлива	0,7–0,9	1,4–1,7
Энергоэффективные промышленные двигатели	Нет данных	Нет данных
Итого	4,5–5,4	13,2–15,8

\* Сокращение эмиссии парниковых газов (ЭПГ) в 2050 г. до уровня 2005 г. (28 млн тонн эквивалента CO<sub>2</sub>).

\*\* Сокращение ЭПГ в 2050 г. до безопасного уровня (14 млн тонн эквивалента CO<sub>2</sub>).

гресса в энергетике, и по грубым оценкам на них приходится до 70 % научных усилий в этой области.

Подавляющая часть электроэнергии в XXI в. будет по-прежнему производиться сжиганием органического топлива на тепловых электростанциях. По-видимому, на обозримые десятилетия наиболее перспективным здесь останется парогазовый (или комбинированный) цикл, основанный на последовательном применении газотурбинных и парогазовых установок (ПГУ). Достигнутые сегодня к.п.д. в 58–62 % могут быть повышены до 75–80 % путём введения в цикл высокотемпературных топливных элементов, улучшением охлаждения лопаток воздухом и водяным паром, применением высокопрочных высокотемпературных материалов и барьерных покрытий, улучшением газодинамики лопаточной и проточной частей, применением физико-химических и электрофизических методов управления процессом горения, т.е. использованием всего научного арсенала современной высокотемпературной теплофизики. Создаются ПГУ на угле с применением различных методов газификации угля — внутрицикловой или в кипящем слое. Это особенно важно для России, в Европейской части которой 70 % топлива электростанций — это природный газ, сжигаемый пока в неэффективном паросиловом цикле с к.п.д. всего 38–40 %. Уголь может быть эффективным топливом и в обычных циклах Рэнкина, работающих при сверхкритических параметрах пара ( $T \approx 600–650^\circ\text{C}$ ,  $P \approx 300–350$  атм) с к.п.д. 47 % [6].

Несомненно, развитие получат топливные элементы и "электротехнологические" установки для получения из твёрдого топлива жидкого топлива, калорийного газа и т.п.

Основные альтернативные источники энергии — это гидроэнергетика, солнечная энергия, биоэнергетика, экзотермические ядерные реакции. Иные источники (энергия ветра, океанские приливы, геомагнитные источники), хотя и имеют определённое локальное значение, вряд ли смогут стать значительными в глобальном масштабе. Тем более, что структура мирового электропотребления такова, что около 50 % энергии должно поставляться потребителю в постоянном (базовом) режиме. Для многих альтернативных источников это предполагает рекуперацию энергии и соответственно необходимость удвоения или утроения мощности в период их активной работы.

Так, солнечная электростанция со средней мощностью 1 ГВт должна иметь пиковую мощность 3–4 ГВт и гидроэлектростанцию мощностью порядка 1 ГВт с площадью водохранилища примерно 30–40 км<sup>2</sup>. В качестве альтернативы здесь возможно использование солнечной энергии для производства водорода. В целом, солнечная энергетика сейчас активно развивается как с использованием полупроводниковых фотопреобразователей, так и тепловых машин. В первом из этих направлений достигнуты впечатляющие результаты — к.п.д. каскадных гетероструктур третьего поколения, использующих большую часть солнечного спектра, находится на уровне 40–50 %.

В качестве интересной, но не близкой перспективы здесь рассматриваются масштабные проекты по размещению фотоэлектрических преобразователей в космосе на солнечно-синхронных орбитах с передачей вырабатываемой энергии по сверхвысокочастотным (СВЧ) энергетическим каналам на Землю. Такой проект пред-

полагает применение самых современных энергетических и космических технологий, а также масштабное международное сотрудничество.

Гидроэнергия составляет 21 % от глобальной электроэнергии, её развитие определяется имеющимися гидроэнергетическими ресурсами и, поскольку большинство из наиболее привлекательных гидроэнергетических ресурсов уже освоено, мощность гидроэлектростанций (ГЭС) будет находиться на уровне 1,5–1,7 ТВт. Перспектива здесь связывается с реализацией новых масштабных проектов (для России — в Сибири и на Дальнем Востоке), а также с созданием современных гидрогенераторов с гигаваттной мощностью и переменной скоростью вращения. Масштабная гидроэнергетика имеет хорошие перспективы в сочетании с развитыми линиями электропередач для переброски вырабатываемой энергии в европейскую часть России в моменты максимумов дневного энергопотребления.

Перспективы использования биомассы в энергетике как наиболее древнего способа получения энергии во многом зависят от успехов биоинженерии в производстве высокопродуктивных зелёных растений и создании способов их переработки в топливо. При этом необходимо, чтобы полученная из биомассы энергия топлива превышала энергетические затраты на выращивание растений. Сегодня на выращивание сельскохозяйственной продукции с энергетическим эквивалентом 1 ГДж необходимо затратить не менее 3 ГДж топлива [3]. Достижения биологии и химии дают научную основу для конверсии биомассы разных видов в жидкое высококачественное и газовое топливо с помощью ферментации, для создания новых видов целлюлозосодержащих культур с повышенной продуктивностью, не конкурирующих с пищевыми культурами, и других технологий биоэнергетики. Важно, что этот способ получения энергии не нарушает углеродного баланса, изменяя, однако, азотный и фосфорный циклы. Согласно [3] к середине века биоэнергетика сможет дать до 3,5 Гт углерода (3,5 % от углерода, связываемого растениями Земли), перерабатывая 18–22 Гт биомассы и обеспечивая около 12 % общих потребностей в энергии. Но развитие биоэнергетики может ограничиваться конкурентным спросом на землю и удобрения со стороны сельскохозяйственных производителей.

На основе достижений химии и наук о материалах разрабатываются технологии получения жидкого топлива из газа, угля, сланцев и особенно из биомассы, а также методы и средства прямого преобразования химической энергии в электрическую. Использование электроэнергии, как известно, началось с гальванических элементов. Ныне мощность химических аккумуляторов превышает мощность всех электростанций Земли, а впереди — развитие топливных элементов для транспорта и распределённой энергетики. Особый интерес представляют суперконденсаторы повышенной ёмкости с малым временем накопления и выделения электроэнергии.

В качестве весьма привлекательных кандидатов для базовой энергетики вновь рассматриваются атомные электростанции (АЭС), использующие энергию цепного деления тяжёлых ядер. АЭС поставляют в мировую энергетику около 6 % от всей производимой энергии (15 % электроэнергии, в России — 16 %, во Франции — до 70 %). В последние годы здесь наблюдается большой

прогресс в повышении безопасности АЭС посредством введения активных и пассивных средств безопасности. Сегодня ядерные энерготехнологии рассматриваются как высокобезопасные и экологически чистые. Сценарий МЭА предполагает увеличение мощности атомных реакторов в 2030 г. с теперешних 370 ГВт до 433 ГВт [4].

В ближайшие 20–30 лет наибольшее развитие должны получить корпусные реакторы с водяным теплоносителем, реакторы на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем и высокотемпературные реакторы с гелиевым теплоносителем. Параллельно идут работы по созданию оксидных и нитридных топлив нового поколения, рассчитанных на более высокие уровни выгорания и улучшенные характеристики безопасности.

Известная осторожность в развитии ядерной энергетики связана с проблемой нераспространения ядерных материалов, пригодных для создания ядерного оружия, и с долгоживущими радиоактивными отходами. Перспектива здесь — за реакторами с повышенной (внутренней) безопасностью и реакторами на быстрых нейтронах с расширенной наработкой ядерного горючего и замкнутым ядерным циклом с вовлечением в него запасов урана-238, а затем и тория-232. Отметим хорошие перспективы реакторов деления с внешней нейтронной подсветкой, обладающих полной внутренней безопасностью.

Интересные перспективы имеет использование ядерных реакторов для наработки водорода, используемого затем как экологически чистый энергоноситель в электроэнергетике и на транспорте.

Более чем 50-летний период интенсивных исследований управляемого термоядерного синтеза (УТС) привёл к началу практической реализации этого безуглеродного и, по существу, неисчерпаемого источника энергии. Речь идёт о воспроизведении в земных условиях реакций УТС лёгких элементов, дающих энергию звёздам и нашему Солнцу. Для этого необходимо в земных условиях разогреть плазму до гигантских температур и удерживать её в течение определённого времени. Здесь конкурируют два подхода: использование термоядерных устройств с магнитным и инерционным удержанием плазмы. В обоих направлениях в последние годы достигнут впечатляющий прогресс, позволяющий перейти в энергетике к практическому применению термоядерной энергии.

В УТС с магнитным удержанием горячей плазмы в замкнутых тороидальных системах токамак сразу на трёх установках JET (Joint European Torus) (Европа), JT60-U (Япония) и PLT (Princeton Large Torus) (США) получены условия, при которых подводимая к плазме энергия близка к энерговыделению от термоядерных реакций [3]. Это позволило перейти к строительству международного термоядерного реактора ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) стоимостью до 13 млрд долларов (ввод в действие в 2017 г., срок эксплуатации примерно 25 лет), на котором будет достигнута термоядерная мощность 500 МВт, а энерговыделение от реакции синтеза должно превысить энергозатраты на нагрев и удержание плазмы в 10 раз. Основные научно-технические результаты планируется получить в течение 8 лет с начала эксплуатации ITER.

Успех проекта ITER позволит затем перейти к строительству (предположительно в 2030-х годах) термо-

ядерного реактора DEMO (DEMOstration/prototype fusion power plant) стоимостью 10–20 млрд долларов, который станет прототипом промышленной термоядерной электростанции. В качестве перспективной комбинации ядерного реактора, в котором реактор УТС используется в качестве источника термоядерных нейтронов для деления топлива внешней оболочки из делящегося вещества, находящегося в подкритическом режиме.

Параллельно с развитием магнитного УТС успешно развивается альтернативная схема УТС, основанная на инерционном удержании термоядерной плазмы, нагретой до температуры  $10^8$  К и сжатой до гигантских плотностей (порядка  $1000 \text{ г см}^{-3}$ ) мягким рентгеновским излучением, генерируемым плазмой, нагретой мощными лазерами, или плазмой сильноточных Z-пинчей. С этой целью в Ливерморской национальной лаборатории им. Э. Лоуренса сооружена мощная лазерная система NIF (National Ignition Facility), состоящая из 192 пучков лазерного излучения с общей энергией 1,8 МДж и длительностью импульса  $\approx 10^{-9}$  с. Похожая установка — LMJ (Laser Mégajoule) — сооружается во Франции. По оценкам разработчиков обе эти установки должны обеспечить положительное термоядерное энерговыделение в виде микровзрывов.

С некоторым отставанием, но достаточно энергично ведутся работы по сильноточному направлению (pulsed power) инерциального УТС. В этом случае сжимающее и разогревающее термоядерную микромишень мягкое рентгеновское излучение генерируется столкновением высокоскоростных (до  $500 \text{ км с}^{-1}$ ) плазменных потоков, ускоренных гигантским импульсным током (примерно до 40 МА).

За последние годы достигнут большой прогресс в понимании физических процессов в горячей плазме экстремальных состояний, происходящих при сжатии мишени под воздействием лазерного и рентгеновского излучения. Важно, что современные термоядерные микромишени уже были проверены при подземных ядерных взрывах, которые позволяют обеспечить требуемые параметры излучения [8]. Уже получены условия зажигания термоядерной энергии, и поэтому нет сомнений, что УТС с инерционным удержанием может привести к успеху. Основная техническая проблема, с которой сталкиваются исследователи, работающие в этой области, — создание эффективного импульсного драйвера для ускорения оболочки термоядерных микромишеней. Наряду с применением лазеров и сильноточных пинчей, здесь рассматривается использование интенсивных потоков релятивистских тяжёлых ионов и разнообразных остроумных комбинированных схем типа "быстрого поджига" и т.п. [8].

Говоря о термоядерных исследованиях, особо подчеркнём, что для зажигания термоядерных реакций необходима генерация экстремально высоких температур и давлений, что требует детальных исследований физических свойств горячей плазмы в экстремальных состояниях, встречающихся в астрофизических объектах, но труднодостижимых в лабораторных условиях [8].

Особая привлекательность термоядерной энергетики состоит в её фактически безграничных топливных ресурсах и экологической чистоте. Широко распространённый изотоп дейтерий может легко добываться из морской





**Рис. 10.** Глобальная мировая электроэнергетическая система (проект Международного совета по большим электрическим системам высокого напряжения CIGRE (Conseil Internationale des Grandes Reseaux Electriques a Haute Tension)).

воды. Тритий нарабатывается в самом реакторе из лития, запасы которого (как и дейтерия) имеются на многие тысячелетия. Продукт реакции синтеза — гелий — не радиоактивен. Правда, возникает наведённая радиоактивность в материалах реактора, но эта проблема имеет приемлемые решения уже сейчас.

Пока трудно сказать, какая схема УТС — магнитная или инерционная — ляжет в основу промышленного термоядерного реактора будущего, но, учитывая значительные трудности этого проекта, практическую реализацию термоядерной энергетики предсказывают [7] на период не ранее второй половины нашего века.

Развитие термоядерной и космической энергетики потребует в будущем, согласно прогнозу Международного совета по большим электрическим системам (CIGRE), создания глобальной мировой электроэнергетической системы (рис. 10).

Наряду с генерацией энергии значительную и ответственную часть современной электроэнергетики представляют собой транспортные и распределительные электрические сети. За предыдущие десятилетия в России создана одна из крупнейших в мире Единая электроэнергетическая система, которая, однако, нуждается в реконструкции и развитии на основе новых энерготехнологий. Современный прогресс здесь связан с созданием так называемых управляемых (или "интеллектуальных") электрических систем, практическим использованием высокотемпературной сверхпроводимости, разработкой новых композитных проводников с повышенной прочностью и низким сопротивлением, а также современных полупроводниковых схем управления и контроля энергосетями и многого другого из того, что предлагает сегодня физика энергетике [9]. Внедрение технологий FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) для создания управляемых электросетей позволяют радикально увеличить их надёжность и снизить потери (до 5 %, вместо среднероссийских 10–15 %) за счёт, в частности, применения силовой полупроводниковой электроники, современных информационных систем диагностики, контроля и управления. Это даёт возможность оптимизировать передаваемую активную и реактивную мощность и управлять ею, менять

нужным образом потоки электроэнергии и эффективно управлять уровнем напряжений в базовом и аварийном режимах. Создание таких интеллектуальных систем требует совершенных высокоточных полупроводниковых устройств. Сегодня приблизительно до 40 % всей вырабатываемой в мире электроэнергии проходит через разнообразные высокоточные полупроводниковые приборы, весьма надёжные и эффективные для управления значительными мощностями в энергопередающих, распределительных, ограничительных и сопрягающих устройствах. Особо привлекательные перспективы здесь связаны с применением карбида кремния и масштабным внедрением полупроводниковых приборов для управления электроэнергетикой, повышения её качества и надёжности.

Для перевода электросетевого хозяйства на новый технологический уровень предстоит приложить масштабные усилия и затраты для создания элементной базы силовой полупроводниковой электроники [9] с последующей разработкой управляемых реакторов, синхронных компенсаторов, устройств поперечной и продольной компенсации, фазоповоротных систем, статических компенсаторов (статкомов), полупроводниковых выпрямителей для вставок сопряжения. Определёнными перспективами обладают и другие способы повышения надёжности электросистем, в частности использование высоконадёжных и быстрых взрывных размыкателей и коммутаторов, а также мобильных имитаторов удара молнии на основе предложенных А.Д. Сахаровым мощных взрывомагнитных генераторов (рис. 11).

Сверхпроводимость и особенно высокотемпературная сверхпроводимость остаются наиболее перспективным направлением работ в электроэнергетике. За последние годы здесь произошёл серьёзный прорыв, связанный с повышением критической температуры сверхпроводящего перехода, которая превысила температуру кипения жидкого азота. Широко ведутся работы по созданию сверхпроводниковых индуктивных накопителей, ограничителей токов короткого замыкания, синхронных компенсаторов, сверхпроводящих кабелей и соленоидов, магнитных систем, электромоторов, трансформаторов и т.п. [9].



**Рис. 11.** Взрывной мобильный имитатор молний на основе взрывомагнитного генератора.

В 2006 г. США ввели в эксплуатацию самый длинный (350 м) полупромышленный сверхпроводящий кабель, изготовленный из сверхпроводящего провода второго поколения, рассчитанный на ток 0,8 кА, напряжение 34,5 кВ и мощность 35 МВт. В нашей стране начаты работы по созданию сверхпроводящего кабеля длиной 200 м с током 1,5 кА, напряжением 20 кВ и мощностью 50–60 МВт. Эти разработки, уже сегодня решающие трудные задачи подачи энергии в плотно застроенные исторические части мегаполисов, дают техническую основу для создания более протяжённых сверхпроводящих промышленных линий и других электротехнических устройств с отсутствием электрических потерь [9, 10].

Радикальное изменение в электроэнергетике ожидается, конечно, с открытием сверхпроводимости при "комнатной" температуре, что является одной из центральных задач современной физики [11], над которой упорно работают большие коллективы квалифицированных физиков разных специальностей.

#### 3.4. Системные исследования перспектив развития энергетики

Из большого числа возможных технологий энергетическая наука отбирает эффективные энергетические технологии, руководствуясь, по существу, парадоксальным принципом М.А. Стыриковича: "Энергетика — это физика+экономика". Такой отбор проводится по критериям *экономической эффективности и экологической приемлемости* с учётом всех аспектов *надёжности и управляемости* технологий. Этому посвящено 10–15 % энергетических исследований и, казалось бы, они определяют приоритеты НТП в энергетике.

Но, во-первых, названные критерии выбора эффективных технологий весьма неоднозначны и очень противоречивы: понятно, что чем надёжнее и "экологичнее" технологии, тем они дороже. Во-вторых, энергетические технологии обычно работают не изолированно, а в комплексах или системах, где сумма локальных оптимумов по определению не соответствует глобальному оптимуму.

Поэтому важным направлением энергетической науки является исследование и конструирование энергетических систем, на что приходится ещё 10–15 % её усилий. Системные исследования в энергетике на основе математического моделирования с применением компьютеров широко развернулись с 1960-х годов, и советская школа Л.А. Мелентьева [2] занимала лидирующие позиции в мире. Но вследствие большой неопределённости будущего и неоднозначности научно-технологического процесса и эта методология не обеспечивает достаточно надёжного предвидения инноваций.

Поэтому для определения эффективных направлений и приоритетов научно-технологического прогресса ко всему сказанному приходится привлекать исследования тенденций эволюции пространственного и производственного развития энергетики, т.е. квинтэссенцию того, "как это было на самом деле" в прошлом [1, 12]. На это направлено до 5 % энергетических исследований.

*Пространственное развитие* энергетики следует тенденции создания межгосударственных, трансконтинентальных и глобальных систем. Такие системы имеют мощную *физико-техническую основу* в виде трубопроводных и электрических сетей и одновременно высту-

пают как всё более *сложные производственные системы*, а теперь и как *энергетические рынки*. Сформированную в 1980–1990-е годы глобальную нефтяную систему в ближайшие 10–15 лет дополнит (и интегрируется с ней) глобальная система газоснабжения (см. рис. 8), образуемая широким применением сжиженного природного газа в сочетании с созданием Евразийской газоснабжающей системы [13]. Позднее, вероятно после 2050 г., для широкого использования космической и термоядерной энергетики потребуются глобальная интеграция региональных электроэнергетических системы (см. рис. 10).

*Технологическое совершенствование* энергетики, как уже говорилось, идёт по пути быстрого увеличения разнообразия форм используемой потребителями энергии и повышения её качества. Одновременно рассмотренные в разделе 3.3 направления научно-технического прогресса в энергетике обещают преодолеть, наконец, "проклятие" уменьшения к.п.д. при получении энергии более высокого качества. Знание этих тенденций позволяет ставить целью достижение к середине века значения не менее 50 % для основного индикатора инновационности энергетики — общего коэффициента использования энергии — и соответственно строить технологическую политику, искать средства достижения этой цели. Но для этого нужно видеть возможные направления изменения структуры конечного энергопотребления.

На рисунке 12 показано, что при прогнозируемом МЭА удвоении мировой энергетики с 2005 г. по 2050 г. доля электроэнергии в обеспечении конечной энергии увеличится *согласно сложившимся тенденциям* с 25 % до 33 % при уменьшении доли прямого сжигания топлива (печного и моторного в сумме) с 69 % до 63 % и тепла (пар, горячая вода) с 6 % до 4 %.

От этой традиционной траектории в соответствии с "водородной инициативой Буша" США, Евросоюз, Япония предполагают перейти к сценарию *водородной энергетики*. Даже по оптимистическим оценкам водород обеспечит не более 10 % конечного потребления, что потребует создания инфраструктуры по производству, транспортировке, хранению и распределению (до автозаправок) до 3 трлн кубометров этого сверхлетучего, очень текучего и взрывоопасного газа. (Для сравнения, ныне в мире добывается примерно столько же природного газа, а намного меньшие проблемы его безопасного использования стоят достаточно дорого.)

Водородный сценарий почти не изменит доли электроэнергии в конечном энергопотреблении, а долю топлива (в основном жидкого) уменьшит до 55 %, а тепла — до 3 %. Но даже при широком замещении нынешнего электролиза воды термохимическими технологиями получения водорода его использование потребует большого расхода электроэнергии. Между тем водород будет замещать нефтетопливо в топливных элементах с получением опять же электроэнергии: автомобиль на водороде — это, по сути, электромобиль. В итоге получим как бы особый накопитель электроэнергии, но с к.п.д. цикла менее 20 %.

Альтернативой служит сценарий *электрического мира*, в котором более половины конечного потребления обеспечит электроэнергия. На качественно новых аккумуляторах она уменьшит прямое сжигание топлива до 47 %, прежде всего, на транспорте и в распределённой энергетике, а при освоении сверхпроводимости облегчит,

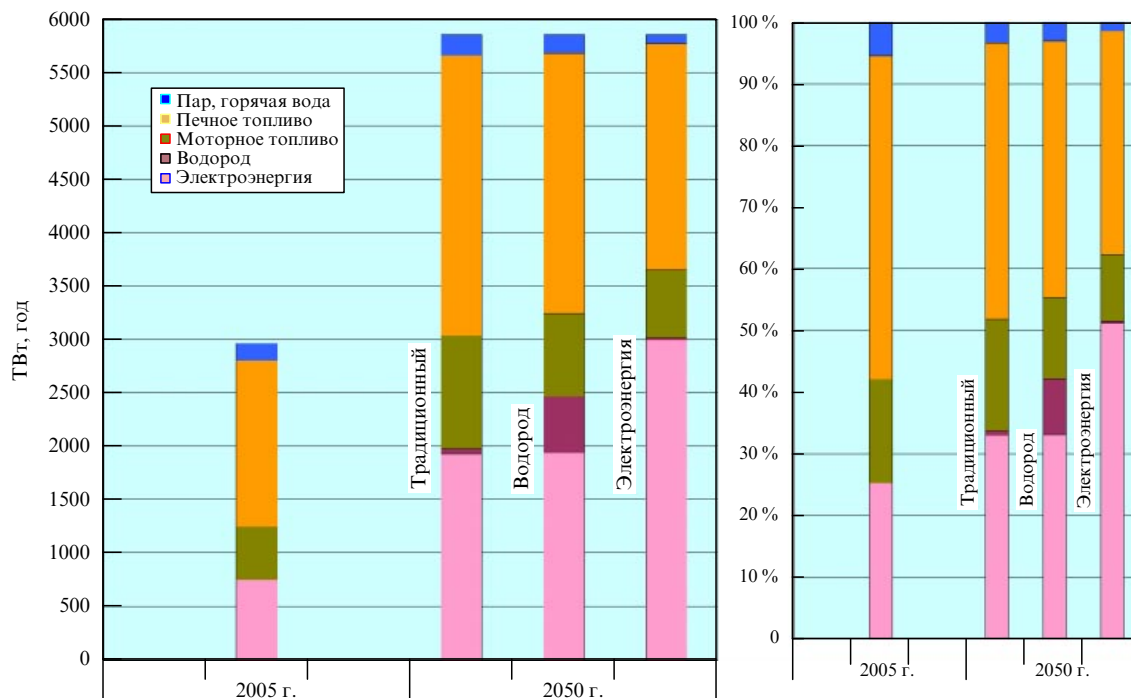


Рис. 12. Конечная энергия, подведённая потребителям.

кроме того, использование возобновляемой энергии, особенно солнечной и приливной.

Это одна из важнейших развилок инноваций в энергетике. От того, кто выиграет гонку идей и технологий в области эффективного аккумулирования электроэнергии, сильно зависит востребованность других направлений НТП и общая конфигурация энергетики будущего. В прогнозах МЭА ясность по этой проблеме пока отсутствует.

Системная оценка возможных сценариев роста мирового энергопотребления (см. рис. 5) с учётом расширения доступных запасов первичных энергетических ресурсов (см. табл. 1 и рис. 6) и возможностей НТП в энергетике (см. раздел 3.3) позволяет сделать два следующих заключения о перспективах развития мировой энергетики в первой половине XXI в.:

1. Реализация традиционного сценария МЭА [4, 5] маловероятна вследствие как мирового кризиса, так и внутренней противоречивости самого сценария: на сложившихся трендах технологического прогресса в энергетике этот сценарий дал бы недопустимо высокие выбросы парниковых газов с большим риском изменения климата планеты, а предложенная в [5] его модификация посредством форсированного развития "малочуглеродных" технологий уменьшит выбросы до "безопасного" уровня (около 14 млрд тонн CO<sub>2</sub>) только ценой удвоения затрат на развитие энергетики, что вряд ли будет приемлемо для мировой экономики.

2. Необходимо приложить все усилия общественности, политиков и бизнеса (или это будет инициировано самим ходом событий через экономические кризисы и природные катаклизмы) для осознанного перехода на энергоэффективный образ жизни с замедлением, а затем и прекращением роста среднечеловеческого по миру расхода энергии (см. целевой сценарий 2 на рис. 5 и 7). Тогда "безопасный" масштаб выбросов парниковых газов обойдётся почти вдвое дешевле, чем в традиционном

сценарии, или ещё дешевле, если для уменьшения перегрева атмосферы использовать также методы геоинженерии.

#### 4. Перспективы топливно-энергетического комплекса России

Энергетика России имеет важные особенности, которые обуславливают специфику энергетической политики страны и её научно-технического компонента.

Главная особенность — высокая обеспеченность сравнительно дешёвыми энергоресурсами: Россия располагает более чем 15% мировых разведанных запасов топлива при менее чем 3% населения и 6% энергопотребления планеты. Это объективно предопределяет большую экспортную составляющую нашей энергетики.

Далее, Россия является самой холодной (две трети территории — вечная мерзлота) и протяжённой (11 часовых поясов) страной с очень низкой плотностью населения и энергетической инфраструктуры — соответственно в четыре и семь раз меньшими, чем в США. Отчасти и по этим причинам энергетическая эффективность российской экономики в пять раз хуже, а нагрузка энергетики на экономику в четыре раза превышает среднемировую: капитальные вложения в нашу энергетику достигают 5% от ВВП при 1,5% по миру в целом.

Важно, что Россия относительно нейтральна к потеплению климата, а возможно, и выигрывает от него, а потому озабоченность этой темой у нас объективно меньше.

В наследство от СССР Россия получила мощный (второй в мире по производству) топливно-энергетический комплекс (ТЭК), переживший тяжёлый спад вместе со всей экономикой страны. В последние годы основные его отрасли почти восстановились до предреформенного уровня (рис. 13), но мировой кризис принёс новые потери.

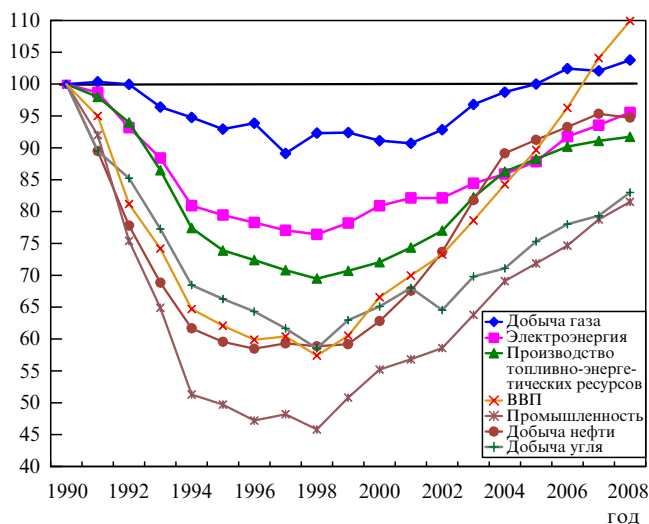


Рис. 13. Динамика ВВП, промышленности и отраслей ТЭК России, %.

При остром недостатке инвестиций ТЭК России тем не менее в течение 15 лет дотировал перестраивающуюся экономику страны, что породило кризисные явления в его важных секторах. Так, в электроэнергетике десятикратно сократился ввод новых мощностей, а износ оборудования достиг угрожающих размеров. Половина электрических мощностей и до 60 % теплосетей страны выработали свой парк ресурс и нуждаются в замене, а 10–20 % из них находятся в аварийном состоянии. Доля наиболее совершенных парогазовых установок у нас удручающе мала — всего 1,5 %. Потери в тепловых сетях доходят до 30 %, а в электрических достигают 15 % при средневропейском уровне примерно 5 %. Для замены выбывающих мощностей нужно ежегодно вводить 7–8 ГВт новых мощностей, тогда как фактический ввод составляет около 1 ГВт.

На преодоление этих недостатков направлена действующая Энергетическая стратегия России на период

до 2020 г. (ЭС-20) [12, 13] и начата в 2007 г. работа по её уточнению и пролонгации до 2030 г. (ЭС-30). Мировой экономический кризис внёс существенные коррективы в перспективы не только мира, но и России, отсрочив на 5–7 лет достижение намечавшихся ещё в середине 2008 г. уровней развития экономики (рис. 14) и энергетики (рис. 15) страны. Но при уменьшении ожиданий роста ВВП страны к 2030 г. уточнённые прогнозы в период до 2020 г. остаются в диапазонах значений ЭС-20.

Названные выше особенности энергетики России существенно отличают приоритеты её инновационного развития от выработанных МЭА [5]. Высшим приоритетом для нас является энергоэффективность как в организационно-управленческом, так и в технологическом аспектах. Очень важны для России также инновации в дальнем транспорте энергии и распределённой (децентрализованной) энергетике, в глубокой переработке топлива (особенно углеводородов) и в теплоэнергетике. Но способы и технологии реализации этих приоритетов серьёзно сдерживаются в России острой нехваткой инвестиций. Поэтому при относительно дешёвом топливе и энергии в России более рационально использовать умеренно капиталоемкие технологии даже с несколько худшими к.п.д. по сравнению с к.п.д. высших достижений стран с дорогой энергией.

Кроме того, технологическая политика России должна ориентироваться на умеренную стоимость мер по сдерживанию эмиссии парниковых газов.

С учётом сказанного уточнённые сценарии развития ТЭК России исходят из восстановления начиная с 2014–2015 гг. достаточно высоких темпов развития экономики (с увеличением ВВП к 2030 г., по сравнению с ВВП в 2005 г., в 2,9–3,1 раза (см. рис. 14)). Но кризис не просто замедлил, но и на 2–3 года повернул вспять снижение энергоёмкости ВВП (в 2000–2008 гг. энергоёмкость уменьшилась на одну треть), вернув её последующую динамику в середину диапазона прогнозов ЭС-20 (см. вставку на рис. 14). Таким образом, экономика будет предъявлять повышенный спрос на энергоресурсы, потребление которых к 2030 г. увеличится относительно

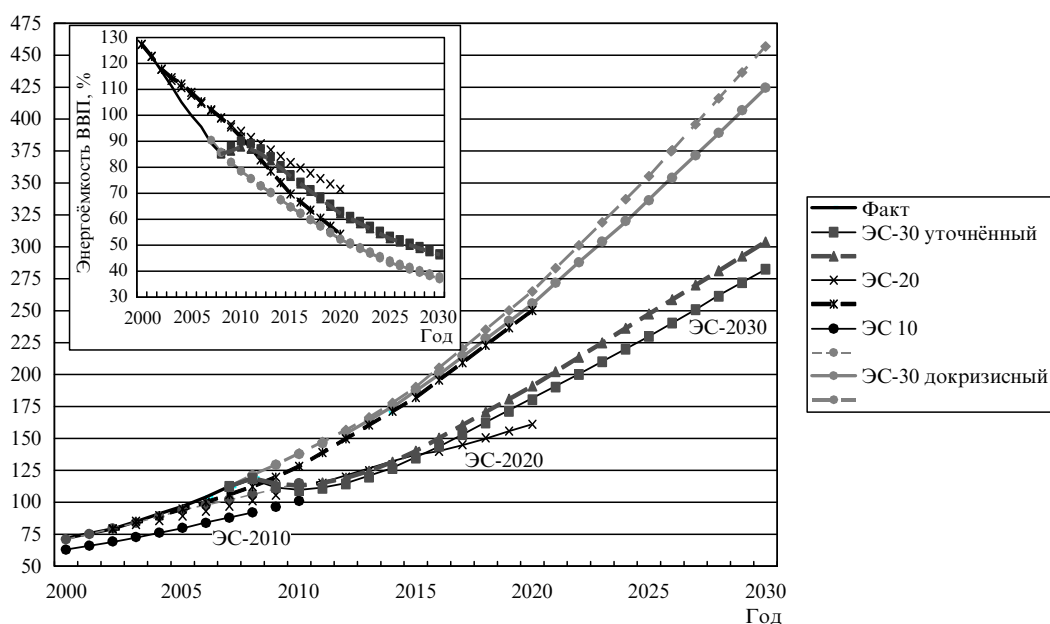


Рис. 14. Факт и прогнозы динамики ВВП России, % к 1990 г.



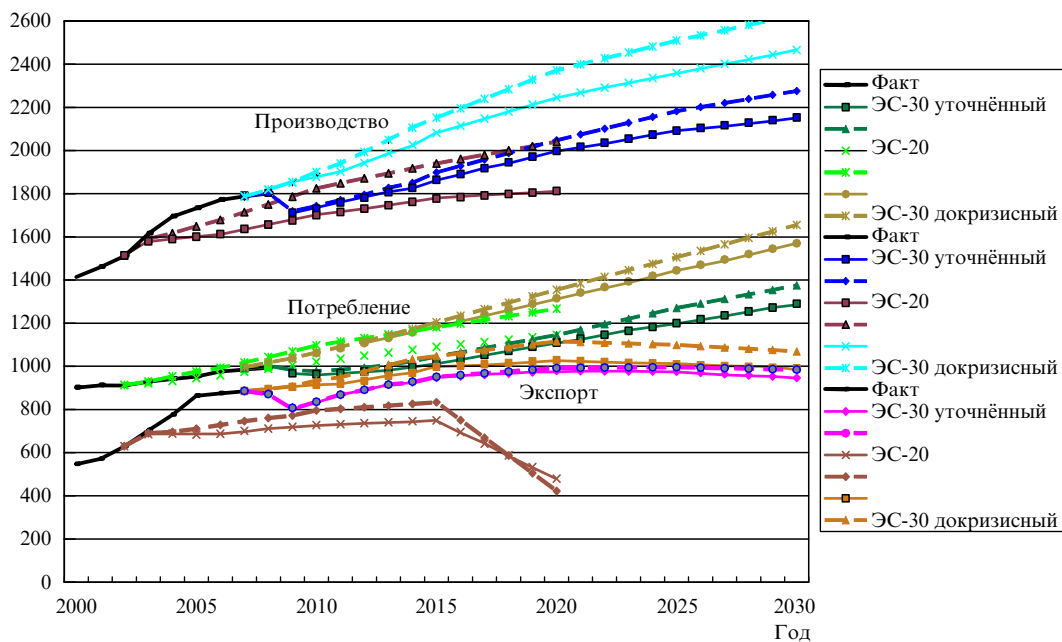


Рис. 15. Первичные энергоресурсы, млн тонн углеводородного топлива.

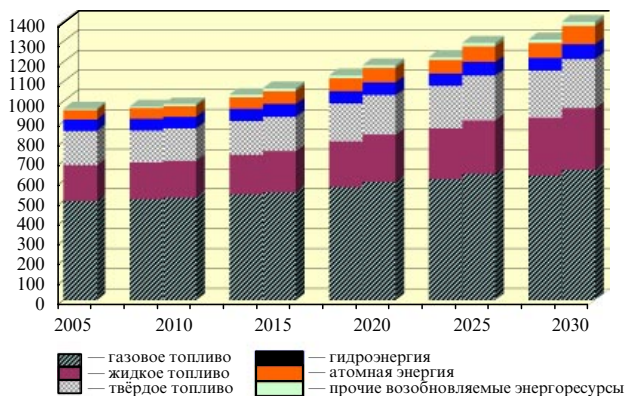


Рис. 16. Потребление первичных энергоресурсов в России, млн тонн углеводородного топлива.

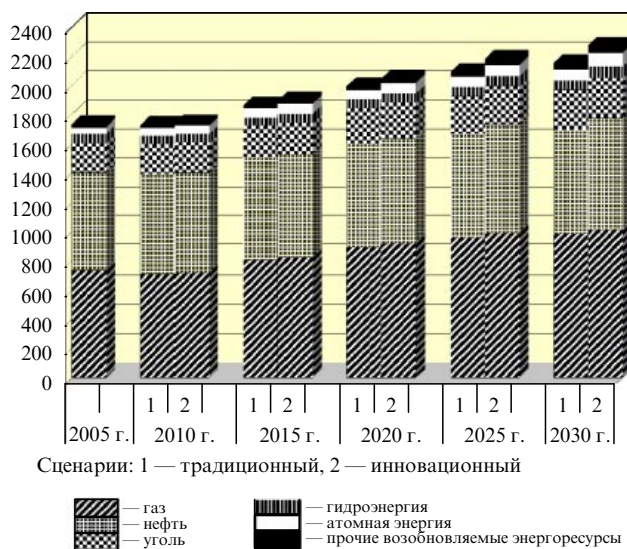


Рис. 18. Производство энергоресурсов в России, млн тонн углеводородного топлива.

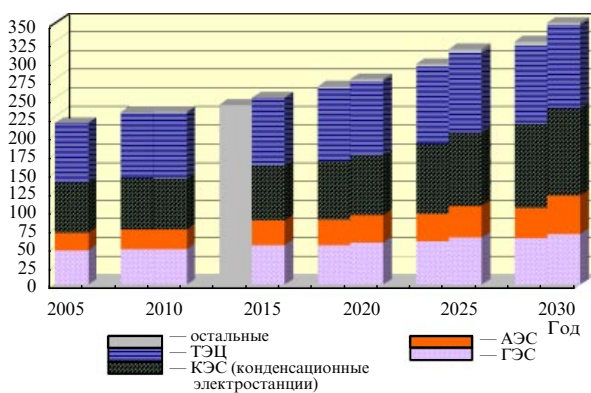


Рис. 17. Мощность электростанций России, 10<sup>6</sup> кВт.

такового в 2005 г. на 35–45%. При этом существенно замедлится перестройка структуры внутреннего спроса — переход от газа к другим энергоресурсам, поскольку газ по-прежнему будет оставаться самым дешёвым

топливом, по меньшей мере, до 2011–2012 гг. Только затем доля природного газа в энергопотреблении страны станет уменьшаться до 48–49% в 2030 г. (рис. 16). Основным потребителем энергоресурсов в стране (41–42%) по-прежнему будут электростанции, выработка которых увеличится относительно таковой в 2005 г. на 34–42% к 2020 г. и в 1,7–1,9 раза к 2030 г., при повышении общей доли ГЭС, АЭС и возобновляемых источников от 32,3% в 2005 г. до 33–36% (рис. 17) и уменьшении доли газа в расходе топлива от 67,9% в 2005 г. до 64–65% в 2030 г. (рис. 18). В целом производство энергоресурсов в стране с 2005 г. до 2030 г. увеличится на 25–30% при существенном замещении нефти (от 38,5% до 33–33,5%) атомной энергией (возрастание от 2,8% до 3,5–4,2%), возобновляемыми ресурсами (от 1,2% до 1,7–2,4%) и углём (от 11,7% до 13%) (см.



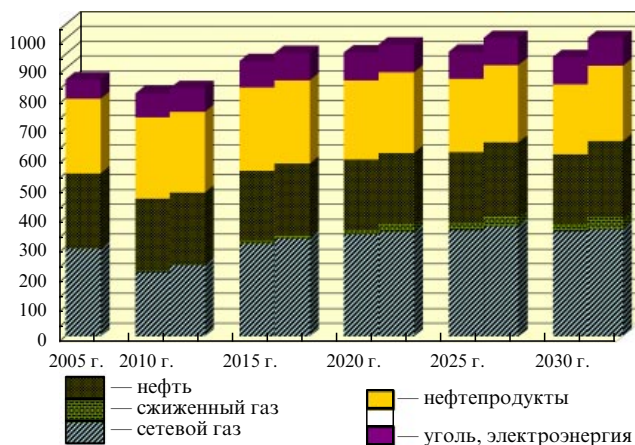


Рис. 19. Экспорт энергоресурсов, млн тонн углеводородного топлива.

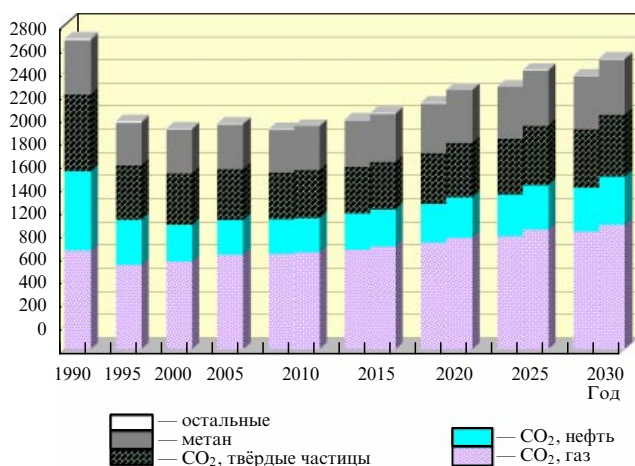


Рис. 20. Выбросы парниковых газов по видам топлива.

рис. 18). Добыча нефти возрастёт от сегодняшних 480 млн тонн до 500–535 млн тонн к 2030 г. преимущественно за счёт Восточной Сибири и Дальнего Востока, но основной прирост производства энергоресурсов обеспечит добыча природного газа до 855–885 млрд м<sup>3</sup> в 2030 г. главным образом на Ямале и Штокмановском месторождении, а также в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке. Предусматривается также опережающий рост добычи угля, до 420–425 млн тонн в 2030 г., в основном в Кузнецком и Канско-Ачинском бассейнах.

Это позволит увеличить к 2020 г. экспорт топлива (относительно сниженного в кризис уровня 2010 г.) на 16–17 % с последующей стабилизацией или даже снижением (рис. 19) при замещении нефтяного экспорта (с 61,5 % до 49–50 %) экспортом природного газа по трубопроводам (рост от 34 % до 37–39,5 %) и в сжиженном виде (до 3–4 %).

Такое развитие российской энергетики позволит вплоть до 2030 г. сохранить уровень выброса парниковых газов ниже уровня 1990 г. (рис. 20). При этом капиталовложения в развитие энергетики составят в целом за период 3,5–3,7 % от ВВП страны, сокращаясь с текущих 4–5 % до 3 % в 2026–2030 гг. Таким образом, главные социально-экономические параметры энерге-

тики могут заметно улучшиться по сравнению с аналогичными параметрами в докризисных прогнозах.

Для получения указанных результатов наша энергетическая наука должна конкретизировать с учётом мировых тенденций российские приоритеты НТП и создать технологии с параметрами, отвечающими российским условиям. Важно также закрепить документами Энергетической стратегии состав, параметры, сроки и масштаб применения приоритетных энергетических технологий с необходимым их финансированием.

## Список литературы

1. Макаров А А *Мировая энергетика и Евразийское энергетическое пространство* (М.: Энергоатомиздат, 1998) с. 17–23
2. Мелентьев Л А *Системные исследования в энергетике: элементы теории, направления развития* 2-е изд. (М.: Наука, 1983)
3. Путвинский С В *УФН* **168** 1235 (1998) [Putvinskii S V *Phys. Usp.* **41** 1127 (1998)]
4. *World Energy Outlook 2008* (Paris: Intern. Energy Agency, 2008); <http://www.worldenergyoutlook.org/2008.asp>
5. *Energy Technology Perspectives. Scenarios & Strategies to 2050* (Paris: Intern. Energy Agency, 2008)
6. Фортов В Е, Шпильрайн Э Э *Энергия и энергетика* (М.: Букос, 2004)
7. Велихов Е П и др. *Россия в Мировой энергетике XXI века* (М.: ИздАТ, 2006)
8. Фортов В Е *Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе* (М.: Наука, 2008)
9. Волков Э П *Докл. РАН* (2009) (в печати)
10. Фортов В Е, Леонов Ю Г (Ред.) *Энергетика России. Проблемы и перспективы. Тр. науч. сессии РАН: Общ. собр. РАН, 19–21 декабря 2005 г.* (М.: Наука, 2006)
11. Гинзбург В Л *УФН* **175** 187 (2005); **177** 346 (2007) [Ginzburg V L *Phys. Usp.* **48** 173 (2005); **50** 332 (2007)]
12. Макаров А А, Фортов В Е *Вестн. РАН* **74** 195 (2004) [Makarov A A, Fortov V E *Herald Russ. Acad. Sci.* **74** 131 (2004)]
13. Адамов Е О и др. *Энергетика России. Стратегия развития 2000–2020* (М.: Энергия, 2003)
14. Макаров А А *Вестн. РАН* **79** 206 (2009) [Makarov A A *Herald Russ. Acad. Sci.* **79** 99 (2009)]

PACS numbers: 01.65.+g, 52.35.-g, 52.55.-s

DOI: 10.3367/UFN.0179.200912m.1353

## Арцимович и сильнейшие гидродинамические неустойчивости

А.М. Фридман

Краткая предыстория того, как Лев Андреевич представил мою дипломную работу в ДАН СССР, состоит в следующем.

В 1962 г. в журнале *Phys. Rev. Lett.* была опубликована статья [1] известного американского экспериментатора Желе, в которой он демонстрировал увеличение диффузии слабоионизованной плазмы поперёк магнитного поля при монотонном увеличении напряжённости магнитного поля начиная с некоторого её значения.

Результаты этих экспериментов, казалось бы, противоречили хорошо известным результатам более ранних экспериментов, которые показывали, что как классический коэффициент диффузии, так и бомовский уменьшались с возрастанием величины магнитного поля  $H$ .

Уезжая летом этого же, 1962 года, в летний отпуск, мой учитель Роальд Сагдеев сказал: "Значит так, когда я через месяц приеду из отпуска и на моём столе будет лежать твоя статья с объяснением экспериментов Желе,

то по окончании НГУ ты станешь аспирантом ИЯФ\*, а не будет такой статьи — будешь аспирантом НГУ".

По приезде Роальда из отпуска на его столе лежала эта статья, и он договорился с Львом Андреевичем о рассказе её на семинаре "Т" (семинаре по термояду) в ЛИПАНе (так тогда назывался Институт Курчатова — Лаборатория измерительных приборов АН). Через день после доклада на семинаре Сагдеев сказал мне, что Лев Андреевич предлагает представить мою дипломную работу в ДАН (см. [2]), но перед этим он бы хотел со мной поговорить.

Разговор с Арцимовичем мне запомнился на всю жизнь. Я был просто потрясён увиденным и услышанным. Мне в голову не приходило, что сделанное мною можно было так просто показать на пальцах. Всё, кроме некоторого коэффициента  $k \ll 1$ , Лев Андреевич сумел объяснить на совершенно тривиальном уровне.

Чтобы не быть голословным, я попробую в течение нескольких минут пролистать пять страниц моего диплома.

Здесь показаны основные используемые в работе [2] уравнения, описывающие динамику слабоионизованной плазмы, где электроны замагничены, а ионы нет:

$$\frac{d}{dx}(T\delta n) - en_0 \frac{d}{dx} \delta\varphi + \frac{e}{c} n_0 \delta v_{ey} B + \frac{d \ln n(x)}{dx} T \delta n = 0, \quad (1)$$

$$ik_y T \delta n - ik_y en_0 \delta\varphi - \frac{e}{c} n_0 \delta v_{ex} B = 0, \quad (2)$$

$$ik_z T \delta n - ik_z en_0 \delta\varphi = -n_0 m_e (v_{ei} + v_{en}) \delta v_{ez} - n_0 m_e v_{ei} \delta v_{iz}, \quad (3)$$

$$i\omega \delta n + \text{div}(\mathbf{v}_{e0} \delta n) + \text{div}(\delta \mathbf{v}_e n_0) = 0, \quad (4)$$

$$i\omega m_i \delta v_{ix} + e \frac{d}{dx} \delta\varphi = 0, \quad (5)$$

$$\omega m_i \delta v_{iy} + ek_y \delta\varphi = 0, \quad (6)$$

$$\omega m_i \delta v_{iz} + ek_z \delta\varphi = 0, \quad (7)$$

$$i\omega \delta n + \text{div}(n_0 \delta \mathbf{v}_i) + \text{div}(\mathbf{v}_{i0} \delta n) = 0, \quad (8)$$

где  $T$  — температура электронов (в предположении, что  $T_e \gg T_i$ );  $e$  — заряд электрона;  $c$  — скорость света в вакууме;  $m_e$ ,  $m_i$  — соответственно массы электрона и иона;  $v_{ei}$ ,  $v_{en}$  — частоты соответственно электрон-ионных, электрон-нейтральных столкновений;  $\mathbf{v}_e$ ,  $\mathbf{v}_i$  — направленные скорости соответственно электронов и ионов. В уравнениях (5)–(7) мы пренебрегли диссипативными членами ввиду условия  $\omega \gg v_{in}$ .

Система уравнений (1)–(8) в области максимальной плотности может быть сведена к уравнению типа Шрёдингера

$$\frac{d^2 \delta\varphi}{dx^2} + 2 \left( E - \frac{\tilde{\omega}^2 x^2}{2} \right) \delta\varphi = 0 \quad (9)$$

для линейного осциллятора с комплексными энергией

$$E = \frac{ik_z^2 \frac{\omega^2}{v_{en}} \frac{m_i}{m_e} + \frac{v_{en}}{v_{en} + v_{ei}} \omega k_z^2}{2 \left( i \frac{k_z^2}{v_{en}} \frac{T}{m_e} - \omega + \frac{\omega^2}{\omega_{Hi}} \frac{1}{k_y} \frac{d \ln n_0}{dx} \right)} - \frac{k_y^2}{2} \quad (10)$$

и частотой

$$\tilde{\omega}^2 = - \frac{\frac{\omega^2}{\omega_{Hi}} \frac{\ln' n_0}{k_y} \frac{1}{R^2} \left( ik_z^2 \frac{\omega^2}{v_{en}} \frac{m_i}{m_e} + \frac{v_{en}}{v_{en} + v_{ei}} \omega k_z^2 \right)}{\left( i \frac{k_z^2}{v_{en}} \frac{T}{m_e} - \omega + \frac{\omega^2}{\omega_{Hi}} \frac{1}{k_y} \frac{d \ln n_0}{dx} \right)^2}. \quad (11)$$

Как известно, решение такого уравнения находится в виде функций Эрмита:

$$\delta\varphi_{\tilde{n}} = \left( \frac{\tilde{\omega}}{\pi} \right)^{1/4} \frac{1}{\sqrt{2^{\tilde{n}} \tilde{n}!}} \exp \left( -\frac{\tilde{\omega}}{2} x^2 \right) H_{\tilde{n}}(x\sqrt{\tilde{\omega}}), \quad (12)$$

где  $H_{\tilde{n}}(x\sqrt{\tilde{\omega}})$  — функция Эрмита,  $\tilde{n} = 0, 1, 2, \dots$

В результате можно найти величину напряжённости критического магнитного поля

$$B_c \sim \frac{c}{e} \sqrt[4]{T \frac{m_e m_i^2}{R^2} v_{en} v_{in}}, \quad (13)$$

которое совпадает с данными в работе Желе [1] (теоретическая кривая легла на экспериментальные точки).

В работе [2] была найдена новая неустойчивость, зависимость инкремента которой от величины магнитного поля оказалась обратной той, которая имела место для инкремента дрейфовой неустойчивости. Поэтому эта новая неустойчивость была названа мною "антидрейфовой".

Так, с "благословения" Л.А. Арцимовича была опубликована моя первая статья по гидродинамическим неустойчивостям, любовь к красивой физике которых сохранилась у меня, благодаря Льву Андреевичу, навсегда. Именно поэтому и основная тема моего выступления на научной сессии ОФН РАН, посвящённой памяти Л.А. Арцимовича "Предсказание и открытие сильнейших гидродинамических неустойчивостей, вызванных скачком скорости: теория и эксперименты" (одноимённый обзор [3], опубликованный в УФН в прошлом году, отражает содержание моего сегодняшнего выступления).

## Список литературы

1. Geller R *Phys. Rev. Lett.* **9** 248 (1962)
2. Фридман А М *ДАН СССР* **154** 567 (1963) [Fridman A M *Sov. Phys. Dokl.* **9** 75 (1964)]
3. Фридман А М *УФН* **178** 225 (2008) [Fridman A M *Phys. Usp.* **51** 213 (2008)]

PACS numbers: **01.65. +g**, **28.60. +s**, 29.25.Ni  
DOI: 10.3367/UFNr.0179.200912n.1354

## Электромагнитное разделение изотопов и его наследие

Ю.В. Мартыненко

В докладе даётся краткая история развития в СССР электромагнитного метода разделения изотопов, а также его наследия — новых направлений науки и техники, порождённых работами по электромагнитному разделению изотопов.

Сейчас имя Льва Андреевича Арцимовича ассоциируется прежде всего с термоядерным синтезом и термоядерной энергией. С самого начала Л.А. Арцимович

\* НГУ — Новосибирский государственный университет, ИЯФ — Институт ядерной физики СО АН СССР. (Примеч. ред.)

возглавлял эти исследования в СССР, и благодаря ему токамаки стали основным направлением термоядерных работ во всём мире. Однако масштаб Арцимовича как учёного проявился ранее в связи с другой крупнейшей научной проблемой XX в. — Атомным проектом СССР — разработкой атомного оружия [1].

С самого начала работ по созданию атомной бомбы проблемой номер один стало получение делящегося вещества — собственно "взрывчатки". Таким веществом мог быть либо плутоний, либо уран-235. Для получения плутония надо было построить атомный реактор и там "наработать" плутоний. Такой реактор, первый на континенте, был запущен 25 декабря 1946 г. в Курчатовском институте, но "наработка" плутония заняла более двух лет. Уран-235 надо было выделить из природного урана при его содержании там всего 0,72 %. Работы по получению плутония-239 и выделению урана-235 из природного сырья велись одновременно, причём разрабатывалось сразу несколько методов выделения урана-235: газодиффузный метод (руководитель И.К. Кикоин), центробежный метод (Ф.Ф. Ланге и И.К. Кикоин) и электромагнитный метод (Л.А. Арцимович). Отправной точкой начала серьёзных работ по электромагнитному разделению изотопов можно считать записку И.В. Курчатова Л.П. Берии об учёных, привлечение которых необходимо для работ по проблеме (24 ноября 1944 г.). В этой записке И.В. Курчатова дал такую характеристику Л.А. Арцимовичу [1]:

*"Проф[ессор] Л.А. Арцимович*

Профессор, доктор физ[ико]-мат[ематических] наук Л.А. Арцимович является завед[ующим] лабораторией Физико-техн[ического] института Ака[демии] наук СССР и консультантом Лабор[атории] № 2 Ака[демии] наук СССР (теперь *Российский научный центр (РНЦ) "Курчатовский институт"* (КИ). — Ю.В.М.). Л.А. Арцимович — очень способный физик, глубокий и лучший в Союзе знаток электронной оптики. В основном он занят сейчас решением вопроса видения в темноте и только часть времени уделяет работам по магнитному способу выделения урана-235. Я считаю необходимым полное переключение его на эту последнюю работу".

Решение было принято незамедлительно, и к концу 1944 г. под руководством Л.А. Арцимовича в Лаборатории № 2 был организован сектор № 5 (разделение изотопов урана ионным методом), а также сектор № 1 Ленинградского физико-технического института (ЛФТИ) (ныне — Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН (ФТИ)). Началась интенсивная работа по электромагнитному методу разделения изотопов.

Параллельно с 1945 г. работы по электромагнитному методу разделения изотопов проводились в Сухуми под руководством немецкого физика Манфреда фон Ардене, который согласился работать в Советском Союзе. Там работали как немецкие, так и наши специалисты.

Проблема состояла в том, чтобы на основе принципа масс-спектрометра — прибора, разделяющего ускоренные ионы по массам в поперечном магнитном поле, — создать крупномасштабное производство разделения изотопов урана. До того времени масс-спектрометр, предложенный Демстером ещё в 1918 г. [2], использовался для анализа малых количеств вещества.

Проблема разбивалась на три крупных блока задач: 1) сильноточный ионный источник, 2) ионная оптика сильноточных пучков и 3) приёмник ионов и выделение

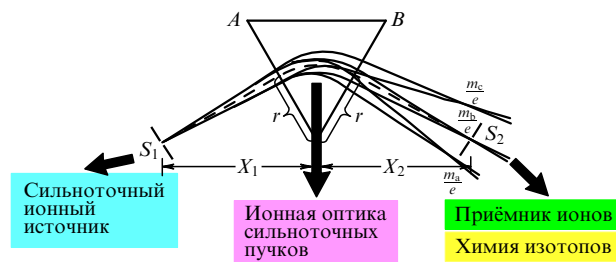


Рис. 1. Схема электромагнитного разделения изотопов и блоки основных проблем.

изотопа урана-235 из приёмника (рис. 1). Принцип действия и основные параметры разработанной и построенной электромагнитной установки для разделения изотопов описаны в 1957 г. [3], когда стали публиковаться такие материалы.

**Источники ионов** существовали и ранее, они использовались в масс-спектрометрах, но ток в них составлял несколько наноампер, а для выполнения поставленной задачи надо было иметь ток величиной хотя бы в одну десятую долю ампера — разница 7–8 порядков величины. Кроме того, необходимо было, чтобы источник работал непрерывно несколько десятков часов — нужна была высокая производительность.

Выбор методов ионизации вещества показал явное преимущество ионизации электронным ударом, поскольку позволял ионизовать любое вещество, если только его можно получить в газообразном состоянии. Разрабатывалось несколько видов ионных источников, в том числе независимо в Сухумском физико-техническом институте под руководством Ардене. Но источник Курчатовского института И-22 [4] был признан лучшим и "принят на вооружение".

Этот источник использует дуговой разряд с накаливаемым катодом в продольном магнитном поле, ионы вытягиваются поперёк магнитного поля через щель ускоряющим напряжением (рис. 2). В качестве рабочего вещества вначале использовался UF<sub>4</sub>, поскольку фтор имеет только один изотоп. Однако четырёхфтористый уран имеет необходимую упругость пара  $P = 10^{-2}$  торр при температуре 800 °С, а при такой температуре тигли испарителя быстро прогорали. Поэтому после проведения экспериментов перешли с сентября 1946 г. на работу с

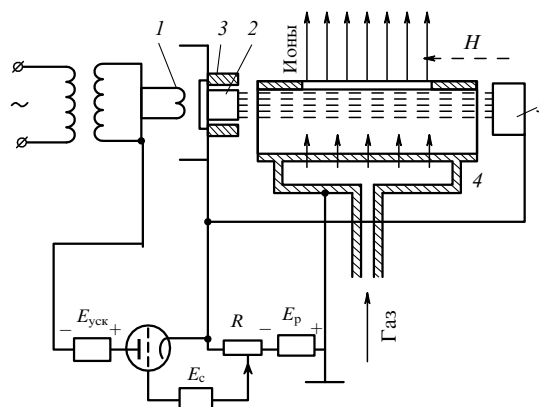


Рис. 2. Схема ионного источника: 1 — вольфрамовая нить, 2 — подогреваемый катод, 3 — экран, 4 — анодная камера, 5 — отражатель.

$UCl_4$ , у которого температура испарения составляет всего  $400^\circ\text{C}$ , хотя он имеет два изотопа:  $^{35}\text{Cl}$  (75,4 %) и  $^{37}\text{Cl}$  (24,6 %). Подбор режимов работы источника с  $UCl_4$  позволил получить ток ионов  $U^+$  величиной до 80 % от полного тока.

Была проведена большая работа по выбору оптимальных режимов: давления в рабочей камере, разрядного тока и разрядного напряжения. Например, малое разрядное напряжение не обеспечивает достаточно эффективной ионизации, а слишком большое напряжение вызывает сильное распыление катода и, кроме того, даёт значительную долю многозарядных ионов  $U^{+2}$  и  $U^{+3}$ , что снижает ток однозарядных ионов  $U^+$ . Естественно, оптимизация велась по максимальному току однозарядных ионов  $U^+$  и по ресурсу непрерывной работы источника.

На параметры пучка, вытягиваемого из ионного источника, оказывало влияние и распределение подачи пара в источник. Было найдено, что наилучшая, прямоугольная, форма пучка получается, когда подача пара возрастала от катода к аноду.

Много забот доставили колебания разряда в источнике, которые вызывали также колебания пучка в разделительной камере. Специальные исследования показали, что эти колебания возникают вследствие колебаний объёмного заряда у катода. Влияние этих колебаний на вытягиваемый пучок удалось уменьшить, отодвинув вытягивающую щель от катода.

Более подробно о работах по физическим проблемам электромагнитного разделения изотопов можно прочитать в обзоре [5], написанном заместителем Л.А. Арцимовича в Курчатовском институте М.К. Романовским. Обзор хорошо передаёт драматизм возникавших проблем и поиска их решений, он написан в основном по воспоминаниям, поскольку в те годы публикаций на эту тему не было, отчёты не сохранились.

Разработку ионных источников вели в лаборатории П.М. Морозова сектора № 5 Л.А. Арцимовича. В работе принимали участие М.С. Иоффе, А.В. Жаринов, Б.Н. Маков, Ю.Д. Пигаров, В.И. Агафонов, В.В. Жуков, Б.Г. Брежнев, Н.И. Чижов, С.М. Нафтулин, Л.И. Староверов и Э.Н. Браверман.

**Ионная оптика сильноточных пучков.** Требовалось получить хорошо сфокусированные пучки изотопов с дисперсией, по крайней мере, 1 см при разнице масс  $\Delta M/M = 1\%$ , для того чтобы каждый из ионов  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  попадал в свою ячейку приёмника.

В ионном источнике область движения первичных электронов и ионизации хорошо локализована вследствие замагничности электронов, но диффундирующие поперёк магнитного поля ионы и электроны создают у стенки камеры вторичную плазму, из которой ионы могут уходить на стенку камеры. Для уменьшения ухода ионов на стенку камеры стенка находится под потенциалом анода. Щель в стенке камеры позволяет вытягивать ионы из камеры с помощью системы электродов (рис. 3). При этом ускоряющее напряжение должно быть достаточно большим (более 2,5 кВ, а реально использовались ускоряющие напряжения 30–50 кВ), иначе граница вторичной плазмы проникает в щель и вытягиваемый пучок оказывается расходящимся.

При увеличении ускоряющего напряжения граница плазмы приближается к столбу первичной плазмы, поскольку увеличивается скорость ионов и уменьшается

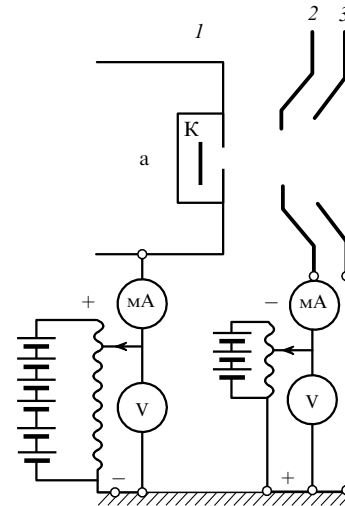


Рис. 3. Схема трёхэлектродной оптики.

их плотность в пучке. Вначале применили систему двух электродов (первый электрод — стенка камеры, второй — ускоряющий). Однако испытание системы двух электродов показало, что она не может обеспечить компенсацию объёмного заряда в пучке ионов, так как в этом случае все электроны, возникающие при ионизации пучком остаточного газа в разделительной камере, уходят на второй электрод. В результате объёмный заряд пучка оказывается нескомпенсированным, пучок расходится вследствие кулоновского растаскивания и разделение изотопов становится возможным лишь при ничтожно малых токах. Кроме того, ускоряющий электрод может плавиться под действием на него электронного тока. Был предложен третий электрод, с меньшим отрицательным потенциалом, чем у второго электрода. При этом несколько тормозятся ионы, но между вторым и третьим электродами образуется электронное облако, которое обеспечивает автоматическую компенсацию объёмного заряда пучка за счёт ионизации остаточного газа при токах меньших  $\sim 100 \text{ mA cm}^{-2}$ . Для компенсации больших токов была предложена "плазменная завеса". Над третьим электродом был установлен накаливаемый катод с потенциалом 250–300 В относительно третьего электрода, в результате в плоскости щели загорался разряд, через который свободно проходили ионы из источника, но электроны не могли пройти в источник и шли на компенсацию объёмного заряда.

Другая важная проблема — колебания сильноточного ионного пучка — оказалась связанной как с работой ионного источника, так и с компенсацией объёмного заряда пучка.

Так, было установлено, что флуктуации плотности ионного тока  $j$ , вызванные колебаниями в ионном источнике, должны быть меньше скорости ионизации остаточного газа

$$\frac{dj}{dt} < jnv\sigma,$$

где  $n$  — концентрация остаточного газа,  $v$  — скорость ионов,  $\sigma$  — сечение ионизации. В противном случае колебания в пучке усиливаются за счёт декомпенсации объёмного заряда.

Кроме того, колебания могут возникать и в самой ионной оптике. Поле второго электрода может прони-

кать в щель за третий электрод, и медленные вторичные ионы, дрейфуя в скрещенном  $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ -поле, скапливаются у третьего электрода и создают объёмный заряд, который возрастает до тех пор, пока не произойдёт выброс медленных ионов ко второму электроду и восстановление поля  $E$ . После чего процесс повторяется. Для подавления этих колебаний потенциал второго электрода относительно третьего не должен быть ниже определённой величины для данного источника.

Колебания в пучке возникают также в результате неоднородности пучка по сечению вследствие неоднородности скорости ионизации и возникающих объёмных зарядов. Эта проблема решалась, как было сказано ранее, подбором распределения подачи газа в ионный источник.

Даже приведённый краткий и весьма неполный обзор возникавших проблем показывает сложность общей задачи и взаимосвязь её частей. Решение этих проблем находилось как с помощью расчётов, так и эмпирическим подбором. В частности, геометрия электродов и расстояния между ними выбирались как с помощью электролитической ванны, так и непосредственно в установке.

Вопросами ионной оптики занимались В.С. Золотарев, А.Ф. Малов, А.М. Андрианов, Г.Я. Щепкин, С.Ю. Лукьянов, В.А. Суздальцев, В.М. Кельман и Е.П. Федосеев [6], а также сотрудники лаборатории Н.В. Федоренко в ЛФТИ. Обширные теоретические исследования атомных столкновений были проведены О.Б. Фирсовым.

Л.А. Арцимович принимал активное участие во всех работах, но особенно много внимания уделял ионной оптике, проводил конкретные расчёты. Им было предложено использовать магнитное поле, спадающее по радиусу, что увеличивало дисперсию по массам. Это предложение было реализовано позднее.

О масштабах проделанной работы можно судить по тому, что только на одной установке [7] было проведено около 1500 многочасовых экспериментов, а установок было несколько и работали они "в параллель", одновременно.

**Приёмник ионов** требовал разобраться в совершенно новых явлениях взаимодействия ионов с твёрдым телом. Тогда было не ясно, что происходит, когда быстрый ион падает на поверхность твёрдого тела: то ли он отражается, то ли внедряется в поверхность. Какова роль распыления? Возможно, все ионы, которые внедряются в поверхностный слой, потом распыляются вместе с этим слоем. Основные исследования в этой области, которые проводились непосредственно по ходу разработки приёмника ионов, явились началом большого направления науки о взаимодействии ионов с поверхностью.

Основные требования к приёмнику — это максимальное улавливание разделённых изотопов и малое разрушение под действием бомбардирующих ионов. Для того чтобы отражённые ионы не уходили из приёмника, пучок ионов должен падать под углом к поверхности. Тогда отражённые ионы направляются внутрь приёмника. Но при наклонном падении возрастает коэффициент распыления и быстрее разрушается приёмник. Все эти трудности были преодолены, и был создан приёмник, обеспечивающий одновременный приём и хорошее разделение всех изотопов, ресурс работы которого составлял 10000 ампер-часов.

Разрабатывалась также рекуперация энергии побочных ионов (таких, как ионы  $\text{Cl}^+$ ). Для этого создавались приёмники с торможением, что снижало нагрузку на высоковольтный выпрямитель примерно вдвое, поскольку ток ионов  $\text{U}^+$  составлял  $\sim 50\%$ . Рекуперировать энергию основных пучков нельзя, так как при этом происходит потеря собираемых ионов. Поэтому в дальнейшем, при использовании электромагнитного метода для получения стабильных изотопов, когда нужны все изотопы, от рекуперации отказались.

В Курчатовском институте проблемы приёмника ионов решали И.Н. Головин, Б.В. Панин, В.Г. Тельковский, в Сухуми — М. Ардене, В.М. и М.И. Гусевы, Р.А. Демирханов, Д.В. Чукаели.

Вся работа велась очень интенсивно. Вот поэтапно ход работ и достижений [1].

5 ноября 1945 г. Л.А. Арцимовичем (Лаборатория № 2) получено за сутки 70 микрограммов урана-235, обогащённого до 12–15%.

Конец 1946 г. Сектором № 5 Лаборатории № 2 и сектором № 1 ЛФТИ выполнены следующие работы:

1) теоретически и экспериментально изучены различные типы систем ускорения и формирования ионного потока;

2) разработано несколько экспериментальных типов ионных источников;

3) проведён анализ состава ионов при использовании ионного источника с четырёхфтористым ураном в качестве рабочего вещества;

4) спроектированы и изготовлены разделительные камеры для проведения первоначальных опытов по разделению изотопов.

Обогащение урана более 90%. Ионный ток 20 мА. Источники работают 1–2 ч.

Полученный опыт позволил начать проектирование и изготовление опытного промышленного образца разделительной установки на заводе № 814 (Свердловск-45).

Конец 1947 г. Величина ионного тока доведена до 50 мА, 8–10 ч непрерывной работы.

IV квартал 1950 г. На установке СУ-20 (20 разделительных камер) завода № 814 (Свердловск-45) получена первая партия высокообогащённого урана-235. Ионный ток 100 мА. Продолжительность работы источников — до двух суток. Таким образом, было создано промышленное выделение урана-235 для атомной бомбы. Параллельно с работами по электромагнитному методу выделения урана-235 велись работы по молекулярным методам разделения изотопов на заводе № 813 (Челябинск-40) под руководством И.К. Кикоина. Молекулярные методы, обладающие значительным превосходством по производительности, не могли дать более 75% обогащения по изотопу урана-235. В то время как для атомной бомбы нужен был уран с 94%-ным обогащением. Первая советская атомная бомба, испытанная в августе 1949 г., использовала плутоний, полученный в атомном реакторе. Вторая атомная бомба, испытанная в октябре 1951 г., использовала уран-235. Для неё был взят уран с 75%-ным обогащением, полученный на заводе № 813 и доведённый до нужной кондиции электромагнитным методом.

Однако в октябре 1951 г. ввиду прогресса молекулярных методов разделения изотопов по обогащению урана-235 Распоряжением Совета Министров СССР завод № 814 как самостоятельное предприятие был ликвидирован. Установки по электромагнитному раз-



делению изотопов вошли в состав оборудования завода № 418, ориентированного на производство  ${}^6\text{Li}$  для водородной бомбы с использованием реакции  ${}^6\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + {}^4\text{He} + 4,785 \text{ МэВ}$ , согласно предложению В.Л. Гинзбурга, впервые изложенному им в секретных отчётах от 2 декабря 1948 г., 3 марта и 23 августа 1949 г. (см. подробнее [8]). Задача была успешно разработана, и в марте 1953 г. была испытана первая советская водородная бомба, использующая  ${}^6\text{Li}$ , полученный полностью электромагнитным методом. Это имело огромное значение для приоритета Советского Союза.

После этого успеха более 3500 человек были награждены Сталинскими премиями, среди них именно за электромагнитный метод разделения изотопов были награждены сотрудники Курчатовского института Л.А. Арцимович, И.Н. Головин, П.М. Морозов, А.М. Андрианов, Г.Я. Щепкин, Б.А. Алексеев, В.С. Золотарёв, Б.Н. Маков, С.Ю. Лукьянов, М.С. Иоффе, В.В. Жуков, а также сотрудники Сухумского физико-технического института М. Ардене, В.М. Гусев, Р.А. Демирханов, Д.В. Чукасели.

Две первые водородные бомбы использовали  ${}^6\text{Li}$ , полученный электромагнитным методом, после чего производство  ${}^6\text{Li}$  перешло на молекулярные методы. А мощные электромагнитные установки стали применять для разделения стабильных изотопов. К началу 1970-х годов были разработаны технологии разделения необходимых стабильных изотопов более 40 элементов. В СССР на установке СУ-20 были получены стабильные изотопы многих элементов в количестве от нескольких долей грамма до многих килограммов (в зависимости от распространённости в природе). Началось широкое применение стабильных изотопов для медицинских целей, ядерно-физических исследований, метода "меченых атомов" в биологии, нейтронно-активационного анализа в геологии и др.

Существенно повышено качество изотопов, прежде всего изотопного обогащения, что связано со строительством новых электромагнитных установок, предназначенных для разделения стабильных изотопов. Сейчас применяются установки С-2 и С-5М. Для сепарации используются неоднородные магнитные поля, что увеличивает дисперсию в 2–5 раз. Созданию таких установок способствовали работы Л.А. Арцимовича, А.Ф. Малова, Е.П. Федосеева и др.

Весьма важно также для дальнейшего развития метода продолжающееся совершенствование источников ионов для электромагнитной сепарации. Разработаны источники ионов с высокой эффективностью по разделяемому веществу, высокотемпературные источники ионов с рабочей температурой до 1500 °С, пригодные для промышленного получения изотопов элементов платино-палладиевой группы без применения газообразного фтора (без негативного влияния на окружающую среду), а также других элементов с высокой температурой испарения.

Электромагнитный метод, хотя и не может обеспечить высокой производительности, присущей молекулярным методам, тем не менее до сих пор играет заметную роль в производстве стабильных изотопов. Только этим методом сейчас производятся изотопы 25–30 элементов. Среди них — все редкоземельные элементы, щелочноземельные и щелочные элементы, таллий и др.

Таблица (составлена Р.Н. Кузьминым в 1998 г.)

Элемент, изотоп	Установка	Природная концентрация, %	Достигнутое обогащение	Кратность обогащения
${}^{176}\text{Yb}$	С-2	12,7	99,43	1030
${}^{168}\text{Yb}$	С-2	0,13	86,9	5096
${}^{168}\text{Yb}$	С-2	0,13	82,4	3597
${}^{160}\text{Gd}$	С-5М	21,9	99,87	2740
${}^{157}\text{Gd}$	С-5М	15,7	99,5	1070
${}^{151}\text{Eu}$	С-2	47,77	99,91	1213
${}^{153}\text{Eu}$	С-2	52,23	99,97	3047
${}^{104}\text{Pd}$	С-2	11,1	99,1	882
${}^{102}\text{Pd}$	С-2	1,0	95,5	2100
${}^{67}\text{Zn}$	С-5М	4,1	97,0	750

Сейчас лаборатория электромагнитного разделения изотопов Института ядерного синтеза (ИЯС) РНЦ "Курчатовский институт" производит следующие стабильные изотопы: Ca, Cd, Gd, Eu, Hg, Pd, Sm, Tl, Yb, Zn, которые поставляются на внутренний и внешний рынки: в Германию, Иран, Канаду, Китай, Южную Корею, США, Тайвань, Узбекистан, Францию, Швецию, Японию. В таблице представлены производимые в лаборатории изотопы и кратность их обогащения [9].

Однако основной ценностью является не столько получение стабильных изотопов электромагнитным методом, сколько богатейший опыт научных и технических решений, полученный при разработке электромагнитного разделения изотопов.

**Ионные источники**, разработанные тогда, легли в основу большинства ионных источников, используемых теперь в экспериментальных и технологических ионно-пучковых установках.

По-видимому, первым "нецелевым" применением разработанного сильноточного ионного источника был нейтронный источник для исследовательских целей, созданный в конце 1950-х годов. При этом использовалась ионная имплантация. Ионы дейтерия с энергией 200 кэВ внедрялись в титан до достижения концентрации, близкой к соотношению 1:1, после чего тот же пучок ионов дейтерия, бомбардирующий титан, насыщенный дейтерием, давал нейтроны в результате реакции  $\text{D} + \text{D} \rightarrow n + {}^3\text{He}$ . Эта же реакция использовалась тогда же В.М. и М.И. Гусевыми для изучения распределения по глубине внедрения дейтерия в металлы.

На основе ионного источника, разработанного в секторе П.М. Морозова (рис. 4) при участии группы конструкторов "Института двигателей" (Особое конструкторское бюро (ОКБ) "Заря"), в 1960-х годах был создан космический ионный двигатель. В состав коллектива курчатовцев, создававших двигательный блок, входили Н.Ф. Балаев, А.Г. Зимелёв, А.Я. Козлов, Р.Н. Кузьмин, Л.И. Староверов, Ю.Д. Пигаров, Л.Н. Пильгунов, Н.И. Чижов и ряд других сотрудников. В содружестве с курчатовцами работал коллектив конструкторов и экспериментаторов ОКБ "Заря": Хан Гирун, В.А. Ветров, М.Т. Дедюхин, Г.М. Антропов, В.А. Щепетиллов и др. Многощелевая модель ионного двигателя тягой 10 г, работающая на висмуте, продемонстрировала в 1968 г. ресурс непрерывной работы 3016 ч. Проведённые в эти годы исследования выявили несколько положительных особенностей ионных двигателей по сравнению с другими типами электрических ракетных двигателей (ЭРД):

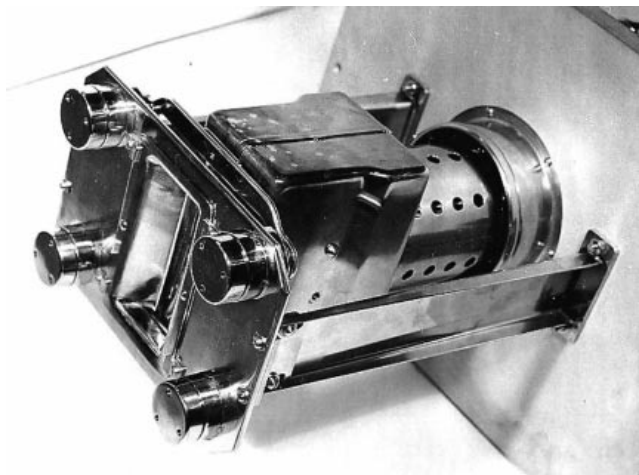


Рис. 4. Сильноточный ионный источник И-22, разработанный в лаборатории П.М. Морозова.

- более высокий энергетический к.п.д.;
- возможность большего удельного импульса, т.е. отношения тяги к весовому секундному расходу рабочего тела;
- большой ресурс работы;
- более широкий выбор рабочих тел.

Этими особенностями уже в те годы определилась наиболее предпочтительная область использования ионных двигателей — прежде всего для длительных космических кампаний. Плазменные двигатели выглядели предпочтительнее для ближнего космоса как маневровые двигатели, способные за относительно короткое время переводить космические объекты с одной орбиты на другую.

По инициативе А.Г. Зимелёва в декабре 1971 г. был выведен на орбиту искусственный спутник Земли "Метеор" с ионным двигателем "Зефир" (рис. 5), рабо-



Рис. 5. Ионный двигатель "Зефир".

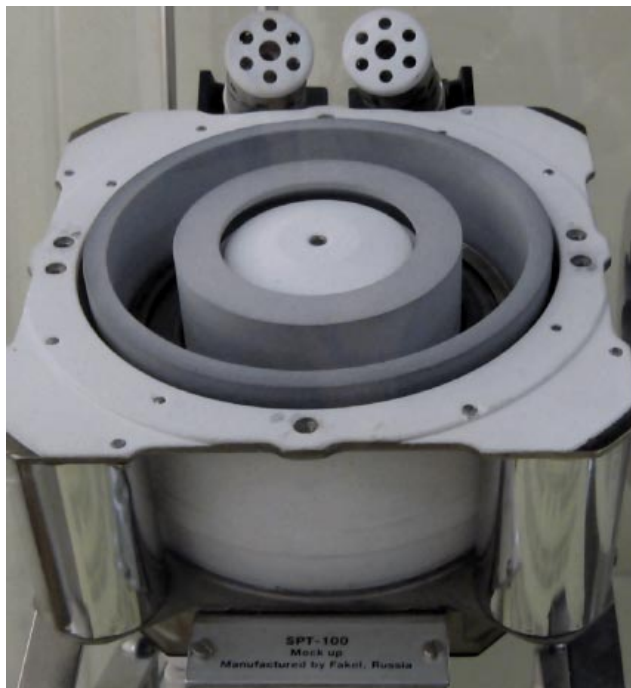


Рис. 6. Стационарный плазменный двигатель "Эол".

тающий на жидкометаллическом рабочем теле (ртути), а также стационарный плазменный двигатель (СПД) "Эол" (рис. 6) конструкции А.И. Морозова [10], также сотрудника отдела плазменных исследований Л.А. Арцимовича. Испытания обоих космических двигателей прошли успешно. Было подтверждено соответствие всех параметров ионного двигателя ожидаемым величинам, в том числе соответствие расчётной и реально создаваемой им тяги.

Однако сейчас ионные двигатели не находят применения, так как сфера их предпочтительного использования — это длительные космические полёты. При этом нужна более мощная бортовая электроэнергетика, которой сейчас нет. О многолетней космической одиссее на космическом корабле с маршевыми ионными двигателями пока можно только мечтать. В то же время стационарные плазменные двигатели сегодня востребованы, поскольку в настоящее время практическому космосу необходимы маневровые двигатели, способные за относительно короткое время переводить космические объекты с одной орбиты на другую, а таковыми на сегодня, без сомнения, являются СПД.

На основе ионных источников, созданных в лаборатории П.М. Морозова, были разработаны ионные источники многозарядных ионов для циклотрона в Дубне. С их помощью в лаборатории Г.Н. Флёрова были получены искусственные трансурановые элементы. За эти работы коллектив, возглавляемый Г.Н. Флёровым, получил в 1975 г. Государственную премию, в том числе Б.Н. Маков, сотрудник Курчатовского института, разработавший источник многозарядных ионов.

*Ионная оптика* также дала хорошее наследие. В ионных имплантёрах и ионных инжекторах используются непосредственно решения, найденные при разработке электромагнитного разделения изотопов.

Проблему нейтрализации ионных пучков, возникшую в случае сильноточных пучков электромагнитного

метода разделения изотопов, потребовалось решать и для космических двигателей. Для ионного космического двигателя "Зефир" эффективный плазменный нейтрализатор разработали Р.Н. Кузьмин и Н.Ф. Балаев. Ещё ранее, в 1966–1970 годах, нейтрализатор использовался на ионосферной лаборатории "Янтарь".

Проблемы сильноточных ионных пучков стимулировали глубокие исследования физики атомных столкновений. Мировую известность приобрели работы в этой области лаборатории Н.В. Федоренко в ФТИ, а также О.Б. Фирсова и В.А. Беляева в Курчатовском институте. За цикл работ "Элементарные процессы и неупругое рассеяние при атомных столкновениях" В.В. Афросимов, В.А. Беляев, В.М. Дукельский, Н.В. Федоренко и О.Б. Фирсов в 1972 г. были удостоены Ленинской премии.

Но, пожалуй, наибольшее наследие дали работы по взаимодействию ионов с поверхностью, начатые при разработке приёмника ионов. Исследования взаимодействия ионов с поверхностью были развёрнуты ещё шире после окончания работ по получению урана-235 и лития-6. Такие исследования проводили, прежде всего, В.М. и М.И. Гусевы, бывшие сотрудники Сухумского физико-технического института, перешедшие в Курчатовский институт в начале 1960-х годов, а также Б.В. Панин, В.Г. Тельковский и В.М. Чичеров — сотрудники отдела Л.А. Арцимовича в Курчатовском институте, В.А. Молчанов, Е.С. Машкова — сотрудники кафедры "Атомной физики и электронных явлений" физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, которую возглавлял Л.А. Арцимович. Лев Андреевич организовал на этой кафедре серьёзные исследования взаимодействия ионов с поверхностью. В Курчатовском институте был изготовлен масс-монохроматор (масс-сепаратор) и передан в Научно-исследовательский институт ядерной физики (НИИЯФ) МГУ (там работали сотрудники кафедры Л.А. Арцимовича). Исследования взаимодействия ионов с поверхностью были развёрнуты также на кафедре электроники физфака МГУ В.Е. Юрасовой и в Ташкенте в Институте электроники АН УЗССР У.А. Арифовым, выпускником Ленинградского университета, имевшим тесные связи с ФТИ и с Курчатовским институтом. Эти лаборатории заняли ведущие позиции в мире.

Ионное распыление твёрдых тел было изучено главным образом в конце 1950-х годов и в 1960-х годах. Благодаря этим исследованиям теперь можно управлять процессами эрозии в самых разных ионно-пучковых и плазменных установках, включая термоядерные, в том числе в ИТЭР (Международном экспериментальном термоядерном реакторе). Распыление широко используется также и в технологиях нанесения покрытий самого разного назначения.

Проводились глубокие исследования отражения ионов от поверхности, ион-ионной эмиссии (с использованием вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС)), которые легли в основу современных методов диагностики поверхности.

Сотрудники кафедры Л.А. Арцимовича и его отдела в Курчатовском институте сделали официально зарегистрированное открытие "Явление анизотропии ионно-электронной эмиссии монокристаллов" (Е.С. Машкова, В.А. Молчанов, Д.Д. Одинцов, В.Г. Тельковский и



Рис. 7. Ионно-пучковый ускоритель ИЛУ. Энергия ионов — до 40 кэВ, общий ток — до 30 мА, магнитное поле — до 5500 Э. Площадь обработки  $15 \times 20 \text{ см}^2$ . Вид ионов — большинство элементов периодической системы.

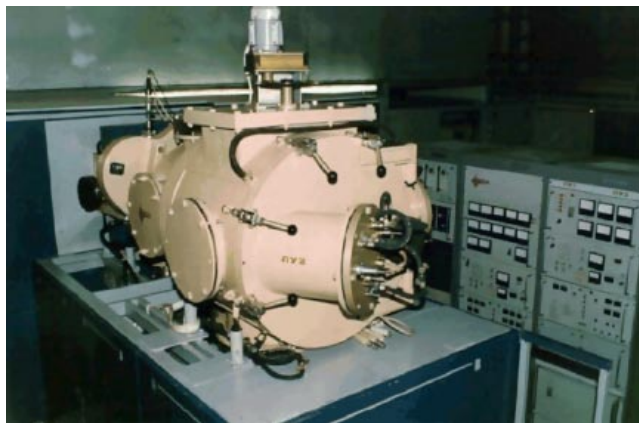
В.М. Чичеров. Диплом на открытие № 126 с приоритетом 13 октября 1960 г.).

Замечательным наследием электромагнитного разделения изотопов стала ионная имплантация. В.М. и М.И. Гусевы одними из первых поняли, что установки для электромагнитного разделения изотопов, позволяя управлять внедрением ионов в поверхностные слои, наилучшим образом подходят для легирования полупроводников с целью получения р–n-перехода вблизи поверхности. Впервые инверсию типа проводимости в германии р-типа получил М.М. Бредов в 1961 г., облучая германий ионами  $\text{Li}^+$ . В том же году В.М. и М.И. Гусевы получили электронно-дырочные переходы в кремнии, облучая его ионами III и V групп. В 1963 г. в отделе Л.А. Арцимовича в Курчатовском институте была создана лаборатория ионной бомбардировки (ЛИБ), руководимая В.М. Гусевым. Фундаментальные работы, выполненные в ЛИБ в 1960-х годах и начале 1970-х годов, заложили основу метода ионной имплантации полупроводников. В результате в 1979 г. коллективу сотрудников во главе с М.И. Гусевой за работу "Разработка и освоение серийного выпуска специального технологического ионно-лучевого оборудования; разработка основ промышленной технологии ионной имплантации для серийного производства и создания новых типов полупроводниковых приборов и интегральных схем для народного хозяйства и оборонной техники" была присуждена Государственная премия СССР в области науки и техники.

Заложив основы ионной имплантации полупроводников, ЛИБ перешла с середины 1970-х годов на решение других проблем: исследование взаимодействия плазмы с поверхностью в связи с термоядерными исследованиями и на ионную имплантацию непроводниковых материалов. Ионная имплантация полупроводников уже имела хорошую основу для дальнейшего развития.

Сейчас в ЛИБ работает ионно-пучковый ускоритель ИЛУ (импульсный линейный ускоритель) [11] с разделением ионов по массам — фактический аналог масс-сепаратора С-5М (рис. 7). Ускоритель ИЛУ используется как для научных целей, так и в технологии ионной





**Рис. 8.** Имплантационно-плазменный ускоритель "Вита". Энергия: высокоэнергичные ионы —  $4,0 \times 10^4$  эВ, низкоэнергичные ионы — 250–300 эВ. Плотность тока: высокоэнергичные ионы —  $2,0 \times 10^{-4}$  А см<sup>-2</sup>, низкоэнергичные ионы —  $2,5 \times 10^{-2}$  А см<sup>-2</sup>. Площадь обработки 110 × 250 мм<sup>2</sup>.

имплантации. Ионная имплантация металлов позволяет увеличить их твёрдость, коррозионную стойкость, износостойкость и уменьшить коэффициент трения. Она успешно применяется для волочильного, режущего и штамповочного инструментов. Ионная имплантация эластомеров также повышает их износостойкость и уменьшает коэффициент трения. Эластомерные вкладыши дейдвудных подшипников ледокола "Арктика" после ионной имплантации выдержали поход на Северный полюс и не потребовали после этого замены. Тогда как вкладыши из эластомеров лучших зарубежных фирм требуют замены после каждого крупного похода. Ионная имплантация эластомеров использовалась также для вкладышей дейдвудных подшипников ледокола "Леонид Брежнев" и для вкладышей насосов на Калининской атомной электростанции в г. Удомля.

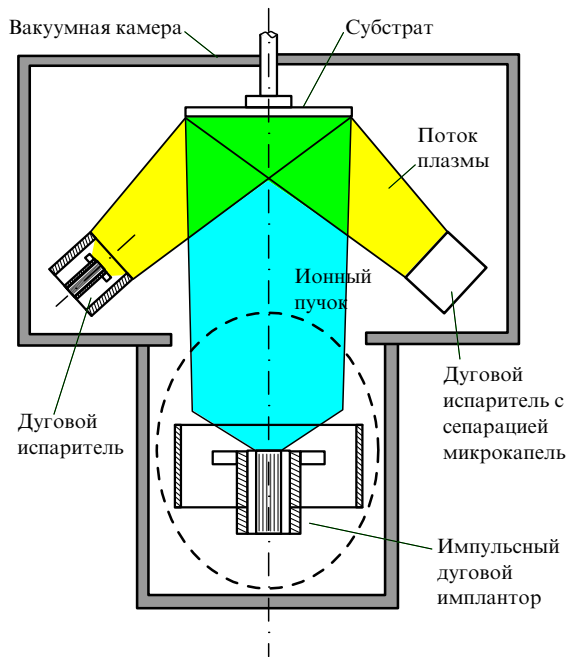
Позднее был создан имплантационно-плазменный ускоритель "Вита" [12], в котором имеются пучки ионов высокой (до 40 кэВ) и низкой (250–300 эВ) энергии (рис. 8).

Установки "Вита" применяются на Уфимском моторостроительном объединении для ионной имплантации при финишной обработке лопаток компрессора, увеличивая в 2,5–3 раза время их жизни по сравнению с таковым в традиционной технологии.

Сейчас разработана комбинированная технология — вакуумное нанесение покрытий из плазмы (в том числе, реактивное осаждение) сочетается с одновременной ионной имплантацией пучком высокоэнергетических (до 50 кэВ) ионов металлов (рис. 9). Такая комбинированная технология улучшает адгезию покрытий, в том числе многослойных, а также их технические характеристики (твёрдость, износостойкость и др.).

Комбинированная технология будет применяться в совместном проекте Роснано, Научно-производственного объединения (НПО) "Сатурн" и Газпромбанка (создание инструментального завода в Рыбинске НПО "Сатурн" на основе технологий и оборудования РНЦ КИ).

В заключение можно сказать, что электромагнитное разделение изотопов сыграло ключевую роль в осуществлении Атомного проекта СССР и инициировало



**Рис. 9.** Установка для комбинированной технологии, сочетающей вакуумное плазменное нанесение покрытий и облучение ионным пучком.

многочисленные направления исследований, приведшие к замечательным достижениям не только научного плана, но и к современным технологиям. Плоды наследия электромагнитного метода разделения изотопов принесут ещё немало успехов.

Я благодарен за помощь [Р.Н. Кузьмину], В.М. Чеснокову, В.А. Щепетиллову, В.Г. Столяровой, С.Н. Коршунову, И.Д. Скорлупкину, Л.И. Елизарову, В.А. Беляеву и Г.А. Елисееву.

## Список литературы

1. Рябев Л Д (Общ. ред.), Гончаров Г А (Отв. сост.) *Атомный проект СССР. Документы и материалы Т. 2 Атомная бомба. 1945–1954* (М.: Физматлит; Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2000)
2. Dempster A J *Phys. Rev.* **11** 316 (1918)
3. Арцимович Л А и др. *Атомная энергия* **3** 483 (1957) [Artsimovich L A et al. *At. Energy* **3** 1361 (1957)]
4. Морозов П М, Маков Б Н, Иоффе М С *Атомная энергия* **2** 272 (1957) [Morozov P M, Makov B N, Ioffe M S *At. Energy* **2** 327 (1957)]
5. Романовский М К *Физика плазмы в проблеме электромагнитного разделения изотопов* (М.: Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова, 1990)
6. Малов А Ф, в сб. *Некоторые вопросы экспериментальной и теоретической физики* (М.: Атомиздат, 1964) с. 54
7. Золотарев В С, Ильин А И, Кома Е Г "Разделение изотопов на электромагнитных установках в Советском Союзе", в сб. *Труды 2-й междунар. конф. по мирному использованию атомной энергии, Женева, 1958. Доклады советских ученых Т. 6* (М.: Атомиздат, 1959) с. 87
8. Гончаров Г А *УФН* **166** 1095 (1996) [Goncharov G A *Phys. Usp.* **39** 1033 (1996)]
9. Игнатенко В Г "Стабильные изотопы. Основные применения", Препринт ИАЭ-4832/12 (М.: ЦНИИАтоминформ, 1989)
10. Арцимович Л А и др. *Космические исследования* **12** 451 (1974) [Artsimovich L A et al. *Cosmic Res.* **12** 414 (1974)]
11. Гусев В М и др. *ПТЭ* (4) 19 (1969)
12. Гусева М И "Ионная имплантация в металлы" *Поверхность* (4) 27 (1982)