



СТРОИТЕЛЬСТВО

Н.И. БУШУЕВ



# ИСТОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Н.И. Бушуев

## ИСТОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов РФ  
по образованию в области строительства в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений, обучающихся по программе  
бакалавриата по направлению подготовки 270800 «Строительство»  
(профиль «Промышленное и гражданское строительство»),  
и для студентов, обучающихся по программе специалитета  
по специальности 271101 «Строительство уникальных зданий  
и сооружений» (специализация «Строительство сооружений  
тепловой и атомной энергетики»)  
(19.05.2014 г. № 102-15/833)*

Москва 2015

УДК 621.311.25  
ББК 31.47  
Б94

Рецензенты:

профессор, доктор технических наук *В.Б. Николаев*,  
зам. начальника отдела ОСРО «НИИ энергетических сооружений»;  
профессор, доктор технических наук *В.Н. Соловьев*, ФГБОУ ВПО «МГСУ»

Б94

**Бушуев, Н.И.**

История и технология ядерной энергетики : учебное пособие / Н.И. Бушуев ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. гос. строит. ун-т. Москва : МГСУ, 2015. 232 с.  
ISBN 978-5-7264-1060-9

Рассмотрена специфика технологии основных процессов производства природного урана, его обогащения, изготовления тепловыделяющих элементов и сборок, радиохимической регенерации отработавшего ядерного топлива и обращения с радиоактивными отходами. Дана функциональная связь технологии и применяемого оборудования со строительными решениями. Приведены основные природные радиоактивные изотопы, требующие радиационного контроля при строительстве зданий и сооружений. Рассмотрены вопросы защиты окружающей среды от внешних техногенных воздействий, в том числе и от атомных станций.

Для студентов, обучающихся по программе бакалавриата по направлению подготовки 270800 «Строительство» (профиль «Промышленное и гражданское строительство»), и для студентов, обучающихся по программе специалитета по специальности 271101 «Строительство уникальных зданий и сооружений» (специализация «Строительство сооружений тепловой и атомной энергетики»).

УДК 621.311.25  
ББК 31.47

ISBN 978-5-7264-1060-9

© ФГБОУ ВПО «МГСУ», 2015

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В институте гидротехнического и энергетического строительства (ИГЭС) Московского государственного строительного университета студенты второго — пятого курсов, специализирующиеся в области строительства и проектирования ядерных установок, изучают дисциплины «История и технология энергетики», «Строительство ядерных установок», «Безопасность АЭС», «Здания ядерных установок» и др.

Второе издание учебного пособия сформировано в соответствии с учебными планами и рабочими программами на основе конспектов лекций, неоднократно дополнявшихся автором по мере совершенствования строительного процесса и технологии ядерных установок.

Во втором издании кратко изложены различные способы получения электроэнергии. Тепловые (ТЭС), атомные (АЭС) и гидроэлектростанции (ГЭС) в мире занимают ведущее место. ТЭС широко распространены. Они используют органическое топливо, при сжигании которого нагревается теплоноситель с образованием пара. Пар поступает на турбину, и в генераторе вырабатывается электричество. ГЭС используют энергию движения воды. АЭС — реакции деления урана и плутония. Нетрадиционные методы используют энергию солнца, ветра, подземных источников и т.д.

Вероятно, к концу текущего столетия органическое топливо в значительной мере будет израсходовано. Роль ТЭС сократится. Кроме того, в России около 70 % ТЭС требуют капитального ремонта или подлежат закрытию.

Гидроэнергетика имеет сезонный характер, в равнинных областях России ГЭС не экономичны, и предпочтение отдается другим установкам.

Нетрадиционные методы пока не нашли широкого применения из-за дороговизны оборудования и ряда других недостатков. Мощности таких установок ограничиваются десятками или, в крайнем случае, сотнями мегаватт (МВт).

Запасов сырья для АЭС хватит на тысячи лет. По экономичности они соперничают с гидроэлектростанциями. Недостатком АЭС является наличие радиоактивных отходов и риск аварий. Чаще всего аварии происходят из-за человеческого фактора.

Все большее внимание в разных странах отводится термоядерному синтезу — термоядерным реакторам (ТЯР). Во Франции создан и реализуется международный проект *исследовательского термоядерного энергетического реактора (ИТЭР)*.

Таким образом, наиболее перспективными методами выработки электроэнергии являются атомная и термоядерная энергетика.

Мотивом для подготовки данной работы явилось отсутствие единого учебника по проектированию и строительству объектов атомной энергетике. При этом весьма важным является связь технологии, применяемого оборудования и функциональной увязки со строительными решениями.

Кратко изложены история развития и основы ядерной физики. Более подробно описан урановый топливно-ядерный цикл, включая экологические особенности проектирования, строительства и эксплуатации различных ядерных объектов, радиационную безопасность, переработку отработанного ядерного топлива и вывод ядерных установок из эксплуатации.

Построение дисциплины предусматривает систематические проверки текущих знаний студентов на основе практических занятий и самостоятельных работ. В цикл контрольных мероприятий входят контрольные упражнения, выполняемые в аудитории на основе индивидуальных курсовых работ и рефератов. Это позволяет выявить правильность ведения конспекта и дисциплинирует студентов в части посещения занятий. Организованный таким образом учебный процесс полностью оправдывает поставленные задачи.

Накопленный опыт не исключает необходимости дальнейшего совершенствования работы.

## **ВВЕДЕНИЕ.**

### **ИСТОРИЯ МИСИ — МГСУ — ТЭС — СЯУ**

В 1905 г. в Москве было открыто Среднее строительно-техническое училище инженера М.К. Приорова, а в 1907 г. — Московское среднее строительно-техническое училище Товарищества инженеров и педагогов, которое в 1917 г. преобразуется в Среднее политехническое училище с правами государственного учебного заведения, а в 1919 г. — в 1-й Московский строительный техникум.

Основание МИСИ относится к 1921 г., когда Среднее строительно-техническое училище инженера М.К. Приорова и 1-й Московский строительный техникум были преобразованы в практические строительные институты, а затем объединены в один Московский практический строительный институт в Малом Харитоньевском переулке, дом 5.

В 1923 г. Московский практический строительный институт объединяется с Московским институтом гражданских инженеров, основанным в 1922 г., и располагается на Покровском бульваре, дом 5, где сейчас находится Военно-инженерная академия.

В 1924 г. Московский институт гражданских инженеров входит в состав инженерно-строительного факультета МВТУ. В начале 1930 г. все факультеты МВТУ были реорганизованы в самостоятельные вузы. На базе инженерно-строительного факультета было создано Высшее инженерно-строительное училище (ВИСУ).

В 1932—1933 гг. Учебно-строительный комбинат Союзстроя, созданный в 1930 г., после присоединения к нему «Института в производстве» Народного Комиссариата тяжелой промышленности, конструкторского факультета Московского архитектурно-строительного института и строительного курсового института НКТП преобразуется в вуз — Московский высший строительный институт (МВСИ). ВИСУ и МВСИ преобразуются в МИСИ.

В октябре 1941 г. МИСИ под руководством проф. Н.С. Стрелецкого эвакуируется в Новосибирск, а 8 ноября 1941 г. начинаются учебные занятия. В январе 1942 г. был осуществлен первый ускоренный выпуск инженеров-строителей. В дальнейшем учебные занятия проводились по учебным планам военного времени с защитой дипломных проектов.

В октябре 1943 г. преподаватели, служащие института и студенты вернулись в Москву. В 1944 г. МИСИ разместился на Спартаковской улице, дом 2.

В 1959 г. МИСИ объединяется с Московским институтом инженеров городского строительства (МИИГС) и располагается на Шлюзовой набережной, дом 8.

С 1966 г. МИСИ является базовым строительным институтом. В 1996 г. МИСИ преобразован в МГСУ.

В МГСУ подготовка инженеров, специалистов, бакалавров, магистров и аспирантов осуществляется по очной, вечерней и заочной формам обучения как на госбюджетной, так и на контрактной основе.

Факультет теплоэнергетического строительства — первый в стране факультет этого профиля — создан в 1967 г. на базе кафедр строительства ядерных установок (СЯУ), строительства тепловых и атомных электростанций (СТАЭ) и ряда других.

Первый декан факультета — доцент кафедры теоретической механики С.Г. Терзибашянц. Позднее деканами факультета были профессор кафедры СЯУ В.Б. Дубровский, В.Б. Гетманов, П.А. Лавданский П.А. и А.П. Пустовгар.

В 2005 г. на базе факультетов теплоэнергетического строительства, гидротехнического и специального строительства и водоснабжения и водоотведения создается институт энергетического, водохозяйственного и природоохранного строительства (ИЭВПС). В 2011 г. ИЭВПС преобразован в институт гидротехнического и энергетического строительства (ИГЭС).

Кафедра строительства ядерных установок была создана 31 июля 1958 г. приказом № 803 Министерства высшего образования СССР по инициативе и при непосредственном участии А.Н. Комаровского в составе факультета промышленного и гражданского строительства. Она была ориентирована на подготовку инженеров-строителей по проектированию и строительству предприятий атомной промышленности. Ученый Совет МИСИ избрал заведующим кафедрой доктора технических наук, профессора Комаровского Александра Николаевича.

А.Н. Комаровский возглавлял кафедру СЯУ до 1973 г. При нем были заложены ключевые принципы учебной, учебно-методической и научной работы, которые позволили кафедре стать уникальным учебно-научным подразделением, подготовившим и воспитавшим плеяду крупных деятелей, организаторов и руководителей производства в области исследования, проектирования и строительства ядерных установок, и решать принципиально новые задачи.

А.Н. Комаровский родился 20 мая 1906 г. в Петербурге в семье инженера-строителя. В 1923 г. в г. Москве окончил школу, а в 1928 г. — МИИТ. Работал на строительстве канала Москва — Волга. С 1939 г. заместитель наркома СССР по строительству. Во время Великой Отечественной войны был начальником управления по строительству оборонительных сооружений, командующим 5-й саперной армией. С 1942 г. — начальник строительства Челябинского металлургического комбината, а с 1944 г. — начальник Главного управления промышленного строительства. С 1945 г. и до конца 1963 г. руководил проектированием, строительством и монтажом объектов предприятий атомной промышленности Министерства среднего машиностроения. По поручению Совета министров СССР с 1948 г. по совместительству руководил проектированием и строительством Московского государственного университета до сдачи его в эксплуатацию в 1953 г. В 1963 г. назначен заместителем министра обороны СССР по строительству и расквартированию войск. А.Н. Комаровский имел воинское звание генерала армии.

За успешную работу в области строительства и обороны страны А.Н. Комаровский удостоен многих наград: Герой Социалистического труда, лауреат Ленинской и Государственной премий, 13 орденов и 8 медалей СССР.

В 1956 г. А.Н. Комаровскому присвоена ученая степень доктора технических наук, а в 1957 г. — ученое звание профессора.

С 1973 по 2005 г. кафедру возглавлял ученик и продолжатель дела Комаровского профессор, доктор технических наук Виталий Борисович Дубровский. Под руководством В.Б. Дубровского на кафедре получили дальнейшее развитие принципы учебно-педагогической и научной работы, заложенные А.Н. Комаровским. Решались задачи, связанные с развитием фундаментальных и прикладных исследований на важнейших направлениях науки и техники.

В настоящее время по специализации СЯУ работают 16 преподавателей.

Преподавателями изданы несколько десятков учебников, учебных пособий и методических указаний в России и за рубежом. Особо следует отметить такие издания, как «Строительство ядерных установок» (А.Н. Комаровский), два издания «Строительство атомных электростанций» (В.Б. Дубровский, П.А. Лавданский, И.А. Енговатов), справочное пособие «Радиационная стойкость минераль-



ных и полимерных строительных материалов» (А.В. Денисов, В.Б. Дубровский, В.Н. Соловьев).

Сотрудники кафедры проводили научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы на атомных электростанциях, исследовательских реакторах, ускорителях заряженных частиц и других объектах в России и за рубежом.

По результатам научно-исследовательских работ выполнены и успешно защищены 5 докторских и 38 кандидатских диссертаций.

За период своего существования кафедра подготовила несколько тысяч инженеров-строителей, которые успешно работают в производственных, проектных, управленческих и научно-исследовательских организациях строительного комплекса России.

В сентябре 2013 г. кафедра строительства ядерных установок была объединена с кафедрой строительства тепловых и атомных электростанций под общим названием «Строительство объектов тепловой и атомной энергетики».

# Глава 1

## ВИДЫ ЭНЕРГИИ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

### 1.1. Источники энергии

Первобытный человек в своем распоряжении имел только энергию собственных мышц, равную около 0,1 л. с, и ежедневно расходовал не более двух-трех килокалорий. В настоящее время мускульная сила человека составляет менее 1 % от общего потребления энергии. Применяя энергию падающей воды, угля, нефти и газа при сжигании, человек для своих нужд стал использовать до 200 ккал. Увеличение расхода энергии связано с развитием цивилизации, ростом населения, расширением и углублением знаний человека об окружающем мире. Это вынуждало изыскивать новые энергоресурсы и новые способы преобразования энергии одного типа в другой. ООН прогнозирует рост населения земли к 2125 г. до 12 млрд чел. За последние 50 лет израсходовано энергии больше, чем за всю предыдущую историю. Структура использования энергоресурсов по мере развития производительных сил приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1

**Структура использования энергоресурсов**

Год	Виды энергоресурсов, %
500 000 лет до н.э.	Сила мускул (100)
2000 лет до н.э.	Сила мускул (70), органические остатки (25), дерево (5)
1500	Дерево (70), остатки органики (20), сила мускул (10)
1910	Уголь (63), остатки органики (16), дерево (15), вода (3), нефть (3)
1935	Уголь (55), остатки органики (15), нефть (15), дерево (6), вода (6), газ (3)
1972	Нефть (34), уголь (32), газ (18), вода (8), ядерное горючее (6), остатки органики (2)
2000	Нефть (30), газ (22), ядерное горючее (21), уголь (21), вода (6)

Эти данные говорят о том, что и в обозримом будущем решающая роль будет принадлежать использованию природного топлива. Запасы энергии на планете распределены неравномерно как по количеству, так и по возможности их реализации. Энергоресурсы подразделяются на *возобновляемые* и *невозобновляемые*. К первым относятся энергоресурсы, непрерывно восстанавливаемые природой (вода рек, геотермальные подземные воды, энергия морских приливов и отливов, ветер, солнечная энергия, водород и т.д.), а ко вторым — энергоресурсы, ранее накопленные в природе. В новых геологических условиях они практически не образуются (каменный уголь, нефть, газ, торф, горючие сланцы) — органическое топливо.

## 1.2. Запасы энергии

Топливная промышленность включает в свой состав отрасли по добыче и переработке различных видов минерального сырья. Ведущая роль здесь принадлежит нефтяной, газовой и угольной отраслям. Размещение топливно-энергетических ресурсов России неблагоприятно — большая их часть располагается в восточных районах страны. Преимуществом является концентрация этих запасов в крупных месторождениях.

Наибольшая доля доступных невозобновляемых энергоресурсов приходится на уголь (75...85 %), нефть (10...15 %), газ (5...10 %), а на все остальные энергоресурсы менее 2 %.

Ограниченность энергоресурсов и удорожание энергии будут усиливать тенденцию к более резкому и экономичному их использованию.

Для сопоставления различных видов топлива и суммарного учета его запасов принята единица учета — *условное топливо*, что соответствует 29,3 мДж/кг, или 7000 ккал/кг энергии. Отметим, что при сгорании 1 кг древесины выделяется около 20 мДж, бурого угля — 13 мДж, антрацита — 25 мДж, нефти и нефтепродуктов — до 42 мДж, природного газа — 45 мДж, водорода — 120 мДж.

При умеренной стоимости только до 1/3 мировых запасов энергоресурсов могут быть извлечены с использованием современной техники. С другой стороны, современные потребности в энергоносителях составляют  $1,1 \cdot 10^{10}$  т у. т./год и растут со скоростью 3...4 % в год, т.е. удваиваются каждые 20 лет.

Легко оценить, что органические ископаемые ресурсы будут в значительной мере израсходованы в будущем веке. На рис. 1.1 по-

казаны фактические и прогнозируемые данные мирового потребления первичных энергоресурсов до 2075 г. при различных темпах среднегодового прироста потребления.

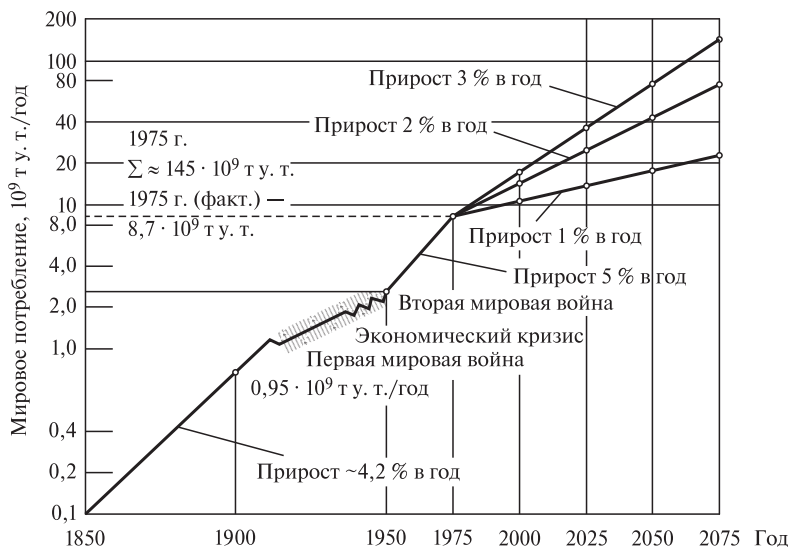


Рис. 1.1. Мировое потребление энергоресурсов

Все мировые ресурсы ископаемого органического топлива представлены на рис. 1.2 в виде куба с ребром 23,4 км, в котором 1 км<sup>3</sup> составляет 1 млрд т у. т. (1 м<sup>3</sup> эквивалентен 1 т у. т.). Расход топлива с 1900 по 1975 г. составил около 245 млрд т у. т. (вырезанный куб с ребром 6,3 км). На диаграмме представлен суммарный расход топлива за периоды 1900—2000, 1900—2025, 1900—2050 и 1900—2065 гг. при условии, что кроме органических другие виды энергоресурсов не используются.

Суммарная потребность в энергоресурсах до 2065 и 2100 гг. с учетом прогнозируемого темпа прироста энергопотребления в 2 и 3 % в год может составить около 6000 млрд т у.т.

Каменный уголь — наиболее распространенный вид топлива, обеспечивающий развитие энергетики долгое время. Мировые геологические запасы угля, выраженные в условном топливе, оцениваются в 12000 млрд т, из которых 6000 млрд т относятся к достоверным. Запасы каменного угля в 6...7 раз больше запасов нефти и газа. По добыче каменного угля Россия занимает 3-е место после

Китай и США, и для нужд потребления его достаточно примерно на 150 лет.

В каменном угле содержится примерно 84 % углерода, 8 % кислорода, 5 % водорода, 2 % серы и 1 % азота.

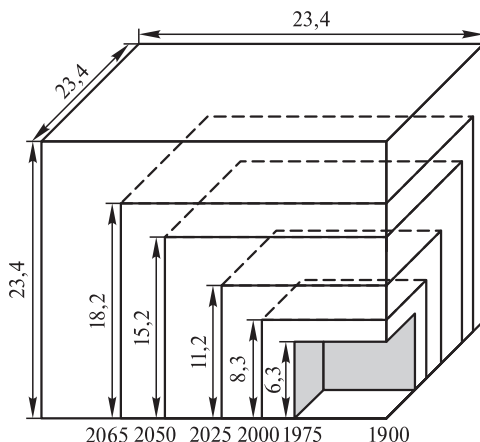


Рис. 1.2. Прогнозируемые запасы органического топлива и масштабы его расходования, т у. т.

Нефть при производстве электроэнергии во многих странах (Швеция, Япония и др.) вытеснила уголь. Мировые геологические запасы нефти оцениваются в 200 млрд т, из которых немногим более 50 млрд т составляют достоверные запасы. Более половины запасов нефти расположено в странах Среднего и Ближнего Востока. Для транспортировки нефти используют нефтепроводы и танкеры (морской путь). Нефть на 90 % удовлетворяет потребности транспорта.

При сжигании ископаемых углей и нефти, обладающих сернистостью около 2,5 %, ежегодно образуется до 400 млн т сернистого газа и окислов азота, или около 70 кг вредных веществ на каждого жителя земли в год.

Мировые запасы природного газа оцениваются в  $\sim 290 \cdot 10^{12} \text{ н} \cdot \text{м}^3$ , достоверные — в  $\sim 9 \cdot 10^{13} \text{ н} \cdot \text{м}^3$ . Из недр извлечено около 10 % запасов природного газа. Природный горючий газ представляет собой смесь углеводородов, главным образом метана.

Нефть и газ не только энергетическое сырье, но и сырье для химической промышленности. Известно более 5000 синтетических

полезных продуктов, получаемых из нефти и газа, однако только 3...5 % добытых запасов перерабатываются как химическое сырье.

После транспортировки газ хранится в газгольдерах в сжатом или сжиженном виде. Иногда в качестве газохранилищ используются пустоты в недрах земли. Такие подземные хранилища существуют в Москве и Санкт-Петербурге.

Электроэнергетика представляет собой электрические станции с большим комплексом зданий и сооружений, оборудования, систем передачи электроэнергии на расстояние и т.д. Электричеству немногим более 100 лет, но мы не можем представить себе жизнь без него. Концентрация потребления энергоресурсов в наиболее развитых странах привела к тому, что 30 % населения в мире потребляет 90 % вырабатываемой энергии, а 70 % — только 10 %. При этом 3/4 установленной мощности всех электростанций и мирового производства электроэнергии приходится на 10 наиболее развитых стран.

### 1.3. Гидроэнергетика

Для практических целей по техническим и экономическим соображениям можно использовать только около 25 % гидроэнергетических ресурсов. В большинстве развитых стран доля в выработке электроэнергии гидроэлектростанциями снижается. Это обусловлено освоением других, более экономичных, энергоресурсов и использованием гидроэлектростанций в пиковых режимах.

*Гидроэлектростанции (ГЭС) представляют собой комплекс сооружений, использующих энергию водяного потока для его преобразования в электрическую энергию. По схеме использования водных ресурсов и концентрации напоров ГЭС подразделяются на: русловые, приплотинные, деривационные с напорной и безнапорной деривацией, смешанные, гидроаккумулирующие и приливные электростанции.*

ГЭС производят наиболее дешевую электроэнергию, но имеют большую себестоимость постройки. Себестоимость производства электроэнергии на ГЭС ниже, чем на ТЭС, так как она определяется в основном затратами на амортизацию оборудования. Недостатком ГЭС является сезонность их работы.

Строительство ГЭС требует решения комплекса проблем — охрана окружающей среды, развитие водного транспорта и рыбного хозяйства и пр. Лучшим решением является каскадный принцип

строительства. ГЭС выгодно строить на горных реках с большим падением и расходом воды. Российские ГЭС в большинстве равнинные, поэтому они низконапорные и малоэффективные. Для строительства плотин ГЭС в России часто приходится осуществлять затопление больших территорий.

Выработка электроэнергии в разных странах различна и зависит от природных условий. Самая крупная ГЭС в мире Итайпу (Бразилия) имеет мощность 12600 МВт.

Важнейшая часть ГЭС — плотина. Она задерживает воду в водохранилище и создает необходимый ее напор. Вода под напором вращает турбину, которая приводит в движение ротор генератора. Напор воды создается или плотиной, или плотиной и деривацией<sup>1</sup>.

Мощность ГЭС зависит от напора воды — разности уровней верхнего и нижнего бьефа<sup>2</sup>, расхода воды и КПД гидроагрегата.

На крупных равнинных российских ГЭС основное русло рек перекрывается земляной плотиной, к которой примыкает бетонная водосливная плотина и сооружается здание ГЭС.

На рис. 1.3 показан разрез по плотине и зданию Братской ГЭС, построенной для снабжения электроэнергией газодиффузионного завода в г. Ангарске.

По напору воды ГЭС делятся на высоконапорные (более 60 м), средненапорные (от 25 до 60 м) и низконапорные (от 3 до 25 м). На равнинных реках напоры редко превышают 100 м, на горных реках можно создавать напоры до 300 и более метров, а с помощью деривации до 1500 м.

**Гидроаккумулирующие** электростанции требуют постройки не одного, а двух водохранилищ на разных уровнях. Их целесообразно строить вблизи крупных городов. Ночью, когда потребление электроэнергии падает, насос перекачивает воду из нижнего водохранилища в верхнее; при большом потреблении электроэнергии — в нижнее.

В России действуют Гидроаккумулирующий комплекс канала им. Москвы, Кубанская и Загорская ГАЭС. Строятся: Загорская ГАЭС-2, Зеленчукская ГЭС-ГАЭС и Ленинградская ГАЭС. Проектируются Владимирская, Волоколамская ГАЭС и др. Принципиальная схема ГАЭС представлена на рис. 1.4.

---

<sup>1</sup> Деривация — сооружения, осуществляющие подвод воды к стационарному узлу ГЭС, создавая основной деривационный напор.

<sup>2</sup> Бьеф — часть водоема, расположенная по течению выше водонапорного сооружения (верхний бьеф) или ниже него (нижний бьеф).

Энергия приливов и отливов связана главным образом с положением Луны на небосклоне. Солнце также влияет на приливы и отливы, но эффект его влияния примерно в 2,6 раза меньше. В течение лунных суток (24 ч 50 мин) дважды наблюдаются повышение и понижение уровня воды в морях и океанах. Максимального уровня приливная волна достигает в тех случаях, когда Земля, Луна и Солнце находятся на одной прямой. Амплитуда колебаний уровня воды зависит от широты и характера берега. Так, около Магелланова пролива зарегистрирована амплитуда колебаний уровня воды 18 м. В закрытых морях эффекты приливов и отливов практически незаметны. Самые высокие и сильные приливные волны возникают в узких и мелких заливах или устьях рек, впадающих в моря и океаны. Например, приливная волна Индийского океана катится против течения Ганга на расстояние 250 км от его устья. Приливная волна вверх по Амазонке распространяется на расстояние до 900 км.

*Приливные электростанции (ПЭС)* строятся на берегах морей и океанов. Залив моря перегораживается плотиной, и во время прилива в таком искусственном водохранилище «запирается» вода. Во время отлива в море создается перепад, достаточный для вращения турбин. Когда приливные волны отступают, из-за плотины вода выпускается в океан через турбины под плотиной и вырабатывается электроэнергия. Электроэнергию можно вырабатывать как при отливе, так и при приливе за счет специальных донных затворов. На рис. 1.5 показан общий вид французской приливной электростанции в Рансе.

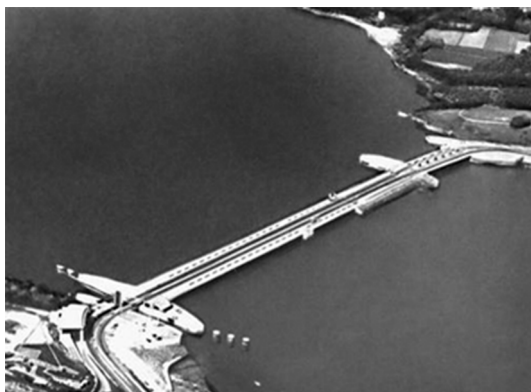


Рис. 1.5. Приливная электростанция в Рансе, Франция



В 1970 г. около г. Мурманска на побережье Баренцева моря по наплавному способу (без перемычек) построена Кислогубская ПЭС мощностью 400 кВт (рис. 1.6). Наплавное здание ПЭС было перенесено по морю из Мурманска в Кислую губу.



Рис. 1.6. Общий вид Кислогубской ПЭС

Схема электростанции на приливном течении показана на рис. 1.7.

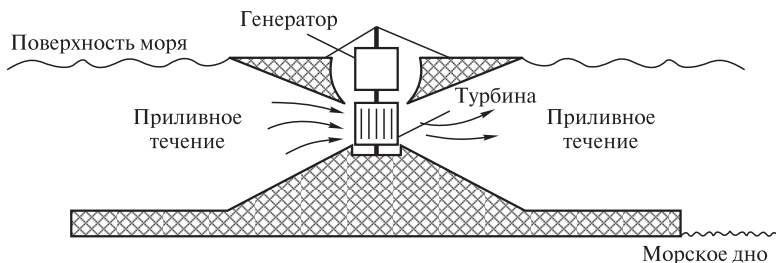


Рис. 1.7. Схема электростанции на приливном течении

Энергия волн относится к экологически чистой энергетике. Реальная мощность волн морей и океанов оценивается величиной до 50 млн МВт. Простейшими и наиболее распространенными являются поплавковые установки. Колебательные механические движения поплавков о волны преобразуются в электрическую энергию. Другой тип установки — колеблющийся водный столб — основан на принципе сжатия и расширения воздушного столба, расположенного над поверхностью воды и заключенного в камере. Нижняя

открытая часть камеры располагается ниже минимального уровня волн. Воздух приводит в движение турбину, связанную с генератором. В мире используется более 300 таких установок.

## 1.4. Теплоэнергетика

*Тепловые электрические станции (ТЭС)* вырабатывают электрическую энергию в результате сжигания органического топлива. Баланс топлива, используемого на тепловых электростанциях России, составляет: нефть и газ 73, уголь 27 %. В других странах мира эти показатели могут быть противоположны. Первые ТЭС появились в 80-х гг. XIX в.

Тепловые электростанции подразделяются на *конденсационные электростанции (КЭС)* и *теплоэлектроцентрали (ТЭЦ)*. КЭС часто называют ГРЭС (государственные районные электростанции). Принципиальная технологическая схема КЭС показана на рис. 1.8.

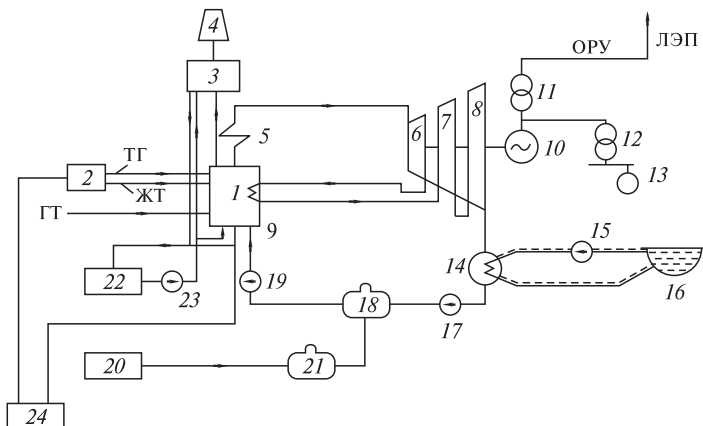


Рис. 1.8. Технологическая схема тепловой конденсационной электростанции: 1 — паровой котел; 2 — склад твердого топлива; 3 — золоуловитель; 4 — дымовая труба; 5 — пароперегреватель; 6 — цилиндр высокого давления; 7 — цилиндр среднего давления; 8 — цилиндр низкого давления; 9 — промежуточный пароперегреватель; 10 — электрогенератор; 11 — повышающий трансформатор; 12 — трансформатор для собственных нужд; 13 — потребители электроэнергии; 14 — конденсатор; 15 — циркуляционный насос; 16 — водоем; 17 — конденсатный насос; 18 — деаэратор; 19 — питательный насос; 20 — химводоочистка; 21 — деаэратор химводоочистки; 22 — золошлакоотвалы; 23 — насосы осветленной воды; 24 — устройство замачивания топлива; ТТ — твердое топливо; ЖТ — жидкое топливо; ГТ — газообразное топливо; ОРУ — открытое распределительное устройство; ЛЭП — линия электропередачи

# Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
ВВЕДЕНИЕ. ИСТОРИЯ МИСИ — МГСУ — ТЭС — СЯУ .....	5
<b>Глава 1. ВИДЫ ЭНЕРГИИ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ</b>	
<b>В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ .....</b>	<b>9</b>
1.1. Источники энергии .....	9
1.2. Запасы энергии .....	10
1.3. Гидроэнергетика .....	13
1.4. Теплоэнергетика .....	18
1.5. Гелиоэнергетика .....	20
1.6. Атомная энергетика .....	28
1.7. Термоядерная энергетика .....	31
1.8. Ветроэнергетика .....	36
1.9. Геотермальная энергетика .....	38
1.10. Водородная энергетика .....	41
1.11. Биоэнергетика и энергия отходов .....	41
<i>Контрольные вопросы</i> .....	43
<b>Глава 2. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ .....</b>	<b>44</b>
2.1. Предвоенный период .....	45
2.2. Военный период .....	51
2.3. Послевоенный период .....	54
<i>Контрольные вопросы</i> .....	61
<b>Глава 3. ОСНОВЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ .....</b>	<b>62</b>
3.1. Основные понятия .....	62
3.2. Взаимодействие заряженных частиц с веществом .....	69
3.3. Взаимодействие гамма-излучения с веществом .....	71
3.4. Взаимодействие нейтронов с веществом .....	76
3.5. Ядерный реактор как источник ядерных превращений .....	78
<i>Контрольные вопросы</i> .....	82
<b>Глава 4. ДОБЫЧА И ОБОГАЩЕНИЕ УРАНОВЫХ РУД .....</b>	<b>83</b>
4.1. Добыча урановых руд .....	83
4.2. Очистка урановых руд от примесей .....	95
4.2.1. Механическое обогащение .....	95
4.2.2. Выщелачивание .....	97
4.2.3. Сорбция и экстракция .....	98
4.2.4. Аффинаж .....	98
4.3. Извлечение урана из морской воды .....	99
4.4. Радиоизотопное обогащение урана .....	100
4.4.1. Газодиффузионный метод обогащения .....	102
4.4.2. Центробежный метод .....	104

4.4.3. Метод разделительного сопла .....	105
4.4.4. Электромагнитный метод.....	106
4.4.5. Лазерный метод.....	107
<i>Контрольные вопросы</i> .....	109
<b>Глава 5. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ И СБОРОК .....</b>	<b>111</b>
5.1. Двоуокись урана и плутония как основное ядерное горючее реакторов РФ.....	111
5.2. Конверсия UF <sub>6</sub> в UO <sub>2</sub> .....	111
5.3. Тепло выделяющие элементы .....	114
<i>Контрольные вопросы</i> .....	116
<b>Глава 6. АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ .....</b>	<b>117</b>
6.1. Характеристики АЭС.....	117
6.2. Технологические схемы атомных электростанций.....	118
6.2.1. Классификация ядерных реакторов.....	119
6.2.2. Управление ядерным реактором .....	121
6.2.3. Материалы для реакторов.....	124
6.3. Компоновка главных корпусов атомных электростанций .....	128
<i>Контрольные вопросы</i> .....	154
<b>Глава 7. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ АЭС .....</b>	<b>155</b>
7.1. АЭС с реакторами на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем .....	155
7.2. Атомные станции с реакторами малой и средней мощности .....	157
7.3. АЭС с тяжеловодными реакторами.....	160
<i>Контрольные вопросы</i> .....	161
<b>Глава 8. ОТРАБОТАВШЕЕ ЯДЕРНОЕ ГОРЮЧЕЕ.....</b>	<b>162</b>
8.1. Переработка ОЯТ при помощи пьюрекс-процесса.....	166
8.2. Газофторидный метод переработки ОЯТ .....	169
<i>Контрольные вопросы</i> .....	174
<b>Глава 9. ХРАНИЛИЩА РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ.....</b>	<b>175</b>
9.1. Радиоактивные отходы АЭС.....	175
9.2. Хранилища жидких отходов .....	178
9.3. Хранилища твердых радиоактивных отходов.....	187
9.4. Комплексы хранилищ радиоактивных отходов АЭС .....	188
<i>Контрольные вопросы</i> .....	192
<b>Глава 10. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЙ .....</b>	<b>193</b>
10.1. Возможные последствия облучения.....	193
10.2. Лучевая болезнь .....	198
10.3. Внутреннее облучение .....	200
10.4. Фоновое облучение .....	202
<i>Контрольные вопросы</i> .....	206

Глава 11. РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ.....	207
11.1. Строительные материалы .....	207
11.2. Строительные материалы, требующие радиационного контроля .....	207
11.3. Обеспечение радиационной безопасности строительной продукции .....	210
<i>Контрольные вопросы</i> .....	213
Глава 12. ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....	214
12.1. Общие вопросы охраны окружающей среды .....	214
12.2. Ограничение опасных воздействий АЭС на окружающую среду .....	216
<i>Контрольные вопросы</i> .....	220
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	221
Библиографический список .....	223
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	227

---

*Учебное издание*

**Бушуев Николай Иванович**

## **ИСТОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

Редактор *Т.Н. Донина*  
Корректор *В.К. Чупрова*  
Компьютерная правка *О.В. Суховой*  
Верстка макета *О.Г. Горюновой*  
Дизайн обложки *Д.Л. Разумного*

Подписано в печать 17.06.2015 г. И-106. Формат 60×84/16.  
Усл.-печ. л. 13,49. Уч.-изд. 12,18. Тираж 300 экз. Заказ 193

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

«Московский государственный строительный университет».

Издательство МИСИ – МГСУ.

129337, Москва, Ярославское ш., 26.

Тел. (495) 287-49-14, вн. 13-71, (499) 188-29-75, (499) 183-97-95.

E-mail: [ric@mgsu.ru](mailto:ric@mgsu.ru), [rio@mgsu.ru](mailto:rio@mgsu.ru).

Отпечатано в типографии Издательства МИСИ – МГСУ.

Тел. (499) 183-91-90, (499) 183-67-92, (499) 183-91-44