Библиотека СОК

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АГРОИНЖЕНЕРНАЯ
АКАДЕМИЯ"

Кафедра энергетики

С.М.ВОРОНИН

НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

(курс лекций)

Зерноград, 2008

УДК 631.371

Воронин С.М. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Курс лекций. – Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2008. - /$$$/ с.

Описаны проблемы традиционной энергетики, приведены сведения о нетрадиционных и возобновляемых источниках энергии (НВИЭ), методах и способах их использования. Особое внимание уделено применению НВИЭ в сельском хозяйстве. Приводятся сведения об устройствах преобразования НВИЭ в другие виды энергии, даны методы расчета параметров преобразователей, в том числе и работающих в автономных системах энергоснабжения.
Курс лекций предназначен для чтения дисциплины "Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии", изучаемой в рамках специальности 140106.65 – Энергообеспечение предприятий по направлению подготовки дипломированного специалиста 650800 – Теплоэнергетика.

Составитель: канд. техн. наук, профессор
С.М.Воронин

Рецензенты:

© С.М.Воронин
© ФГОУ ВПО АЧГАА

Содержание

Введение

Раздел 1. Общие сведения об источниках энергии

Лекция 1. Современное состояние энергетических ресурсов

1.1. Традиционные и нетрадиционные источники энергии

1.2. Запасы и ресурсы источников энергии. Динамика потребления и развитие энергетического хозяйства

Лекция 2. Проблемы использования энергетических ресурсов

2.1. Проблемы использования традиционных источников энергии

2.2. Проблемы использования нетрадиционных источников энергии

2.3. Место нетрадиционных источников энергии в удовлетворении энергетических потребностей человека

Раздел 2. Использование энергии солнечного излучения

Лекция 3. Преобразования солнечной энергии в тепло

3.1. Энергетические характеристики солнечного излучения

3.2. Физические основы процесса преобразования энергии солнечного излучения в тепло

3.3. Солнечные коллекторы. Типы, принципы действия и методы расчета

3.4. Оптимизация параметров ориентации
солнечных коллекторов
3.5. Аккумулирование тепла
Лекция 4. Солнечные электростанции
4.1. Тепловые солнечные электростанции
4.2. Фотоэлектрическое преобразование
энергии солнечного излучения
4.3. Концентраторы и системы
слежения
Лекция 5. Расчет параметров автономных
солнечных электростанций
5.1. Выбор концентраторов и систем
слежения
5.2. Расчет параметров автономной электростанции
на фотоэлектрических преобразователях
5.3. Методика массовых расчетов
автономных солнечных электростанций
5.4. Особенности расчета автономной солнечной
электростанции для передвижной пасеки
Раздел 3. Использование энергии ветра
Лекция 6. Теория использования
энергии ветра
6.1. Запасы энергии ветра и возможности
ее использования. Ветровой кадастр России.
6.2. Ветроэнергетические установки. Типы
и принципы работы
6.3. Теория идеального ветроколеса
6.4. Теория реального ветроколеса
Лекция 7. Ветроэлектростанции

7.1. Устройство электростанций
7.2. Расчет системных ветроэлектростанций
7.3. Расчет автономных ветроэлектростанций
7.4. Методы массовых расчетов
автономных ветроэлектростанций
Радел 4. Энергия геосферы и гидросферы Земли
Лекция 8. Использование геотермальной
энергии
8.1.Тепловой режим земной коры
8.2. Использования геотермального тепла
в системах теплоснабжения и производства электроэнергии
8.3. Экологические показатели
геотермальных ТЭС
Лекция 9. Использование энергии гидросферы
9.1. Энергетические ресурсы океана
9.2. Энергетические установки, преобразующие
энергию океана
Радел 5. Вторичные энергоресурсы
Лекция 10. Энергетический потенциал
вторичных энергоресурсов
10.1. Понятие и анализ вторичных энергоресурсов
10.2. Использование биомассы
для получения тепловой и электрической энергии
10.3. Получение газообразного и жидкого
биотоплива
10.4. Расчет параметров биогазовых установок
Заключение
Рекомендуемая литература
Приложения

Приложение 1

Интенсивность солнечного излучения, Вт/м^2

(Ростовская область)

Месяц	Площадка	Время*)				
		6-30	9-30	12-30	15-30	18-30
1	П	0	91	147	70	0
	Г	0	14	56	7	0
2	П	0	168	154	140	0
	Г	0	56	98	35	0
3	П	35	279	307	223	0
	Г	0	140	202	91	0
4	П	181	419	426	335	21
	Г	42	279	335	175	0
5	П	314	496	510	419	133
	Г	112	391	447	258	21
6	П	398	558	551	461	202
	Г	154	440	503	307	42
7	П	384	600	551	454	181
	Г	133	461	496	300	35
8	П	314	579	593	454	98
	Г	84	405	503	272	7
9	П	223	503	524	384	0
	Г	35	300	370	168	0
10	П	42	300	356	251	0
	Г	0	147	202	70	0
11	П	0	154	223	126	0
	Г	0	49	98	14	0
12	П	0	70	112	35	0
	Г	0	14	35	0	0

*) – приводится солнечное время

П – площадка перпендикулярна солнечным лучам

Г – горизонтальная площадка

Угол солнцестояния на 15 число на широте Ростовской области, град

Месяц	Время*)				
	6-30	9-30	12-30	15-30	18-30
1	0	14,2	21,9	7,4	0
2	0	21,4	30,0	14,0	0
3	3,7	31,1	40,8	23,0	0
4	12,1	41,3	52,6	32,4	2,3
5	18,6	48,6	61,5	39,0	8,5
6	21,6	52,8	64,3	41,1	10,6
7	20,5	50,8	64,3	41,1	10,6
8	15,4	45,0	57,0	35,7	5,2
9	7,4	35,7	46,0	27,2	0
10	0	25,6	34,6	18,0	0
11	0	16,8	24,7	9,8	0
12	0	12,4	19,8	5,6	0

*) – приводится солнечное время

Относительная продолжительность непрерывных периодов солнечного сияния

(Ростовская обл.)

Месяц	Длительность непрерывного периода, час.							
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16
1	0	0,3	0,34	0,35	0,01	0	0	0
2	0,01	0,35	0,18	0,3	0,16	0	0	0
3	0,01	0,2	0,24	0,18	0,25	0,12	0	0
4	0,01	0,2	0,21	0,14	0,15	0,22	0,07	0
5	0,01	0,22	0,16	0,12	0,12	0,17	0,19	0,01
6	0,01	0,22	0,19	0,12	0,11	0,1	0,19	0,06
7	0,01	0,17	0,14	0,13	0,1	0,13	0,3	0,02
8	0	0,16	0,14	0,12	0,1	0,29	0,19	0
9	0,01	0,17	0,13	0,14	0,25	0,28	0,02	0
10	0,01	0,22	0,21	0,19	0,32	0,05	0	0
11	0	0,27	0,25	0,34	0,14	0	0	0
12	0,06	0,39	0,29	0,26		0	0	0

(Темрюк)

Месяц	Длительность непрерывного периода, час.						
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14
1	0	0,39	0,27	0,33	0,01	0	0
2	0	0,34	0,24	0,29	0,13	0	0
3	0,01	0,25	0,22	0,18	0,32	0,02	0
4	0,01	0,25	0,18	0,16	0,19	0,2	0,01
5	0,01	0,23	0,17	0,13	0,11	0,15	0,2
6	0,01	0,23	0,15	0,11	0,1	0,13	0,27
7	0	0,19	0,15	0,09	0,09	0,15	0,33
8	0,01	0,18	0,14	0,1	0,12	0,33	0,12
9	0,03	0,14	0,16	0,1	0,37	0,2	0
10	0	0,21	0,19	0,24	0,36	0	0
11	0,01	0,3	0,28	0,34	0,07	0	0
12	0	0,35	0,35	0,3		0	0

(Краснодар)

Месяц	Длительность непрерывного периода, час.							
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16
1	0,02	0,36	0,26	0,34	0,02	0	0	0
2	0,01	0,31	0,29	0,23	0,16	0	0	0
3	0,01	0,26	0,2	0,15	0,23	0,15	0	0
4	0,01	0,24	0,18	0,17	0,13	0,2	0,07	0
5	0,006	0,25	0,17	0,13	0,11	0,13	0,2	0,004
6	0,01	0,22	0,15	0,12	0,1	0,1	0,27	0,03
7	0,01	0,19	0,19	0,12	0,1	0,08	0,31	0
8	0,01	0,18	0,16	0,13	0,09	0,26	0,17	0
9	0,006	0,16	0,17	0,11	0,23	0,32	0,004	0
10	0,01	0,2	0,15	0,21	0,38	0,05	0	0
11	0,01	0,2	0,23	0,38	0,18	0	0	0
12	0,01	0,3	0,29	0,4	0	0	0	0

(Сочи)

Месяц	Длительность непрерывного периода, час.						
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14
1	0,03	0,26	0,26	0,34	0,11	0	0
2	0,03	0,24	0,21	0,22	0,3	0	0
3	0	0,25	0,18	0,17	0,18	0,22	
4	0,006	0,28	0,17	0,17	0,11	0,26	0,004
5	0,01	0,26	0,14	0,13	0,15	0,15	0,16
6	0,01	0,18	0,17	0,12	0,09	0,15	0,28
7	0	0,16	0,12	0,1	0,11	0,2	0,31
8	0	0,11	0,1	0,09	0,13	0,54	0,03
9	0,01	0,14	0,08	0,09	0,19	0,49	0
10	0,01	0,18	0,14	0,14	0,43	0,1	0
11	0,01	0,21	0,23	0,3	0,25	0	0
12	0,01	0,22	0,3	0,44	0,03	0	0

Приложение 2

Вероятность скорости ветра

(Миллерово)

Месяц	Скорость ветра, м/с									
	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-20
1	0,166	0,183	0,206	0,159	0,102	0,075	0,056	0,019	0,023	0,005
2	0,137	0,179	0,192	0,150	0,107	0,087	0,063	0,025	0,040	0,017
3	0,119	0,191	0,203	0,151	0,109	0,061	0,055	0,029	0,040	0,011
4	0,164	0,191	0,213	0,159	0,106	0,067	0,043	0,024	0,023	0,010
5	0,199	0,214	0,223	0,154	0,089	0,054	0,035	0,011	0,016	0,005
6	0,270	0,224	0,219	0,147	0,068	0,036	0,017	0,008	0,010	0,011
7	0,275	0,243	0,209	0,136	0,067	0,041	0,018	0,005	0,005	0,014
8	0,288	0,235	0,228	0,136	0,055	0,034	0,013	0,006	0,004	0,004
9	0,318	0,213	0,186	0,128	0,063	0,036	0,015	0,004	0,005	0,002
10	0,219	0,211	0,220	0,146	0,081	0,043	0,025	0,009	0,011	0,004
11	0,139	0,204	0,202	0,171	0,099	0,070	0,070	0,026	0,026	0,010
12	0,151	0,195	0,200	0,162	0,104	0,060	0,060	0,026	0,037	0,016

Вероятность скорости ветра

(Морозовск)

Месяц	Скорость ветра, м/с									
	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-20
1	0,125	0,132	0,193	0,193	0,134	0,093	0,061	0,034	0,023	0,011
2	0.123	0,137	0,172	0,164	0,138	0,100	0,059	0,049	0,034	0,021
3	0,138	0,116	0,196	0,170	0,133	0,082	0,050	0,036	0,037	0,011
4	0,132	0,159	0,233	0,189	0,119	0,069	0,040	0,929	0,020	0,010
5	0,162	0,181	0,243	0,185	0,106	0,056	0,034	0,018	0,012	0,003
6	0,201	0,206	0,262	0,167	0,090	0,038	0,020	0,005	0,008	0,000
7	0,224	0,208	0,257	0,145	0,089	0,039	0,018	0,014	0,005	0,001
8	0,240	0,237	0,245	0,142	0,072	0,032	0,015	0,007	0,007	0,003
9	0,274	0,226	0,200	0,137	0,086	0,043	0,018	0,006	0,009	0,002
10	0,225	0,168	0,217	0,180	0,097	0,058	0,027	0,013	0,012	0,003
11	0,133	0,146	0,188	0,199	0,137	0,087	0,045	0,031	0,027	0,007
12	0,128	0,140	0,181	0,185	0,135	0,091	0,060	0,042	0,030	0,007

Вероятность скорости ветра

(Константиновск)

Месяц	Скорость ветра, м/с									
	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-20
1	0,086	0,243	0,224	0,174	0,132	0,058	0,046	0,030	0,005	0,003
2	0,086	0,221	0,214	0,152	0,126	0,074	0,052	0,041	0,033	0,001
3	0,078	0,237	0,233	0,168	0,122	0,055	0,044	0,041	0,019	0,003
4	0,077	0,250	0,253	0,165	0,122	0,052	0,038	0,028	0,013	0,002
5	0,102	0,296	0,270	0,158	0,094	0,038	0,021	0,017	0,003	0,000
6	0,135	0,353	0,283	0,126	0,067	0,018	0,011	0,004	0,003	0,000
7	0,133	0,375	0,273	0,126	0,063	0,018	0,007	0,004	0,001	0,000
8	0,151	0,343	0,268	0,133	0,070	0,018	0,010	0,004	0,003	0,000
9	0,149	0,348	0,248	0,131	0,076	0,027	0,011	0,007	0,003	0,000
10	0,132	0,281	0,252	0,151	0,109	0,035	0,017	0,014	0,007	0,002
11	0,092	0,236	0,215	0,161	0,137	0,071	0,044	0,023	0,017	0,004
12	0,086	0,243	0,221	0,162	0,130	0,051	0,050	0,041	0,012	0,004

Вероятность скорости ветра

(Ростов на Дону)

Месяц	Скорость ветра, м/с									
	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-20
1	0,165	0,184	0,230	0,168	0,107	0,046	0,045	0,018	0,031	0,006
2	0,146	0,193	0,211	0,163	0,110	0,054	0,053	0,020	0,037	0,013
3	0,156	0,180	0,226	0,174	0,117	0,042	0,046	0,023	0,032	0,004
4	0,158	0,204	0,224	0,185	0,111	0,037	0,046	0,010	0,020	0,004
5	0,173	0,222	0,256	0,176	0,095	0,038	0,025	0,007	0,007	0,001
6	0,231	0,267	0,273	0,131	0,059	0,020	0,012	0,002	0,006	0,000
7	0,233	0,278	0,278	0,123	0,057	0,015	0,013	0,002	0,002	0,000
8	0,271	0,263	0,254	0,122	0,051	0,016	0,018	0,003	0,002	0,000
9	0,297	0,241	0,226	0,120	0,063	0,028	0,017	0,004	0,004	0,000
10	0,235	0,231	0,222	0,138	0,078	0,031	0,034	0,011	0,014	0,006
11	0,157	0,193	0,218	0,172	0,116	0,051	0,049	0,018	0,022	0,004
12	0,162	0,191	0,207	0,166	0,109	0,045	0,054	0,015	0,031	0,020

Вероятность скорости ветра

(Заветное)

Месяц	Скорость ветра, м/с									
	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-20
1	0,134	0,246	0,280	0,185	0,085	0,028	0,026	0,014	0,002	0,001
2	0,143	0,212	0,282	0,163	0,090	0,040	0,029	0,024	0,016	0,001
3	0,157	0,231	0,259	0,146	0,094	0,040	0,032	0,021	0,020	0,000
4	0,162	0,268	0,259	0,138	0,078	0,034	0,027	0,018	0,014	0,000
5	0,215	0,280	0,263	0,130	0,060	0,022	0,015	0,009	0,006	0,000
6	0,248	0,300	0,252	0,113	0,046	0,015	0,013	0,006	0,006	0,000
7	0,277	0,303	0,233	0,112	0,040	0,022	0,008	0,002	0,003	0,000
8	0,276	0,295	0,210	0,111	0,040	0,017	0,013	0,003	0,005	0,000
9	0,290	0,300	0,218	0,117	0,043	0,014	0,008	0,006	0,004	0,000
10	0,240	0,280	0,256	0,130	0,053	0,020	0,013	0,002	0,006	0,000
11	0,150	0,246	0,286	0,157	0,072	0,027	0,029	0,013	0,019	0,001
12	0,140	0,258	0,270	0,162	0,082	0,030	0,025	0,022	0,010	0,001

Вероятность скорости ветра

(Гигант)

Месяц	Скорость ветра, м/с									
	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-20
1	0,171	0,241	0,231	0,184	0,102	0,039	0,021	0,008	0,003	0,001
2	0,175	0,207	0,225	0,178	0,087	0,063	0,034	0,019	0,012	0,000
3	0,173	0,223	0,233	0,143	0,087	0,063	0,039	0,013	0,020	0,006
4	0,154	0,235	0,260	0,160	0,076	0,040	0,034	0,019	0,009	0,004
5	0,204	0,270	0,280	0,144	0,052	0,028	0,014	0,004	0,002	0,001
6	0,248	0,308	0,247	0,120	0,045	0,017	0,009	0,005	0,001	0,001
7	0,270	0,303	0,264	0,096	0,044	0,010	0,008	0,002	0,002	0,000
8	0,274	0,333	0,219	0,091	0,034	0,013	0,003	0,002	0,001	0,000
9	0,290	0,321	0,223	0,104	0,040	0,015	0,003	0,003	0,001	0,000
10	0,263	0,260	0,245	0,115	0,061	0,028	0,016	0,007	0,003	0,002
11	0,152	0,202	0,244	0,191	0,083	0,063	0,025	0,016	0,009	0,009
12	0,185	0,215	0,218	0,167	0,094	0,052	0,040	0,014	0,013	0,002

Вероятность скорости ветра

(Должанка)

Месяц	Скорость ветра, м/с									
	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-20
1	0,07	0,15	0,19	0,18	0,13	0,10	0,09	0,04	0,03	0
2	0,08	0,14	0,18	0,18	0,15	0,09	0,09	0,04	0,03	0,02
3	0,06	0,16	0,22	0,17	0,12	0,08	0,08	0,04	0,04	0,02
4	0,06	0,19	0,21	0,18	0,12	0,10	0,08	0,03	0,02	0,02
5	0,07	0,18	0,23	0,19	0,12	0,09	0,08	0,03	0,02	0,01
6	0,06	0,20	0,26	0,19	0,11	0,08	0,05	0,02	0,01	0
7	0,07	0,21	0,26	0,20	0,12	0,06	0,05	0,02	0,01	0
8	0,08	0,21	0,25	0,19	0,12	0,07	0,05	0,02	0,01	0
9	0,09	0,22	0,24	0,20	0,10	0,06	0,06	0,02	0,01	0
10	0,08	0,18	0,22	0,17	0,11	0,09	0,07	0,04	0,03	0
11	0,07	0,15	0,21	0,17	0,13	0,10	0,10	0,03	0,03	0,02
12	0,05	0,15	0,21	0,17	0,14	0,09	0,09	0,05	0,03	0,01

Вероятность скорости ветра

(Кущевская)

Месяц	Скорость ветра, м/с									
	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-20
1	0,33	0,23	0,18	0,12	0,07	0,03	0,02	0,01	0,01	0
2	0,28	0,23	0,18	0,13	0,07	0,04	0,03	0,01	0,02	0,01
3	0,30	0,23	0,19	0,10	0,06	0,03	0,03	0,01	0,03	0,01
4	0,29	0,25	0,20	0,13	0,06	0,03	0,03	0,01	0,02	0
5	0,32	0,28	0,18	0,09	0,03	0,01	0,01	0	0,01	0
6	0,42	0,27	0,18	0,08	0,03	0	0	0	0	0
7	0,44	0,25	0,16	0,07	0,03	0,01	0,01	0	0	0
8	0,48	0,23	0,14	0,09	0,02	0,01	0,01	0	0	0
9	0,50	0,22	0,16	0,09	0,05	0,01	0,02	0	0	0
10	0,43	0,23	0,18	0,13	0,07	0,02	0,02	0,01	0,01	0
11	0,32	0,21	0,17	0,12	0,06	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01
12	0,32	0,21	0,17	0,12	0,06	0,03	0,02	0,01	0,03	0

Вероятность скорости ветра

(Тихорецк)

Месяц	Скорость ветра, м/с									
	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-20
1	0,12	0,20	0,22	0,19	0,11	0,06	0,03	0,03	0,03	0,01
2	0,09	0,19	0,22	0,18	0,11	0,06	0,04	0,03	0,06	0,02
3	0,11	0,19	0,21	0,16	0,10	0,06	0,04	0,04	0,07	0,03
4	0,11	0,18	0,22	0,19	0,10	0,06	0,04	0,03	0,04	0,03
5	0,15	0,24	0,22	0,19	0,09	0,04	0,03	0,02	0,03	0
6	0,19	0,25	0,25	0,17	0,07	0,04	0,02	0,01	0,01	0
7	0,22	0,31	0,23	0,14	0,06	0,03	0,01	0,01	0	0
8	0,24	0,30	0,22	0,15	0,04	0,03	0,01	0,01	0	0
9	0,23	0,25	0,23	0,16	0,05	0,04	0,02	0,01	0,01	0
10	0,18	0,21	0,24	0,17	0,09	0,04	0,02	0,02	0,03	0
11	0,13	0,19	0,19	0,18	0,11	0,06	0,03	0,04	0,06	0,02
12	0,12	0,19	0,21	0,18	0,09	0,06	0,05	0,04	0,05	0,02

Вероятность скорости ветра

(Темрюк)

Месяц	Скорость ветра, м/с									
	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-20
1	0,09	0,21	0,23	0,16	0,12	0,11	0,05	0,02	0,01	0
2	0,08	0,16	0,22	0,17	0,15	0,12	0,07	0,02	0,01	0,01
3	0,10	0,18	0,22	0,16	0,11	0,11	0,06	0,04	0,02	0,01
4	0,09	0,19	0,24	0,19	0,12	0,10	0,04	0,02	0,02	0
5	0,10	0,22	0,27	0,19	0,10	0,07	0,02	0,02	0	0
6	0,11	0,24	0,29	0,19	0,09	0,06	0,01	0,01	0	0
7	0,12	0,26	0,27	0,17	0,10	0,06	0,01	0	0	0
8	0,12	0,25	0,27	0,17	0,10	0,07	0,01	0	0	0
9	0,14	0,25	0,22	0,17	0,11	0,07	0,02	0	0	0
10	0,13	0,23	0,22	0,17	0,10	0,09	0,03	0,02	0,01	0
11	0,12	0,23	0,23	0,16	0,11	0,08	0,05	0,02	0,01	0
12	0,09	0,20	0,25	0,17	0,12	0,10	0,05	0,02	0	0

Вероятность скорости ветра

(Краснодар)

Месяц	Скорость ветра, м/с									
	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-20
1	0,34	0,32	0,20	0,08	0,03	0,01	0,01	0	0	0
2	0,32	0,31	0,19	0,08	0,05	0,01	0,02	0,01	0,01	0
3	0,29	0,30	0,18	0,10	0,06	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01
4	0,29	0,32	0,22	0,07	0,04	0,01	0,02	0	0,01	0
5	0,32	0,33	0,21	0,07	0,04	0,01	0,01	0,01	0	0
6	0,37	0,32	0,19	0,07	0,03	0	0,01	0	0	0
7	0,37	0,35	0,18	0,07	0,02	0	0	0	0	0
8	0,39	0,32	0,18	0,07	0,03	0	0,01	0	0	0
9	0,45	0,28	0,14	0,08	0,03	0,01	0,01	0	0	0
10	0,46	0,28	0,14	0,07	0,03	0,01	0,01	0,01	0	0
11	0,43	0,29	0,15	0,07	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0
12	0,38	0,29	0,19	0,08	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Вероятность скорости ветра

(Майкоп)

Месяц	Скорость ветра, м/с									
	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-20
1	0,42	0,36	0,11	0,05	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0
2	0,38	0,35	0,13	0,06	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01	0
3	0,30	0,33	0,17	0,08	0,04	0,02	0,03	0,01	0,02	0,01
4	0,29	0,36	0,19	0,08	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01	0
5	0,30	0,39	0,18	0,07	0,03	0,01	0,01	0	0	0
6	0,32	0,42	0,15	0,06	0,02	0,01	0,01	0	0	0
7	0,35	0,42	0,15	0,05	0,02	0	0	0	0	0
8	0,37	0,40	0,15	0,05	0,02	0	0	0	0	0
9	0,41	0,38	0,14	0,05	0,02	0,01	0	0	0	0
10	0,39	0,38	0,14	0,05	0,02	0,01	0,01	0	0	0
11	0,42	0,36	0,13	0,04	0,02	0,01	0,01	0	0	0
12	0,44	0,35	0,11	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0

Вероятность скорости ветра

(Армавир)

Месяц	Скорость ветра, м/с									
	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-20
1	0,24	0,19	0,16	0,13	0,05	0,06	0,05	0,03	0,05	0,04
2	0,23	0,17	0,17	0,1	0,06	0,07	0,05	0,03	0,06	0,06
3	0,25	0,19	0,17	0,14	0,05	0,06	0,04	0,02	0,04	0,04
4	0,28	0,2	0,16	0,12	0,04	0,06	0,04	0,02	0,05	0,03
5	0,31	0,23	0,19	0,11	0,04	0,05	0,03	0,01	0,02	0,01
6	0,38	0,24	0,18	0,11	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0
7	0,43	0,26	0,15	0,08	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0
8	0,43	0,24	0,16	0,09	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0
9	0,4	0,23	0,15	0,09	0,03	0,04	0,02	0,01	0,02	0,01
10	0,33	0,2	0,16	0,12	0,05	0,05	0,03	0,01	0,03	0,02
11	0,25	0,17	0,14	0,13	0,04	0,07	0,05	0,03	0,07	0,05
12	0,25	0,2	0,16	0,13	0,05	0,06	0,04	0,03	0,05	0,03

Вероятность скорости ветра

(Новороссийск)

Месяц	Скорость ветра, м/с									
	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-20
1	0,16	0,18	0,18	0,15	0,12	0,08	0,05	0,04	0,02	0,02
2	0,18	0,18	0,19	0,15	0,11	0,08	0,05	0,03	0,02	0,01
3	0,19	0,19	0,16	0,16	0,09	0,07	0,05	0,03	0,03	0,03
4	0,29	0,24	0,19	0,10	0,07	0,05	0,02	0,02	0,01	0,01
5	0,31	0,27	0,19	0,10	0,05	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01
6	0,31	0,28	0,20	0,10	0,05	0,03	0,01	0,01	0,01	0
7	0,31	0,25	0,22	0,12	0,04	0,03	0,02	0,01	0	0
8	0,27	0,25	0,2	0,10	0,07	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01
9	0,26	0,26	0,17	0,10	0,07	0,05	0,03	0,03	0,02	0,01
10	0,26	0,22	0,17	0,13	0,08	0,05	0,03	0,02	0,02	0,02
11	0,22	0,23	0,19	0,11	0,09	0,06	0,04	0,02	0,02	0,02
12	0,18	0,19	0,18	0,16	0,10	0,07	0,05	0,03	0,02	0,02

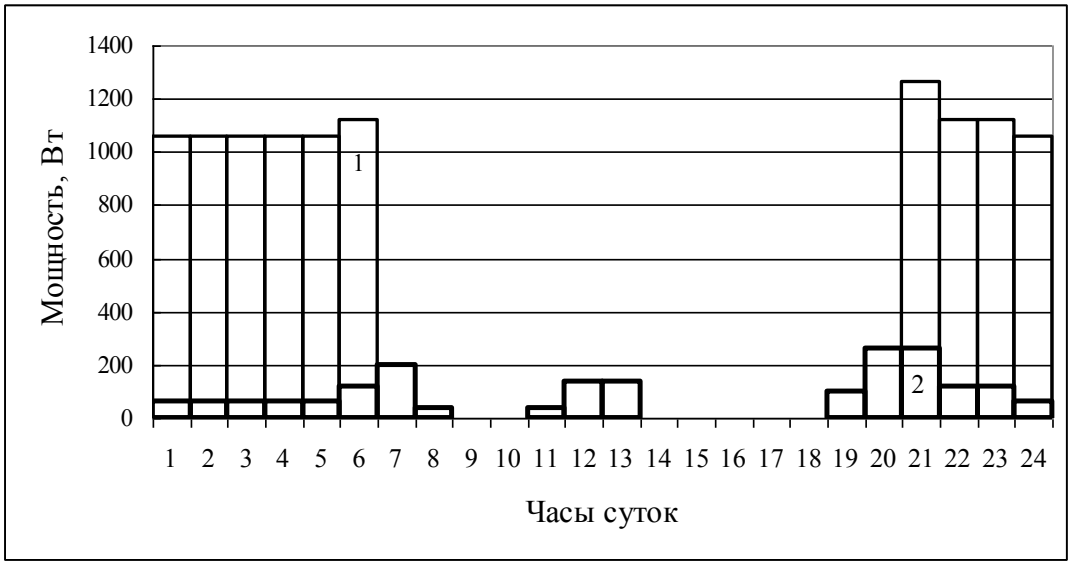
Вероятность скорости ветра

(Сочи)

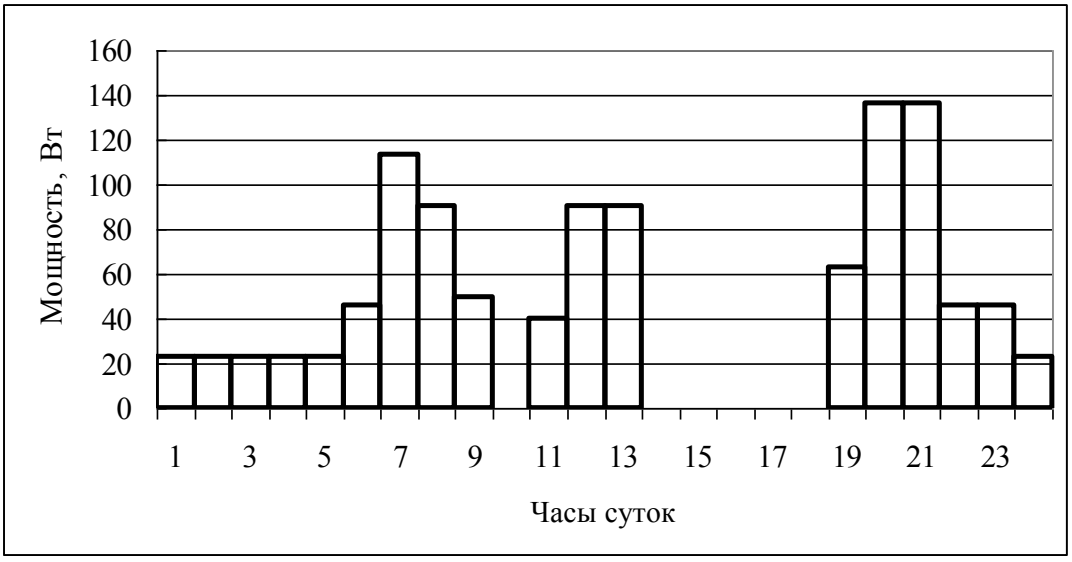
Месяц	Скорость ветра, м/с									
	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-20
1	0,35	0,33	0,14	0,08	0,04	0,01	0,02	0,01	0,02	0
2	0,34	0,35	0,14	0,08	0,05	0,01	0,02	0	0,01	0
3	0,34	0,3	0,13	0,16	0,04	0	0,01	0,01	0,01	0
4	0,48	0,29	0,12	0,06	0,03	0	0,01	0	0,01	0
5	0,47	0,33	0,14	0,05	0,01	0	0	0	0	0
6	0,48	0,33	0,14	0,04	0,01	0	0	0	0	0
7	0,4	0,34	0,13	0,12	0,01	0	0	0	0	0
8	0,49	0,29	0,15	0,06	0,01	0	0	0	0	0
9	0,39	0,38	0,12	0,1	0,01	0	0	0	0	0
10	0,31	0,4	0,13	0,14	0,02	0	0	0	0	0
11	0,37	0,42	0,12	0,04	0,02	0,01	0,01	0	0,01	0
12	0,3	0,35	0,13	0,16	0,04	0	0,01	0,01	0	0

Приложение 3

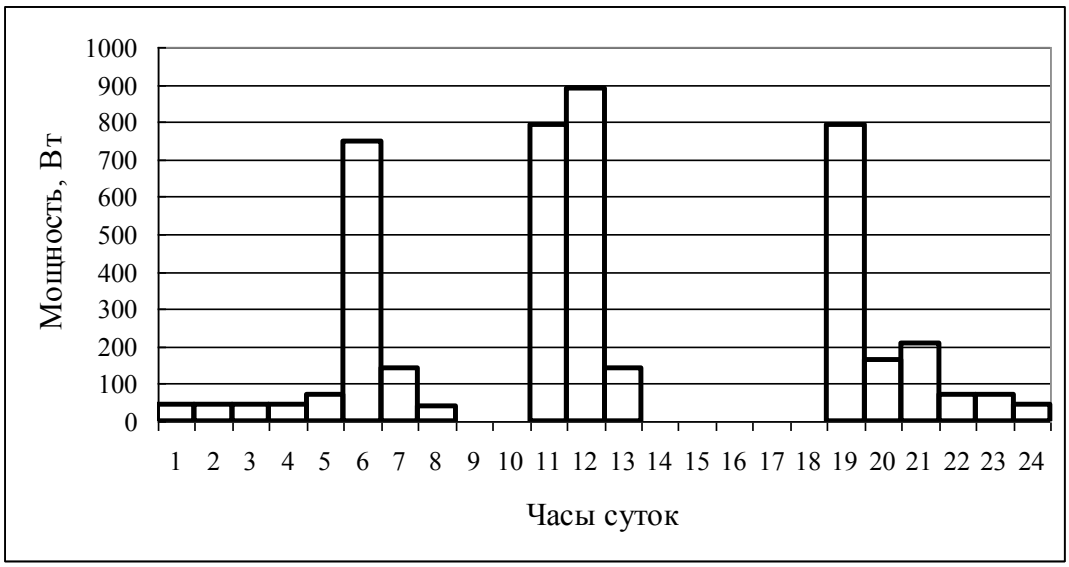
Типичные графики нагрузки автономных
электрифицированных объектов



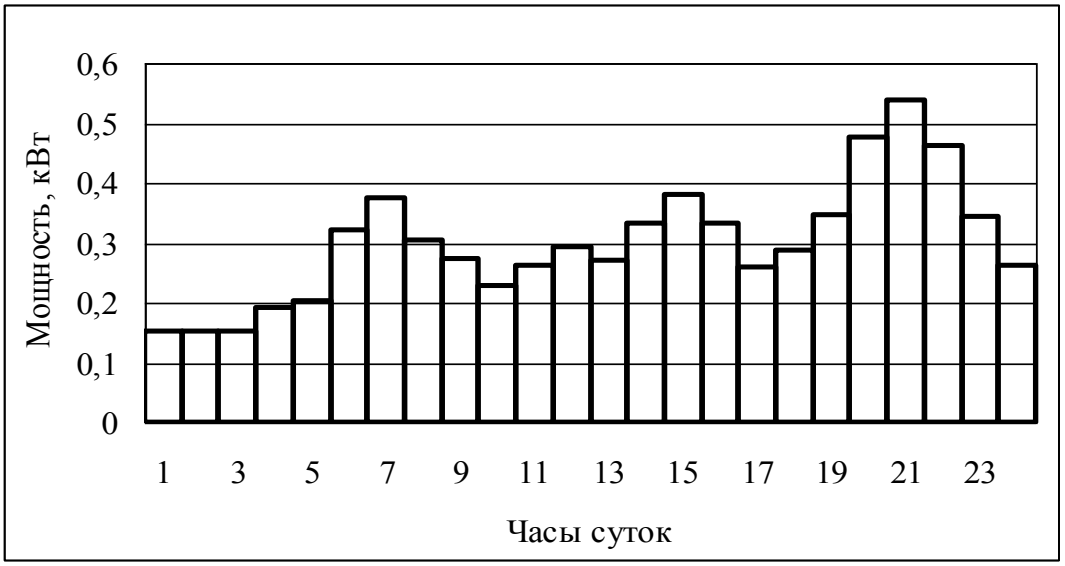
Примерный график нагрузки домика рыбака (октябрь)
1 – с электрокамином, 2 – без электрокамина.



Примерный график нагрузки домика рыбака
с энергосберегающими электроприемниками и гелиообогревом
(октябрь)



Примерный график нагрузки пасеки на 100 ульев (июль)



Примерный график фермерской усадьбы
(весна – осень)

С.М.ВОРОНИН

НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

(Курс лекций)

Зерноград

2008

ВВЕДЕНИЕ

В начале этого века проблемы истощения ископаемого топлива и его негативного влияние на экологию приобрели особую актуальность. И хотя глобального потепления пока не ощущается, локальное увеличение тепла сказывается на силе и частоте появления ураганов, несущих разрушения, ливни и наводнения. Нефть и нефтепродукты все заметнее дорожают, превышая немыслимые еще два-три года назад уровни цен. Все это заставило по иному оценить современную ситуацию в энергетике и выдвинуло в разряд важнейших задач освоение новых видов энергии.

Ежегодно на разных уровнях проводятся семинары, саммиты, конференции по изысканию путей предотвращения кризиса в энергетике, рядом стран принимаются национальные и международные программы освоения энергосберегающих, чистых технологий и получения новых видов энергии. Человечество реально осознало угрозу потери традиционных энергоресурсов, прежде всего нефти, газа и качественного угля, и занялось поисками альтернативных источников энергии. Без преувеличения можно утверждать, что 21 век станет веком интенсивных поисков заменителей углеводородного ископаемого топлива.

В свете изложенного, значительно возрос мировой интерес к освоению нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (НВИЭ), прежде всего Солнца, ветра и биотоплива. Эти виды энергии доступны и имеют значительный потенциал на большей территории Земли, по крайней мере, в заселенных районах.

Возобновляемые источники энергии по определению не подвержены истощению, следовательно, способны полностью решить проблему истощения энергетических ресурсов. Возобновляемые источники энергии находятся в среде обитания человека в естественном состоянии, следовательно, их можно использовать, не нанося экологического урона.

Однако практическое использование таких привлекательных источников энергии имеет свои, причем весьма значительные, трудности, связанные с неуправляемостью и низкой плотностью энергетических потоков. Это в свою очередь порождает высокую стоимость используемой энергии. В этой связи, в настоящее время возобновляемые источники энергии наиболее перспективно применять в автономных системах энергоснабжения небольшой мощности. В связи с многоукладностью экономики России, в частности, сельского хозяйства, число объектов, требующих автономного электроснабжения, заметно растет. Это связано в первую очередь с появлением и развитием фермерских хозяйств.

С учетом особенностей использования возобновляемых и нетрадиционных источников энергии, в будущем, видимо, претерпит некоторое изменение и система электроснабжения, в которой электростанции на возобновляемых источниках будут не разгрузочными, а основными.

Растущая потребность применения возобновляемых источников энергии диктует необходимость интенсивного повышения конкурентоспособности энергетических комплексов на их основе, что может быть основано на глубоком знании характеристик возобновляемых источников энергии и принципов их эффективного использования.

Анализ учебно-методических и научных материалов показал, что исследованиям и изучению нетрадиционных и возобновляемых источников энергии придается большое значение. Так изданы монографии и учебные пособия, посвященные наиболее популярным НВИЭ. Однако их автономному использованию, особенно в области получения электроэнергии, внимания уделено гораздо меньше. Это обстоятельство создает значительные трудности при обучении сельских специалистов, в частности, обучающихся в аграрных вузах по специальности 140106.65 - Энергообеспечение предприятий по направлению "Теплоэнергетика". В этой связи было принято решение систематизировать имеющийся в стране и за рубежом научный и учебно-

методический материал, и обобщить его в приложении к потребностям сельских специалистов.

Настоящий курс лекций написан с использованием опыта преподавания дисциплины "Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии" в ФГОУ ВПО АЧГАА в соответствии с Государственным образовательным стандартом на эту дисциплину, изучаемую в рамках специальности "Энергообеспечение предприятий". В данном учебнике использованы также научные результаты НИР и ОКР, проводимые в ФГОУ ВПО АЧГАА.

Раздел 1. Общие сведения об источниках энергии

Лекция 1. **Современное состояние энергетических ресурсов**

1.1. Традиционные и нетрадиционные источники энергии

Из курса физики мы знаем, что энергией называется способность материальных объектов (вещества или поля) производить работу. Человек в своей жизнедеятельности непрерывно производил и производит работу. В начале для этого он использовал энергию собственных мускул, затем мускул животных. Для получения тепла он использовал энергию, выделяемую при сгорании биомассы (вначале растительного, затем животного происхождения).

С развитием человечества энергия стала использоваться для производства работы по перемещению (транспортирования). Вначале это была мускульная сила, затем энергия перемещаемой воздушной массы (в современной терминологии называемая энергией ветра).

По мере технического совершенствования среды обитания человека были созданы паровые машины, а затем тепловые двигатели. Эти машины оказались не только эффективнее прежних движителей (животных и паруса), но и позволили превращать тепловую энергию в механическую, тем самым революционно увеличив энергетические возможности человека.

По принципам диалектики, увеличение перспектив применения энергии потребовало изыскания эффективных источников энергии, способных, после преобразования первичной энергии, производить механическую работу, то есть, изыскания эффективных источников тепловой энергии.

Таким источником энергии оказалось ископаемое углеводородное топливо (уголь, нефть, природный газ). Это топливо при сгорании выделяло достаточно большое количество энергии в виде тепла, которое могло преобра-

зовываться в паровых и тепловых машинах достаточно большой (не ограниченной в разумных пределах) мощности.

Таким образом, появление тепловых машин дало толчок к использованию ископаемого топлива. А так как большая часть работ, необходимых человеку, является механической работой, то тепловые машины были обречены на широкое внедрение. Кроме того, тепловые машины, кроме выполнения непосредственно полезной работы, могли вращать генераторы электроэнергии, что расширяло область их применения. А ископаемое топливо кроме преобразования в механическую энергию, могло использоваться и по прямому назначению, получению тепла. В среде широкого использования машин, область применения тепла также расширилась, тепло стало применяться не только для обогрева жилища и приготовления пищи, но и для плавки металла, термической обработки и т.п.

Таким образом, в индустриальном обществе ископаемое углеводородное топливо стало преобладающим источником энергии. Все без исключения страны в стадии индустриализации **традиционно** используют ископаемое углеводородное топливо для привода тепловых машин и получения тепла в широком диапазоне температур.

Другие источники энергии, солнечное излучение, ветер (кинетическая энергия движущихся воздушных масс), биотопливо (поглощенная в процессе фотосинтеза солнечная энергия) в процессе индустриализации постепенно вытеснялись **традиционными источниками энергии**, и в этой связи получили название **нетрадиционных источников энергии**. Исключение составляет гидроэнергия, то есть, энергия рек. Гидроэнергия, вначале используемая для привода водяных мельниц, в индустриальную эпоху стала использоваться в гидроэлектростанциях для привода генераторов электроэнергии. Во многих странах (включая и Россию) гидроэлектростанции составляют достаточно большую часть электростанций, а гидроэнергия (возобновляемый формально нетрадиционный источник энергии) используется почти так же ин-

тенсивно, как и традиционные источники энергии. Этому факту есть свои причины, которые будут рассмотрены в соответствующем разделе.

Как вы уже заметили, нетрадиционные виды энергии присущи возобновляемым источникам энергии, а традиционные – не возобновляемым источникам энергии. По этому признаку **традиционными источниками энергии** можно считать не возобновляемые ресурсы ископаемого углеводородного топлива, а **нетрадиционными источниками энергии** – возобновляемые, или восполняемые, источники энергии (ВИЭ).

В последнее время исследуются и частично применяются и неизвестные ранее такие ВИЭ, как приливы, океанические градиенты температур и океанические волны, геотермальные источники.

1.2. Запасы и ресурсы источников энергии. Динамика потребления и развитие энергетического хозяйства

Для количественной оценки потенциала источника энергии пользуются понятиями ресурса и запаса.

Ресурсом источника энергии принято называть весь его объем, который **принципиально возможно** выделить и преобразовать в нужный вид энергии. **Запас** источника энергии – это тот его объем, который можно выделить и преобразовать в нужный вид энергии **практически**. Практическое выделение и преобразование определяется экономической целесообразностью, то есть этот процесс может быть прекращен, если он станет экономически не выгодным.

Например, вся нефть, находящаяся в недрах Земли обладает свойствами горения и переработки в нефтепродукты (дизельное топливо и бензин). Поэтому все месторождения ископаемой нефти (разведанные и прогнозируемые) составляют ресурс земных источников этого вида энергии. Практически же любое месторождение нефти не может быть выкачено полностью по эко-

номическим соображениям, когда добыча становится нерентабельной, не смотря на все прилагаемые усилия по ее совершенствованию. Таким образом, каждый источник нефти обладает определенным запасом, который всегда меньше его ресурса.

То же самое относится и к возобновляемым источникам энергии. Например, энергия фотонов, представляющая суть энергии солнечного излучения, принципиально одинакова в любой части земного шара, включая океаны и полярные широты. Однако практическое использование энергии солнечного излучения нецелесообразно на полярных территориях и в океане. В первом случае по причине ее малости, а во втором случае, по причине больших затрат на транспортировку[1].

Как видим из приведенных примеров, запас[2] источника энергии оказывается меньше ресурса по экономическим причинам, которые, несомненно, могут изменяться в процессе технической эволюции, приводя к изменениям размеров запаса. Но в любом случае запас всегда будет меньше ресурса, так как появятся более предпочтительные условия для разработки альтернативных источников энергии.

Потребление энергоресурсов имеет смысл анализировать с момента их индустриального использования.

Запасы сырой нефти, залегающей в осадочных породах, оцениваются в 180 - 290 млрд. тонн /8/. На рисунке 1.1 приведены статистические данные о мировой добыче и потреблении нефти с 1900 г. по 2005 г. и прогноз на будущее. На рисунке 1.2 приведены статистические данные о добыче и потреблении нефти (включая и экспорт) в России и прогноз на 2010 год.

---

[1] В океане незначительная часть энергии солнечного излучения может использоваться на буйках.

[2] Так как ресурсы ВИЭ не ограничены, то под их запасом следует понимать ту часть энергии, которую можно использовать.

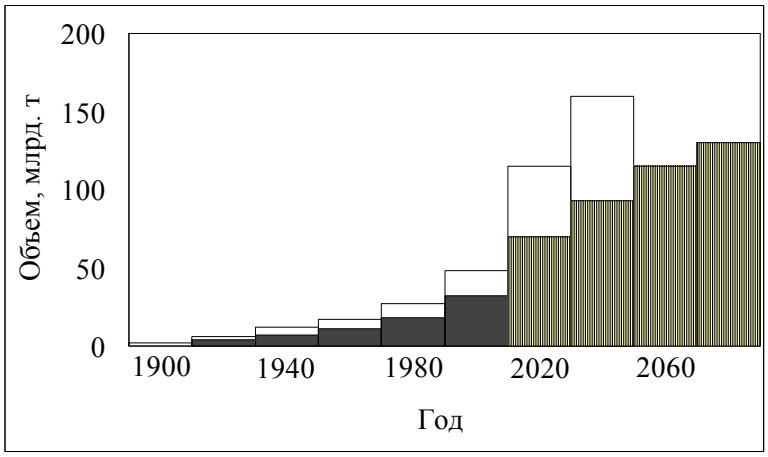


Рисунок 1.1. Диаграмма мировой добычи
и потребления нефти

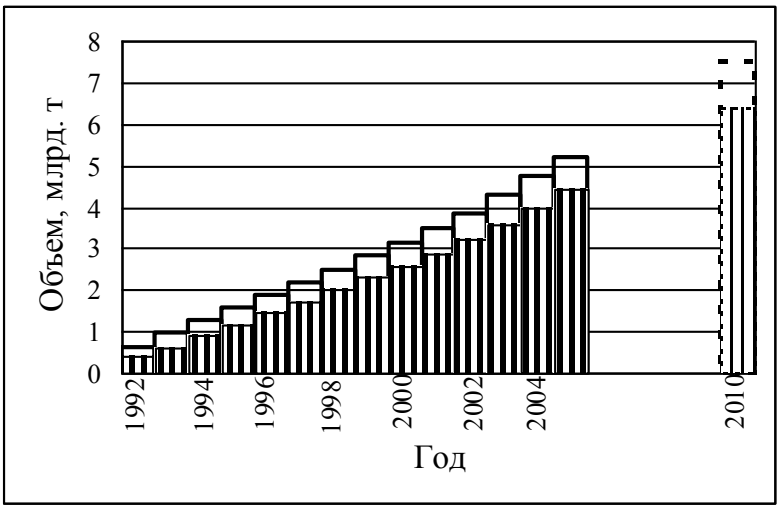


Рисунок 1.2. Диаграмма добычи и потребления
нефти в России

Как следует из диаграммы (рисунок 1.1), до настоящего времени уже потреблено 72 млрд. тонн, то есть более трети мировых запасов, и если сохранятся тенденции добычи и потребления нефти, она будет выкачена из недр Земли к 2040 году, а потреблена к 2080 году.

Аналогичная ситуация и при добыче газа. Это объясняется тем, что газ, в основном метан, обнаруживается совместно с месторождениями нефти в пропорции приблизительно 1300 $м^3$ на 1 тонну сырой нефти /7/.

Намного лучше прогнозы по запасам угля. Его мировые запасы по многим оценкам составляют 7700 млрд. тонн (в том числе в России более 3000 млрд. тонн, при годовой добыче примерно 300 млн. тонн).

Однако период добычи и использования угля около 1000 лет, причем крупномасштабное его использование составляет более 200 лет. Это привело к тому, что уголь стал труднодоступен, а его добыча в последнее время заметно дорожает, хотя он до сих пор является основным источником для выработки электроэнергии, особенно в России. Тем не менее, на фоне интенсивного расхода нефти в нашей стране предполагается сместить баланс использования в сторону твердого топлива. Начнется более интенсивное использование менее энергоемких, но более дешевых углей Кузнецкого, Канско-Ачинского и Экибастузского угольных бассейнов. Более широко будет применяться природный газ, запасы которого в нашей стране намного превосходят запасы в других странах.

До недавнего времени, а именно до 1986 года, наиболее перспективным топливом считалось ядерное. По разным оценкам его запасов (хотя и не возобновляемых) хватило бы на многие сотни лет, а с изысканием возможностей использования в атомных электростанциях (АЭС) изотопа ^{238}U, на несколько тысячелетий.

В настоящее время ядерным топливом атомных электростанций является обогащенный природный уран и искусственно получаемый плутоний. Природный уран состоит из двух изотопов – ^{235}U, которого в природном уране около 0,7%, и ^{238}U, которого в природном уране 99,3%.

После Чернобыльской катастрофы отношение к ядерному топливу стало неоднозначным, хотя по истечению времени многие страны Мира стали склоняться в пользу значительного увеличения числа АЭС, расценивая ядерную энергию как основную в переходный период до глобального применения возобновляемых источников энергии.

Анализ ресурсов возобновляемых источников энергии начнем с запасов гидроэнергии, которая хоть и относится к возобновляемым (гидроэнергия солнечного происхождения), но используется достаточно широко и достаточно долго. В силу этого обстоятельства она занимает некое промежуточное положение между традиционными и нетрадиционными источниками энергии. Здесь следует заметить, что по прогнозам возобновляемые источники энергии в будущем должны стать преобладающими, а затем и безальтернативными, то есть, согласно принятой терминологии перейдут в разряд традиционных. Существуют и другие (пессимистические) прогнозы, в которых ВИЭ в составе используемых энергоносителей отводится не более 30% /8, 10/.

Мировые запасы гидроэнергии, то есть, та ее часть, использование которой оправдано экономически, составляют 10 млрд. тонн условного топлива в год, что примерно равно всему мировому энергопотреблению в настоящее время. Запасы гидроэнергии в России составляют около 1 млрд. тонн условного топлива, то есть, около 10% мировых запасов.

Следует отметить, что в России и в Мире в целом запасы гидроэнергии для централизованного электроснабжения почти полностью реализованы. Остаются в значительной мере не реализованными запасы гидроэнергии для автономного (внесистемного) электроснабжения. Например, в России в конце 2006 года был введен в строй Зеленчукский каскад мини ГЭС.

Наиболее мощным источником возобновляемой энергии является Солнце. Мало того, все остальные источники энергии (традиционные и нетрадиционные) обязаны своим существованием Солнцу.

Полная мощность солнечного излучения составляет $4 \cdot 10^{26}$ Вт. На верхней границе атмосферы плотность солнечного излучения составляет около 1,4 кВт/м^2. Зная радиус Земли (6370 км) и площадь поперечного

сечения ($127,6 \cdot 10^6$ км^2), можно подсчитать, что вся поверхность атмосферы за год получает около $1,6 \cdot 10^{18}$ кВт.час. солнечной энергии.

Солнечная энергия, проходя через атмосферу, частично поглощается, и на поверхности Земли средняя интенсивность солнечного излучения составляет 0,35 кВт/м^2. Таким образом, на поверхность Земли за год поступает приблизительно $4 \cdot 10^{17}$ кВт.час. солнечной энергии. Это превышает самые смелые прогнозы мирового энергопотребления в 21 веке в сотни раз.

Солнечная энергия, в зависимости от сезона года может использоваться на всей территории Земного шара. Однако существую климатические зоны с большим годовым количеством солнечных часов, на территории которых применение солнечной энергии наиболее эффективно. В России к таким климатическим зонам относятся территория Северного Кавказа и Дальнего Востока.

Для оценки потенциальных возможностей ветра обычно используется удельная мощность, развиваемая воздушным потоком с поперечным сечением 1 м^2. Эта мощность пропорциональна скорости ветра в третьей степени. Так как скорость ветра различна по высоте, то различна и его мощность на разных высотах. Суммарная кинетическая энергия ветра на высоте до 100 м, где плотность воздуха можно считать постоянной, оценивается в $1,5 \cdot 10^{21}$ Дж или $4 \cdot 10^{15}$ кВт.час., что составляет примерно 1 % от энергии солнечного излучения.

Результаты исследования ветроэнергетических ресурсов в нашей стране носят противоречивый характер. Так, по зарубежным данным территория бывшего СССР (за исключением Крайнего Севера и Дальнего Востока) малопригодна для использования энергии ветра, а по отечественным данным на территории России для ветроэнергетики пригодно около 8 млн. км^2 площади. Причем по отечественным данным, только на

1 % этой площади можно построить ветроэлектростанции общей мощностью 300 - 500 тыс. МВт.

Отметим, что ветер не постоянен в течение года и суток, и более объективно ветроэнергетические ресурсы оценивать по возможной выработке энергии за год, а не по мощности. Такую оценку легко провести по многолетним данным метеостанций.

Энергия ветра, как энергии движущегося потока воздуха, определяется по формуле:

$$E_K = \frac{\rho v^3 F T}{2} \qquad (1.1)$$

где: ρ - плотность воздуха, кг / м^3 ; ρ = 1,3 кг / м^3;

v - скорость ветра, м / с;

F - площадь сечения ветрового потока, м^2;

T - время действия ветра, ч.

Метеостанции располагают данными о вероятности различных скоростей ветра, включая $v < 1$ (штиль), за все месяцы года и в течение суток. Используя эти данные, удельную энергию ветра за год можно определить по формуле /5, 6, 9/:

$$E_K = \rho F \Sigma P(v_j) v_j^3 T / 2 = 0{,}65 \Sigma P(v_j) v_j^3 T, \qquad (1.2)$$

где: $P(v_j)$ - вероятность ветра со скоростью v_j в период T;

E_K - энергия ветрового потока сечением 1 м^2 за год, Вт.ч / м^2.

Расчеты по формуле (1.2) для Ростовской области показали, что годовая энергия ветра в этом регионе составляет 3,5 тыс. кВт.ч/м^2 /5, 6/.

Если принять, что площадь под ветроустановкой примерно равна площади, ометаемой ветроколесом, то в Ростовской области на одного человека приходится 70 МВт.час. энергии ветра. Таким образом, потенциальные возможности ветроэнергетики в Ростовской области и, априорно, в России в целом, значительны.

Биотопливо хоть и относится к возобновляемым видам энергии, но требует определенного времени на возобновление. В этом смысле оно качественно не отличается от ископаемого топлива, но скорость его возобновления гораздо выше. Например, что бы восполнить запасы нефти, потребляемые сейчас человечеством в течение года, необходимо миллион лет. Запасы же потребленного за год биотоплива (при его искусственном выращивании) возобновляются не более чем за год. Таким образом, имеется возможность всегда восполнить потребленные запасы биотоплива, и поэтому его считают возобновляемым источником энергии.

Теплотворная способность биотоплива различна и составляет от 10 МДж/кг (сырая древесина) до 55 МДж / кг (метан). Средняя теплота сгорания биомассы 20 МДж/кг /9/.

Отметим, что биотопливо хоть и возобновляемо, но не неисчерпаемо, и при интенсивном его потреблении воспроизводство биомассы может не восполнять расхода. Следовательно, потенциально можно потреблять только такое количество биотоплива, при котором расход биомассы будет не больше естественного ее воспроизводства.

В пересчете на сухое вещество образование биомассы в биосфере (включая океаны) идет со скоростью $250 \cdot 10^9$ т/год /8, 9/. Для России воспроизводимость биомассы составит около $15 \cdot 10^9$ т/год /5, 6/. Если принять, что в энергетике можно использовать половину воспроизводимой биомассы, то, ежегодно путем сжигания биотоплива можно получать $0{,}4 \cdot 10^{11}$ кВт.час. тепловой энергии. Это не так уж много по сравнению с общим энергопотреблением страны (примерно 3% энергии, полу-

чаемой от нефти, и 6% энергии природного газа), но в некоторых случаях энергия биотоплива может находить практическое применение с реальным экономическим эффектом.

Энергия приливов обусловлена изменением уровня океана в результате вращения систем Земля – Луна и Земля – Солнце. В открытом океане изменение уровня воды между полным приливом и полным отливом составляет приблизительно 1 метр. В прибрежных зонах под влиянием рельефа и очертаний береговой линии этот уровень может увеличиваться, достигая 18 – 15 м (Атлантическое побережье Канады и некоторые места Ла-Манша). Считается, что приливная электростанция может работать при изменении уровня не менее 10 м. К сожалению, таких мест на Земле не более тридцати. На территории России это побережья Охотского моря (13 м), Белого и Баренцева морей (10 м) /8, 9, 10/.

Принципиально можно использовать энергию океанских волн, причем в открытом океане, а не в полосе прибоя, как считалось ранее. Средняя мощность океанских волн достигает десятков кВт на 1 метр фронта волны. Однако электростанции, использующие энергию волны, не имеют практического применения, и вряд ли будут иметь широкое применение в обозримом будущем, так как трудности транспортировки электроэнергии делают ее наименее выгодной даже по сравнению с другими возобновляемыми источниками энергии.

Геотермальная энергия представляет собой тепловую энергию ядра Земли, нагретого до температур (гипотеза) порядка 2500 - 3000°С. Это тепло под действием градиента температур поступает на поверхность Земли и участвует вместе с теплоотдачей в тепловом балансе земного климата. Геотермальная энергия, поступающая на поверхность земли очень рассеяна и имеет плотность порядка 0,05 Вт/м^2. Очевидно, что из-за низкой плотности использовать геотермальную энергию повсеместно весьма проблематично. Однако на Земле имеются места с повышенной

плотностью геотермальной энергии, точнее, ее разновидностей, гидро- и паротермальной энергии. Это энергия горячих источников воды и пара, относительно близко расположенных к поверхности Земли (до 10 км). Особенно эффективны в этом плане гейзеры, то есть, источники, периодические выбрасывающие над поверхностью фонтаны горячей воды (температура 60 - 70°С) или пара (температура более 100°С) высотой 20 – 40 метров.

Тепло таких источников используется, в основном, для горячего водоснабжения и отопления. Такие источники известны на Камчатке, в Японии, в Новой Зеландии, в Исландии и в других странах. Мощность мировых запасов геотермальной энергии оцениваются в размере порядка 30 ГВт. Эти запасы составляют только незначительную часть соответствующих ресурсов (менее 0,1%), что объясняется практической недоступностью геотермальной энергии, заключенной в ядре Земли.

Современное состояние использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии характеризуется следующими данными.

Мощность ветроэнергетических установок

Германия . . . . . .4444 МВт (37%)
США . . . . . 1819 МВт (15%)
Дания . . . . . 1752 МВт (14,5%)
Испания . . . . . .1539 МВт (13%)
Индия . . . . . 1100 МВт (9%)
Россия . . . . . 4 МВт (0,03%)
Во всем Мире . . . . . .12 000 МВт (100%)

Мощность фотоэлектрических преобразователей

Япония . . . . . 80 МВт (40%)
США . . . . . .60 МВт (30%)
Германия . . . . . .50 МВт (25%)
Россия . . . . . .0,5 МВт (0,25%)
Во всем Мире . . . . . 200 МВт (100%)

Площадь солнечных нагревателей

Япония . . . . . 7 млн. $м^2$ (33%)
США . . . . . .4 млн. $м^2$ (19%)
Израиль . . . . . .2,8 млн. $м^2$ (13%)
Греция . . . . . .2 млн. $м^2$ (9,5%)
Россия . . . . . .0,1 млн. $м^2$ (0,5%)
Во всем Мире . . . . . .21 млн. $м^2$ (100%)

Мощность геотермальных энергоустановок

США . . . . . 2228 МВт (27,8%)
Филиппины . . . . . 1909 МВт (23,8%)
Италия . . . . . 785 МВт (9,8%)
Мексика . . . . . .755 МВт (9,4%)
Индонезия . . . . . 589 МВт (7,4%)
Россия . . . . . 23 МВт (0,3%)
Во всем Мире . . . . . 8000 МВт (100%)

Мощность гидроэлектростанций в России составляет 43940 МВт или 6,6% всех гидроэлектростанций в Мире.

Как видно доля нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (кроме гидроэлектростанций), используемых в нашей стране, катастрофически мала. Следует отметить, что на фоне обострения проблем использования традиционных источников энергии, принимались различные программы развития нетрадиционной энергетики в нашей стране, но которые, к сожалению, ни разу не были выполнены полностью. Основной причиной такого состояния является огромный запас традиционных источников энергии, нефти, газа и угля. Россия способна не только удовлетворять собственные энергетические потребности, но и экспортировать значительную часть этих энергоносителей. Последнее обстоятельство, в условиях беспрецедентного роста цен на ископаемое топливо, и является причиной бурного развития ресурсодобывающих отраслей, способных принести значительные дивиденды на современном этапе, против ожидаемых дивидендов от использования возобновляемых источников энергии в будущем.

Вместе с тем, по средним прогнозам доля использования возобновляемых источников энергии в Мире возрастет уже в первой половине 21 века до 33%, в некоторых странах до 50%. Это позволит уменьшить мировую зависимость от ископаемого топлива. Можно ожидать, что на фоне этих тенденций изменятся отношения к возобновляемым и нетрадиционным источникам и в России, но что может оказаться уже запоздалым.

Вопросы
для самоконтроля

1. Какие источники энергии называются традиционными? Почему?

2. Какие источники энергии называются нетрадиционными? Почему?
3. Какие источники энергии относятся к возобновляемым?
4. Что такое запас и ресурс источника энергии?
5. Что такое запас энергии возобновляемого источника?
6. Какой изотоп урана используется в АЭС в настоящее время? Какого его содержание в природном уране?
7. Какова плотность солнечного излучения на верхней границе атмосферы?
8. На какие составляющие разделяют солнечное излучение? Какие у этих составляющих признаки?
9. Какую часть (приблизительно) составляет энергия ветра по отношению к энергии солнечного излучения?
10. В каких пределах находится теплотворная способность биотоплива?

Задания
для закрепления материала

1. Выясните, какие крупные электростанции действуют в Вашем регионе. На каком топливе они работают.
2. Какие виды возобновляемых источников энергии имеются в Вашем регионе.
3. Выясните, сколько фермерских хозяйств в Вашей местности.
4. Выясните, используются ли (и как) в Вашем регионе возобновляемые источники энергии.
5. По какой цене Вы оплачиваете электроэнергию, газ, уголь и др. энергоносители. Сколько Вы платите за год.

Лекция 2. **Проблемы использования энергетических ресурсов**

2.1. Проблемы использования традиционных источников энергии

Одной из проблем использования традиционных источников энергии является ограниченность их запасов, что, в конце концов, приведет к полному истощению ископаемого топлива. Проблема настолько очевидна, что не нуждается в доказательстве. В настоящее время обсуждается лишь время, в течение которого запасы ископаемого углеводородного топлива иссякнут. По пессимистическим прогнозам этих запасов осталось на 30 – 40 лет. Существуют и более оптимистические прогнозы, но все они не превышают ста лет. Это значит, что не позднее последней четверти текущего столетия наступит энергетический кризис использования традиционных источников энергии.

Проблема истощения запасов ископаемого топлива выдвинула задачу поиска его заменителей, в связи с чем, 21 век станет веком поиска новых источников энергии, способных удовлетворять растущие энергетические потребности человечества.

Сейчас большие надежды возлагаются на атомные электростанции и на изыскание практических способов использования для этих целей урана ^{238}U, основного изотопа природного урана.

Однако уран, как и всякое ископаемое топливо, имеет конечные запасы, и, не смотря на его большой энергетический потенциал, так же подвержен истощению. Это значит, что применение ядерной энергии не решает проблему истощения, а лишь отодвигает кризисные явления, хотя потенциально и на очень большое время.

Истощение запасов углеводородного топлива породило вторую проблему, которую невозможно устранить путем использования ядерного топ-

лива. Эта проблема состоит в интенсивном росте стоимости энергии, получаемой путем сжигания традиционного топлива.

Цены на нефть и нефтепродукты растут немыслимыми темпами и за 2005 – 2006 год выросли почти в десять раз. Несмотря на значительное увеличение, цены на этот вид топлива продолжают увеличиваться и превышают все прогнозы по их динамике. Росту цен способствует также и нестабильная политическая обстановка в странах поставщиках нефти. Непрерывное ведение боевых действий в нефтеносных регионах ускоряет расходование (уничтожение) мировых запасов нефти.

Повышение цен на нефть и нефтепродукты увеличило спрос, а, следовательно, и цены на другие традиционные носители энергии, хотя и в меньшей степени. В итоге повышаются цены на электроэнергию и тепло.

Здесь следует отметить, что стоимость электроэнергии, производимой атомными электростанциями, вопреки ожиданиям, оказалась наиболее высокой. И это без учета предстоящих затрат на утилизацию отходов ядерного топлива и повышение безопасности АЭС. То есть, атомная энергия, решая в значительной мере первую проблему традиционной энергетики (истощение запасов ископаемого топлива), обостряет вторую проблему (быстрое увеличение стоимости энергии, получаемой от традиционных источников).

Наконец, третья проблема, которая быстро переходит в разряд первостепенных, является экологической, обусловленной негативным влиянием на окружающую среду традиционной энергетики.

Известно, что вся энергия, производимая и потребляемая в любой форме, в конечном итоге превращается в теплоту.

По ряду независимых оценок, хорошо согласующихся между собой, производство теплоты, выделяемое в окружающую среду составляет около $5 \cdot 10^{12}$ Дж/с. Эта величина очень мала по сравнению с количеством теплоты, поглощаемой нашей планетой, и составляет менее 0,025 %. Искусственно выделяемая теплота практически не влияла бы на кли-

мат Земли, если бы она была равномерно распределена по всей территории Земного шара, включая и океаны.

В действительности искусственные тепловыделения сконцентрированы в определенных местах, что связано не только с потреблением энергии, но и с ее производством и преобразованием. Например, к.п.д. тепловых электростанций составляет около 35 % (причем в лучших случаях), то есть, более 65 % энергии топлива в конечном итоге уходит во внешнюю среду. В местах производства энергии больших мощностей выделение тепла может в несколько раз превышать средние значения в Мире. Так, в районе Лос-Анджелеса выделяется до 0,5% теплоты по сравнению с теплотой, поступающей от Солнца в этом же месте, и выделение теплоты продолжает расти. В таких случаях искусственное тепловыделение способно заметно повлиять на тепловой баланс в данной местности. Существуют гипотезы, что причиной разрушительных ураганов, обрушившихся на побережье Америки в 2005 году, были местные тепловыделения в промышленных районах США.

Таким образом, тепловые электростанции могут оказывать существенное локальное влияние на климат, и следует установить, как изменение теплового баланса сказывается на экологии.

Расчеты, проведенные различными авторитетными организациями (в том числе и независимыми, состоящими при ООН), показали, что повышение температуры приземного слоя атмосферы только на 1 градус повлечет существенное изменение границ климатических зон. При увеличении температуры на 3 градуса начнется таяние ледяных шапок Земли, и большинство территорий окажется под водой. Например, затопленным окажется полуостров Флорида. Аналогичная участь может постигнуть и Приэльбрусье. Вследствие повышения уровня воды в Мировом океане, уменьшатся площади пляжей и других прибрежных территорий. Могут измениться в сторону уменьшения и территории вечной

мерзлоты. Учитывая, что в России северные населенные пункты возводились с учетом вечной мерзлоты грунта, таяние может создать значительные проблемы устойчивости строительных фундаментов. По данным средств массовой информации России температура грунта на глубине 0,5м в зоне вечной мерзлоты (Якутия) уменьшилась за последние пять лет с – 2,8^{o}С до –1,5^{o}С.

Предполагается, что глобальное потепление может привести к изменению океанских течений и начнется своего рода цепная реакция изменения климата Земли. Механизм изменения океанских течений состоит в следующем. Талые воды с полюсов по законам механики устремятся к экватору, то есть, навстречу теплым океаническим течениям, что уже приведет к замедлению их течения. А так как талые воды более пресные, чем вода океана, то они и менее плотные. Следовательно, легкие талые воды будут находиться сверху вод океанических течений и экранировать их.

Следует подчеркнуть, что такие изменения температуры носят локальный характер. Глобальное повышение температуры менее интенсивно. Однако локальные изменения также могут привести к катастрофическим последствиям. Реальными примерами служат участившиеся на планете ураганы, ливни, смерчи (центральная часть России, Европа, черноморское побережье в районе Новороссийска и Анапы и др.), таяние и сход ледников (Северная Осетия).

Кроме того, проведенные теми же организациями расчеты не дают повода для успокоения. Так, при локальном приросте теплоты только на 4%, глобальная температура у поверхности Земли возрастет на 1 градус уже через 100 - 150 лет, а это не такое уж отдаленное будущее. Кроме того, те же расчеты показывают, что, при интенсивной замене органиче-

ского топлива на ядерное, приращение выделяемой теплоты на 4% является заниженной оценкой[1].

Здесь еще раз следует остановиться на особенностях атомных электростанций.

Атомные электростанции, работая в проектном режиме, являются наиболее экологически чистыми электростанциями. Однако последствия возможных аварий значительно серьезнее аварий на других электростанциях, использующих традиционные источники энергии.

Реальная авария на Чернобыльской АЭС подтвердила ту огромную опасность, которую представляет ядерное топливо, и напомнила связанные с его использованием экологические проблемы. Так, в результате Чернобыльской аварии было выведено из оборота около 5 млн. га сельскохозяйственных угодий, переселено более 250 тыс. человек, онкологические заболевания в зараженных районах увеличились в 2 раза /5, 6/.

Не улучшает экологическую ситуацию и хранение ядерного топлива, и захоронение ядерных отходов.

Учитывая массовую опасность аварий на атомных электростанциях, их изучению придавалось большое значение, но при этом основными методами являлись теоретические, в ходе которых на ЭВМ моделировались процессы протекания аварийных ситуаций. Применение машинного моделирования аварийных процессов на атомных электростанциях обусловлено весьма большой сложностью провести активный физический эксперимент. Тем не менее, в США в 1971 году дважды были проведены реальные испытания небольших АЭС в аварийном режиме по неполному процессу /8/. В обоих случаях аварии развивались по совершенно непредвиденному сценарию. Это привело к тому, что США фактически

[1)] Последние наблюдения за климатом показали, что прирост средней температуры происходит более интенсивно, чем ожидалось.

отказались от ввода в действие атомных электростанций, по крайней мере, с 1978 года и до конца 80-х годов прошлого века в этой стране не было выдано ни одного патента на ввод в действие новых атомных реакторов[2].

В Швеции по тем же причинам к 2010 году планируется закрыть 12 атомных электростанций, заменить которые предполагается ветроэнергетическими установками.

Следует отметить, что далеко не все страны намерены сворачивать атомную энергетику, а некоторые наоборот увеличивают ее долю в общем энергобалансе. Так, например, Иран, имея очень большие нефтяные запасы и являясь крупнейшим экспортером этого топлива, прилагает весьма большие усилия по развитию атомной энергетики, планируя ввести в строй не менее 20 атомных электростанций.

Кроме непосредственного тепловыделения на тепловой баланс Земли оказывают влияние различные выбросы, попадающие в атмосферу.

В результате работы тепловых электростанций в атмосферу наиболее интенсивно по сравнению с другими газами выбрасывается углекислый газ CO_2. Углекислый газ формально не является вредным выбросом, поскольку не вступает в фотохимические реакции и не образует смога, а при определенных концентрациях даже оказывает положительное воздействие на флору.

Однако двуокись углерода является хорошим поглотителем инфракрасного излучения и повышает температуру атмосферы. С 1957 года (Международный геофизический год) проводятся тщательные измерения

[2] В последствии, в условиях роста цен на нефть, США приняли программу дальнейшего развития атомной энергетики, повысив требования к ее безопасности. В этой же программе увеличена доля и возобновляемых источников энергии.

концентрации CO_2 в атмосфере[3]. По данным этих исследований, около половины выбросов углекислого газа накапливается в атмосфере. Таким образом, при сохранении тенденции роста энергетики на ископаемом углеродном топливе, концентрация двуокиси углерода до середины нынешнего столетия возрастет в 4 раза /8/. Пока не выяснено, смогут ли флора и океаны самортизировать такое увеличение, но что оно заметно отразится на тепловом балансе Земного шара – бесспорно.

То же самое относится и к парам и молекулам воды, которые в избытке выделяются в результате работы градирен тепловых электростанций и в ходе сжигания углеводородов. Тепловая электростанция мощностью 1000 МВт ежесуточно превращает в пар 38 тыс. м ^{3} воды, что равно суточному потреблению города с населением около 1 млн. человек. Водяные пары в атмосфере (особенно в виде облаков) существенно изменяют альбедо Земли.

Кроме влияния на тепловой баланс, традиционная энергетика загрязняет атмосферу. Наиболее массовым вредным выбросом является окись углерода CO. Ежегодное поступление в атмосферу окиси углерода составляет более 100 млн. тонн, причем менее десятой части этой массы обусловлено лесными пожарами, а источники остального поступления являются искусственными. Окись углерода наиболее интенсивно выделяется двигателями внутреннего сгорания транспортных средств и передвижных электростанций. Участие в этом загрязнении крупных электростанций менее значительно.

Следует отметить, что влияния на тепловой баланс планеты окись углерода практически не оказывает, но при высоких концентрациях оказывает существенный вред для здоровья.

---

[3]) В соответствии с программой Международного геофизического года в исследованиях участвует и Россия (прежде СССР)

Для объективности заметим, что в настоящее время в атмосфере, видимо, достаточно естественных поглотителей окиси углерода, так как его концентрация не увеличивалась при увеличении концентрации углекислого газа. В этой связи, окись углерода сейчас представляет только локальную угрозу в местах его интенсивного выделения. Однако его естественные поглотители неизвестны. Если в результате увеличения температуры эти неизвестные поглотители окиси углерода будут ущемлены, то его нарастающий выброс приведет к катастрофе. Кроме того, существуют опасения, что окись углерода может проникать в стратосферу и вступать в реакции с озоном, что приведет к крайне тяжелым последствиям.

В процессе сжигания органического топлива выделяются и другие газообразные элементы, такие, как окислы серы и азота. Эти соединения играют важную роль в образовании смога. Кроме того, соединяясь с водой, они образуют соответствующие кислоты, для которых характерна большая гигроскопичность. Конденсируя пары воды и растворяясь в конденсате, они являются причиной столь участившихся в последнее время кислотных дождей.

Кроме влияния на атмосферу, традиционная энергетика влияет и на геосферу. Это влияние связано с добычей топлива из недр Земли. Рассмотрим, в этой связи, некоторые распространенные способы добычи нефти.

Примерно до конца девятнадцатого века нефть добывалась путем бурения нефтяных скважин и непосредственной выкачки нефти (часто – под естественным давлением). По мере увеличения глубины нефтяных скважин, затраты на добычу нефти по сравнению с ее оптовыми ценами росли опережающими темпами. В этой связи, преимущество стали получать способы, так называемого выдавливания нефти граничащими с ней средами (рисунок 2.1).

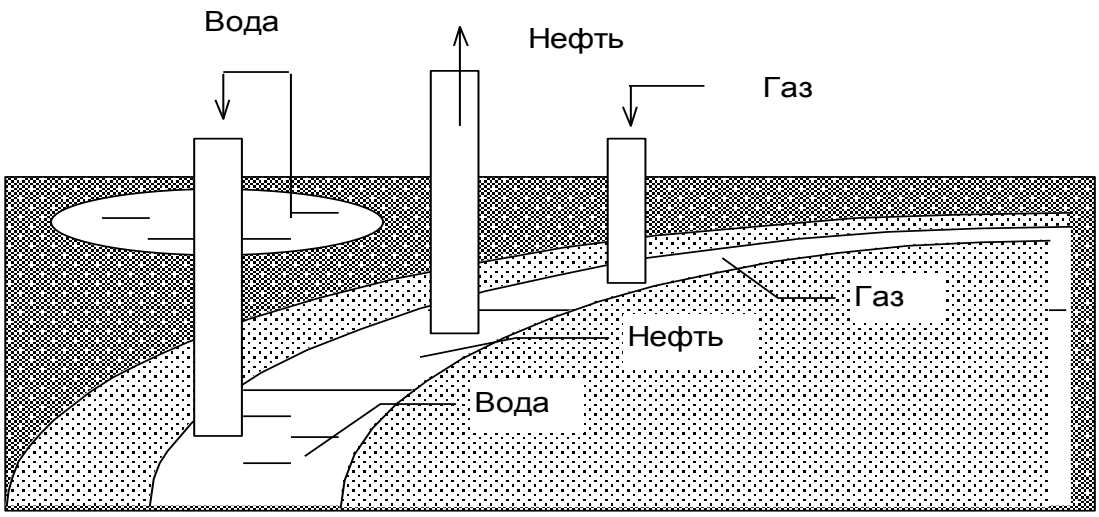


Рисунок 2.1. Способ добычи нефти выдавливанием

Этот способ предполагает закачку близлежащей (например, грунтовой или артезианской) воды и воздуха атмосферы в бассейн месторождения нефти (в зону содержания воды и газа соответственно). Избыточное давление воды и газа выдавливает нефть на поверхность. В нашей стране такие способы имею место в северных нефтяных районах.

Такая добыча нефти, имея явные технико-экономические преимущества (нет необходимости в опускании погружных насосов с силовым кабелем, создании нескольких уровней подъема и т.д.), оказывает влияние на геосферу. Это влияние заключается в размывании верхнего горизонта. При этом расширяются каналы хода воды, что приводит к перераспределению грунтовых и близко лежащих вод, то есть, к повышению или понижению их уровня. Такое перераспределение создает проблемы в сельскохозяйственном производстве, строительстве и быту.

Опасна, с экологической точки зрения, также добыча нефти с морских платформ и транспортировка танкерами. Многочисленные аварии танкеров и опрокидывания платформ уже нанесли ощутимый вред аква-

тории и прибрежным районам. Показательным примером может быть катастрофа с танкером "Prestig" у берегов Испании.

Некоторые авторитетные и независимые международные организации на основании проведенных исследований предполагают, что, при сохранении темпов использования ископаемого топлива, катастрофические экологические изменения могут наступить уже в двадцать первом веке. Для объективности следует отметить, что такие утверждения базируются тоже на результатах теоретических исследований и машинного моделирования. Тем не менее, практически установленный факт того, что любые преобразования ископаемого топлива для производства энергии приводят к различным загрязнениям окружающей среды (включая атмосферу, геосферу, гидросферу и биосферу), не дает повода для сомнений в качестве прогноза крупных экологических проблем.

В заключение отметим, что экологическую чистоту традиционных источников энергии можно повысить путем совершенствования фильтров и ловушек вредных выбросов, повышения уровня защиты АЭС, увеличения эффективности утилизации ядерных отходов, что, однако, потребует значительных затрат. Уменьшить влияние традиционных источников энергии на тепловой баланс Земли можно только путем сокращения масштабов их применения, так как тепло, в конце концов, все равно попадает в окружающую среду.

2.2. Проблемы использования нетрадиционных источников энергии

Характерной особенностью большинства нетрадиционных и возобновляемых источников энергии является их низкая плотность и неуправляемость. Исключение составляют гидроэнергия рек, биотопливо и приливы. Это создает проблемы их применения в большой энергетике и

должно учитываться при определении условий эффективного применения возобновляемых источников энергии.

Возобновляемые источники энергии, совершенно очевидно, не подвержены истощению, следовательно, эта часть энергетической проблемы может быть устранена. Кроме того, считается, что возобновляемые источники энергии практически не оказывают вредного влияния на экологию. Однако к этому утверждению следует относиться весьма осторожно. Так создание мощных системных электростанций даже на таких “чистых” возобновляемых источниках энергии, какими являются солнечное излучение или ветер, может оказать заметное влияние на изменение климата (по крайней мере, локальное). Причинами могут стать изменение альбедо поверхности Земли в месте расположения большого количества солнечных коллекторов, или изменение ветровых потоков в местах расположения мощных многоагрегатных ветровых электростанций. Использование небольших электростанций на возобновляемых источниках энергии, рассредоточенных на большой территории, не может привести к экологическим изменениям (исключение могут составить электростанции, использующие биотопливо при неправильном его получении и гидроэлектростанции).

Таким образом, широкомасштабное применение возобновляемых источников энергии позволило бы предотвратить или существенно смягчить назревающие проблемы энергетики. Однако массовое применение возобновляемых источников энергии для энергоснабжения тоже встречается с рядом проблем, в основном технико-экономического характера. Так электроэнергия, получаемая от возобновляемых источников энергии, в настоящее время достаточно дорогая, и ее стоимость в большинстве случаев превышает стоимость электроэнергии, получаемой традиционными способами. Это приводит к тому, что применение преобразователей энергии возобновляемых источников в энергосистемах (в каче-

стве разгрузочных источников электроснабжения) в настоящее время может оказаться экономически невыгодным. То есть, экономия электроэнергии, получаемая за счет использования возобновляемых источников энергии, не превышает затрат на сооружение энергоустановок на основе ВИЭ.

Мало того, некоторые расчеты показывают, что глобальная замена традиционных источников энергии на возобновляемые встречается с очень принципиальными проблемами.

Так, например, для удовлетворения всех потребностей человечества в тепле только за счет энергии солнечного излучения, под солнечными коллекторами потребуется занять площадь порядка 130 тыс. км^2 /6/. Кроме того, это будет связано с очень большими материальными затратами. Согласно расчетам изготовление коллекторов солнечного излучения площадью 100 км^2, требует примерно 10^8 тонн алюминия. Доказанные же на сегодня мировые запасы алюминия оцениваются в $1{,}17 \cdot 10^9$ тонн.

Если же предположить, что все потребности в энергии будут удовлетворяться за счет солнечного излучения, то потребуется площадь от 1 до 3 млн. км^2. В то же время площадь пахотных земель в Мире составляет примерно 13 млн. км^2.

Заметим, что эти расчеты неизбежно изменяться в будущем в пользу солнечных энергоустановок, за счет разведки новых месторождений алюминия, замены его другими материалами (в том числе и искусственными полимерными), повышения к.п.д. солнечных преобразователей, использования "занятых" площадей, например крыш зданий, охранных территорий и т.п. Кроме того, необходимо учесть сокращение расходов алюминия на производство электропроводов.

Тем не менее, даже с учетом возможных улучшений, реально в этом столетии можно ожидать некоторое увеличение доли атомных электростанций (в 2 – 2,5 раза), некоторое уменьшение топливных элек-

тростанций (причем с заметным уменьшением доли нефтепродуктов), и увеличение доли возобновляемых источников энергии до 20 – 25%. То есть, централизованное электроснабжение будет иметь традиционное состояние (с увеличением доли природного газа, атомного топлива, угля), но с некоторым увеличением возобновляемых источников энергии.

Однако следует отметить, что для некоторых объектов, удаленных от энергосистем на значительные расстояния, возможно только автономное электроснабжение, так как подключение их к централизованной системе требует больших капитальных затрат, связанных со строительством и эксплуатацией протяженных линий электропередачи. Для таких объектов стоимость электроэнергии, получаемой от возобновляемых источников энергии, становится соизмеримой со стоимостью электроэнергии, получаемой от энергосистем, и этот фактор перестает быть сдерживающим для применения возобновляемых источников энергии. Кроме того, автономные топливные электростанции имеют более низкое качество электроэнергии, и в этой связи энергоустановки на возобновляемых источниках энергии приобретают бóльшие перспективы выдержать конкуренцию.

Тем не менее, применение возобновляемых источников энергии для электроснабжения удаленных объектов все же остается проблематичным. Остаются такие препятствия, как малая плотность энергии многих возобновляемых источников, их нерегулярность и неуправляемость.

Малая плотность возобновляемых источников энергии в настоящее время создает практически непреодолимые препятствия при электроснабжении мощных потребителей с экономической точки зрения. Мощные энергоустановки на возобновляемых источниках энергии в настоящее время весьма дорогие и, тем не менее, не могут обеспечить высокую надежность электроснабжения в автономном режиме.

Следует отметить, что надежность автономного электроснабжения может быть увеличена за счет повышения мощности электростанций и применения аккумуляторов энергии. Однако это неблагоприятно скажется на стоимости электроэнергии.

Проблему малой плотности возобновляемых источников энергии усугубляют низкие к.п.д. многих преобразователей энергии. Так, к.п.д. современных фотоэлектрических преобразователей энергии солнечного излучения, самого мощного вида энергии возобновляемых источников, не превышает 27% для лабораторных условий. Коммерческие установки на фотоэлектрических преобразователях имеют к.п.д. всего 10 – 14%.

При использовании возобновляемых источников энергии совместно с традиционными источниками энергии в единой энергосистеме проблема нерегулярности поступления мощности от ВИЭ в значительной степени устраняется за счет размещения нетрадиционных энергоустановок в разных климатических зонах и использовании их в качестве разгрузочных. Однако при этом возникают проблемы обеспечения необходимого качества получаемой электроэнергии. Эти проблемы объясняются сильной неравномерностью поступления энергии в энергетические периоды. Так ветер над материками обладает значительной порывистостью, что требует специальных мер по поддержанию частоты вращения генераторов переменного тока, солнечное излучение имеет сильную зависимость от состояния атмосферы.

Гидроэнергия и биотопливо свободны от проблем нерегулярности и неуправляемости, однако, их использование может породить проблемы экологического характера. Эти проблемы обусловлены следующими обстоятельствами.

Для повышения плотности гидроэнергии рек строятся специальные сооружения (рисунок 2.2), обеспечивающие накопление энергии перед

ее использованием и увеличивающие энергетический потенциал в период ее использования.

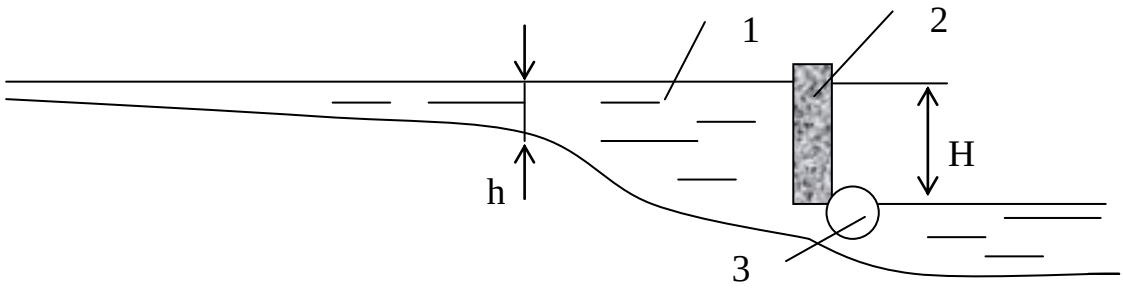


Рисунок 2.2. Схема гидроэлектростанции

1 – искусственный водоем с большим объемом воды, 2 – плотина, 3 – гидротурбина, h – уровень воды перед водоемом, H – уровень воды над турбиной. H >> h

Накопление энергии производится за счет увеличения объема воды перед ее подачей на гидротурбину генератора. Это возможно путем создания препятствия естественному течению воды в виде плотины, то есть создания искусственного водоема. Повышение потенциала происходит за счет повышения уровня сбрасываемой на гидротурбину воды, что тоже обеспечивается искусственно созданной плотиной.

Таким образом, гидроэлектростанции требую затопления больших территорий, часто сельскохозяйственных угодий или лесных массивов. Например, при строительстве сибирских электростанций под Братским, Усть-Илимским и Саяно-Шушенским водохранилищами оказались не вырубленные леса.

При строительстве гидроэлектростанций на реках с малыми течениями (малым уклоном) под водохранилища отводятся особенно боль-

шие площади для получения приемлемых энергетических параметров гидроэлектростанции. Большие, искусственно созданные, поверхности открытой воды в результате ее испарения оказывают локальное влияние на состав атмосферы и ее температуру. По этой причине вряд ли следует считать оправданным строительство Цимлянской, Рыбинской и Каховской ГЭС.

Концентрация огромных масс воды может приводить к перераспределению грунтовых вод, ухудшая водный баланс почв и ухудшая условия жизни в ближайших населенных пунктах. Наконец, плотины могут стать препятствием движению нерестовых рыб. Кроме того, для сохранения судоходства приходится строить систему шлюзов.

Все это не только отрицательно сказывается на экологии, но и на стоимости вырабатываемой на гидроэлектростанциях электроэнергии.

Наряду с перечисленными отрицательными явлениями строительство гидроэлектростанций имеет и сопутствующие положительные экономические аспекты. Так, водохранилища позволяют внедрять оросительную систему земледелия в засушливых районах. Например, Цимлянское водохранилище обеспечило орошение восточных земель Ростовской области.

Наличие водохранилищ создает условия для шлюзования и соединения судоходными каналами рек, протекающих на разных уровнях. Так Волго-Донской канал соединил при помощи системы шлюзов реки Дон и Волгу, значительно сократив затраты на перевозки водным транспортом.

На первый взгляд использование биотоплива не может оказывать отрицательного влияния на экологию, так как продукты его сгорания органического происхождения и возвращаются в естественную биосферу. Однако это не всегда так. Если биотопливо использовать с высокой интенсивностью, то естественное его восполнение будет отставать от искусственного расходования, что может привести к истощению биомассы.

Зеленая биомасса (флора) участвует в газовом балансе атмосферы Земли, и ее ущербление приведет к негативным экологическим последствиям.

Кроме того, интенсивное использование биотоплива требует смещения производства растительной продукции от продовольственного и социального направления к энергетическому. То есть, при искусственном выращивании биотоплива потребуется уменьшать площади сельхозугодий под традиционными культурами продовольственного и социально-технического назначения.

Считается, что при производстве биотоплива можно получать полезный побочный продукт – питательные органические удобрения. Однако производство биотоплива обычно производится в анаэробных условиях (с ограничением кислорода воздуха). Полученный таким образом побочный продукт в виде твердого остатка после выделения биогаза имеет повышенную кислотность и его применение будет закислять почву. Альтернативный вариант использования пожнивных остатков растительной продукции в виде сидеральных удобрений имеет явные преимущества, так как запаханная не переработанная масса является более ценным удобрением и не закисляет почву.

Тем не менее, учитывая, что у нас в стране и в Мире очень много биомассы в виде различных отходов сжигается без использования получаемого тепла, производство биотоплива следует считать полезным, но само производство необходимо вести с учетом альтернативных вариантов использования земельных площадей и биомассы.

В заключении анализа ВИЭ кратко охарактеризуем особенности применения геотермальной энергии и энергии приливов.

Геотермальная энергия при ее использовании не оказывает отрицательного влияния на экологию, так как ее тепло является низкотемпературным и не нарушает естественный тепловой баланс. Недостатком

применения этого вида энергии является то, что на территории России она доступна в малозаселенных местах и полученное тепло придется транспортировать на значительные расстояния к месту его потребления.

Энергия приливов является наиболее регулярной из всех видов нетрадиционной энергии, поэтому приливные электростанции легко рассчитываются и управляются. Предположительно приливные электростанции не могут нарушать экологию. Однако мест, где могут быть построены приливные электростанции, на Земле не много, что не позволяет предположить значительной доли энергии приливов в мировой и отечественной энергетике.

2.3. Место нетрадиционных источников энергии в удовлетворении энергетических потребностей человека

Прежде, чем определить место нетрадиционных источников энергии, проведем анализ использования энергии человечеством.

В настоящее время значительную долю мирового энергопотребления составляют тепловая и механическая энергии. Электроэнергия является промежуточным видом энергии между источником и потребителем. Эта роль электроэнергии обусловлена ее способностью легко получаться из других видов энергии и преобразовываться в другие виды энергии, легко аккумулироваться и легко передаваться на большие расстояния. В чистом виде электроэнергия применяется крайне редко в электротехнологических процессах. Таким образом, электростанции на традиционных источниках энергии необходимы для получения удобного вида энергии, который затем будет преобразован в необходимый вид для получения полезной работы или тепла.

Естественно более эффективно использовать энергию без преобразований, но несовпадение мест получения и потребления энергии опять

таки требует ее промежуточного преобразования, например, в электроэнергию.

Место и роль нетрадиционных источников энергии будем определять исходя из того, что энергия должна производить полезную работу или превращаться в тепло в том месте, где эта работа или тепло требуются. Такой анализ необходимо проводить с учетом особенностей нетрадиционных возобновляемых источников энергии.

Солнечное излучение представляет собой энергию фотонов, которые при столкновении с каким либо веществом увеличивают амплитуду колебательного движения атомов и других элементарных частиц этого вещества, и нагревают вещество или приводят его атомы в возбужденное (более энергетическое) состояние. Таким образом, энергия солнечного излучения наиболее легко проявляется в виде тепла или может преобразовываться в полупроводниках в электроэнергию[4]. Заметим, что энергия солнечного излучения может преобразовываться в электроэнергию и традиционным способом посредством паровой или тепловой машины и генератора.

Энергия ветра является кинетической энергией движущейся массы воздуха. В ветроустановках кинетическая энергия прямолинейного движения воздуха преобразуется в кинетическую энергию вращательного движения ветроколеса. В этой связи, энергия ветра может использоваться для производства механической работы или преобразовываться в электроэнергию посредством ветроколеса и генератора.

Энергия биомассы является преобразованной энергией солнечного излучения в процессе фотосинтеза и освобождается при горении биотоплива в виде тепла. Исходя из этого, биотопливо может применяться для производства тепла и производства электроэнергии. В последнем

[4] Энергия солнечного излучения может также проявляться в виде фотосинтеза растений, увеличивая их зеленую массу.

случае тепло, выделяемое в процессе горения биотоплива, приводит в действие тепловую машину, которая в свою очередь вращает генератор. Отметим, что тепловая машина на биотопливе может использоваться и для производства механической работы.

Гидроэнергия рек, энергия приливов и океанских волн являются кинетической энергией движущейся воды. То есть, эти виды энергии принципиально не отличается от энергии ветра, и могут использоваться либо для механической работы, либо для производства электроэнергии. Отметим только, что энергию океанических волн (в случае ее применения) не имеет смысла использовать для производства механической работы из-за практического отсутствия потребности в такой работе в океане.

Геотермальная энергия в доступном виде (то есть, паротермальная энергия и гидротермальная энергия) проявляется в виде низкотемпературного тепла, поэтому ее целесообразно использовать для теплоснабжения. Производство электроэнергии на ее основе из-за низкого потенциала тепла будет достаточно сложно, дорого и неэффективно.

После определения способов применения возобновляемых источников энергии полезно определить место их использования.

В настоящее время традиционные источники энергии используются либо в составе крупных энергетических систем, либо автономно. Основная роль принадлежит системному использованию. Это объясняется высокой плотностью энергии традиционных источников в природных месторождениях и относительно не дорогой доставкой ископаемого топлива к местам производства энергии нужного вида (чаще всего – электроэнергии). Произведенная на основе ископаемого топлива электроэнергия затем легко транспортируется к местам ее потребления.

В автономном виде энергия ископаемого топлива и продуктов его переработки используется на транспорте и для небольших удаленных потребителей.

Таким образом, традиционная энергетика породила систему электроснабжения, в которой источниками энергии являются крупные электростанции.

Нетрадиционная энергетика на ВИЭ располагает, в основном, рассредоточенными источниками энергии малой плотности. В этой связи ее применение наиболее эффективно в автономных энергосистемах небольшой мощности, то есть, для автономного энергоснабжения небольших объектов.

Для энергоснабжения мощных потребителей энергии преобразователи ВИЭ должны быть связаны между собой сетью сбора и транспортировки энергии, в качестве которых, как отмечалось выше, используются линии электропередачи. При этом в переходный период развития нетрадиционной энергетики электростанции на возобновляемых источниках энергии будут включаться на параллельную работу с электростанциями на традиционных источниках энергии.

Такое использование ВИЭ уже имеет немалый опыт на примере работы гидроэлектростанций. Электростанции на возобновляемых источниках энергии в этом случае (в переходной период) используются в качестве разгрузочных или дублирующих.

При определении перспектив полной замены традиционных источников энергии на возобновляемые источники следует помнить о малой плотности мощности последних. Очевидно, не удастся собирать рассредоточенную энергии ВИЭ до концентраций, соизмеримых с существующими традиционными электростанциями. В этом плане будущее энергетики на нетрадиционных источниках представляется не в виде глобальных энергетических систем с мощными узлами электростанций, а в виде

автономных энергетических комплексов гораздо меньшей мощности (хотя и заметно больше современных автономных электростанций). Эти комплексы будут располагаться на достаточно обширной территории с узлами местной концентрации энергии, и снабжать энергией компактно расположенные мощные потребители энергии. Учитывая относительно высокую неуправляемость энергии возобновляемых источников, в автономных комплексах большую роль будут играть аккумуляторы энергии.

Вынужденный отказ от системной энергетики при использовании нетрадиционных источников имеет и рад преимуществ. Так устранится потребность в сверх длинных линиях электропередач, что сократит потребность в цветных металлах. Расширятся возможности использования электроэнергии постоянного тока, так как электроэнергию надо будет передавать на гораздо меньшие расстояния. Это приведет к более широкому использованию электродвигателей постоянного тока, которые более приспосабливаемы к технологическим требованиям. Уменьшение расстояний передачи энергии до границ автономных комплексов сократит потери энергии при транспортировке, а значит, уменьшится и влияние на тепловой баланс атмосферы Земли.

Однако низкая плотность возобновляемых источников энергии не позволит полностью перейти на нетрадиционные источники энергии. В структуре энергетических источников к концу этого столетия возобновляемые источники энергии будут все же составлять не более 40%, причем основная доля будет приходиться на солнечные электростанции, гидроэлектростанции и на солнечные нагревательные установки. При этом средняя единичная мощность гидроэлектростанций будет превосходить солнечные энергетические установки, хотя общая мощность ГЭС будет уступать солнечным электростанциям.

Может в несколько раз увеличиться использование биотоплива, особенно для транспорта и небольших потребителей.

Ветроэлектростанции по сравнению с другими энергоустановками на ВИЭ вначале будут еще удерживать свое первенство в энергосистемах, но затем, видимо, уступят солнечным и биоэнергетическим установкам.

Вопросы для самоконтроля

1. С какими основными проблемами столкнулась традиционная энергетика?
2. При каком увеличении температуры предполагается изменение границ климатических зон?
3. При каком увеличении температуры предполагается таяние полярных льдов?
4. Какие газы вызывают парниковый эффект?
5. Какое количество теплоты выделяются в атмосферу искусственно?
6. Как на экологию может повлиять локальное увеличение температуры в промышленных районах?
7. Какое влияние на экологию может оказать широкомасштабное применение возобновляемых источников?
8. С какими экономическими препятствиями пришлось бы столкнуться при использовании для отопления только солнечных гелионагревателей?
9. Какую долю в будущей энергетике могут составлять возобновляемые источники энергии?
10. Почему солнечная энергия и ветер предпочтительнее использовать в автономных системах энергоснабжения малой мощности?

Задания
для закрепления материала

1. Проследите по Интернету за температурой воздуха в Вашем областном центре и крупных городах, и в малых населенных пунктах .
2. Узнайте, какая скорость течения на ближайших реках.
3. Если у Вас частное подворье, то оцените, смогли бы Вы установить на его территории ветроэлектростанцию.
4. Смогли бы Вы установить у себя гелионагреватель? Солнечную электростанцию?
5. Как Вы считаете, какие бы энергетические процессы в Вашем доме можно бы было перевести на Возобновляемые источники энергии.

Лекция 3. **Преобразования солнечной энергии в тепло**

3.1. Энергетические характеристики солнечного излучения

Солнечная энергия обусловлена термоядерными процессами внутри ядра Солнца, которое вследствие этого, имеет температуру порядка 10^7К. Поток тепла от ядра Солнца достигает его поверхности и поглощается неактивными (в смысле производства тепла) внешними слоями. Поверхность Солнца нагревается до температуры примерно 5800 К и имеет относительно непрерывное спектральное излучение, подобное излучению абсолютно черного тела (рисунок 3.1).

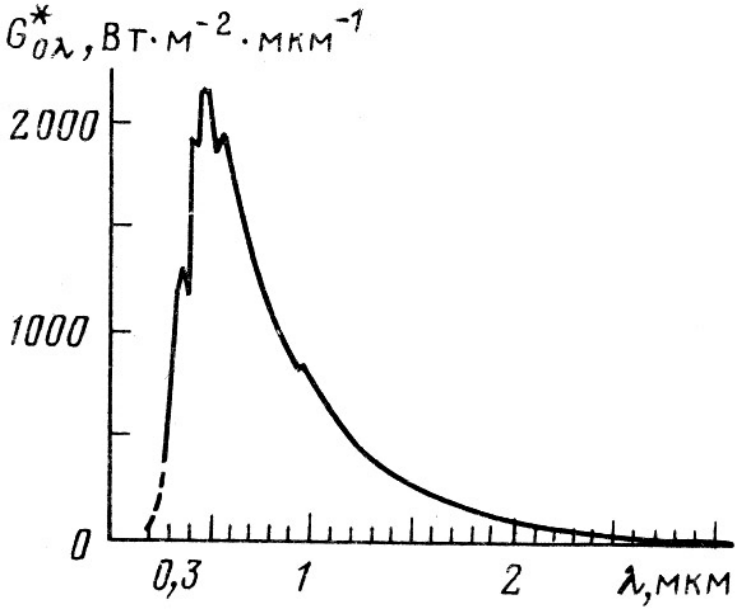


Рисунок 3.1. Спектральное распределение солнечного излучения вне атмосферы Земли

Площадь, ограниченная этой кривой, равна солнечной постоянной G_C = 1353 Вт/м^2. Солнечная постоянная представляет собой плотность потока солнечного излучения (или интенсивность солнечного излучения) над атмосферой Земли на расстоянии $1{,}496 \cdot 10^8$ км от Солнца (среднее расстояние между Землей и Солнцем).

В строгом понимании солнечная постоянная не является постоянной и изменяется на ±1,5% из-за малой эллиптичности орбиты Земли вокруг Солнца (±4%).

Спектр солнечного излучения соответствует спектру излучения абсолютно черного тела с температурой приблизительно 5800 К, и его можно разделить на три основные области:

- ультрафиолетовое излучение ($\lambda < 0{,}4$ мкм) – 9%;
- видимое излучение ($0{,}4$ мкм $< \lambda < 0{,}7$ мкм) – 45%;
- инфракрасное излучение ($\lambda > 0{,}7$ мкм) – 46%.

Проходя через атмосферу, солнечное излучение частично поглощается и рассеивается, и на поверхности Земли имеет меньшую интенсивность. Интенсивность солнечного излучения имеет сезонный характер и изменяется в течение суток. Параметры солнечного излучения, попадающего на земную поверхность, регистрируются метеостанциями в течение многих лет. Однако данные метеостанций являются усредненными, и текущие значения заметно отличаются от средних значений.

Текущие значения интенсивности солнечного излучения и продолжительности их действия зависят от широты местности, климатической зоны, времени года и суток, и других факторов. В силу этого они носят случайный характер.

Интенсивность солнечного излучения зависит от взаимной ориентации Солнца и солнечного коллектора (рисунок 3.2). На рисунке 3.2 азимутальный угол Солнца равен нулю, то есть Солнце по отношению к наблюдателю, находящемуся в северном полушарии, расположено строго на юге.

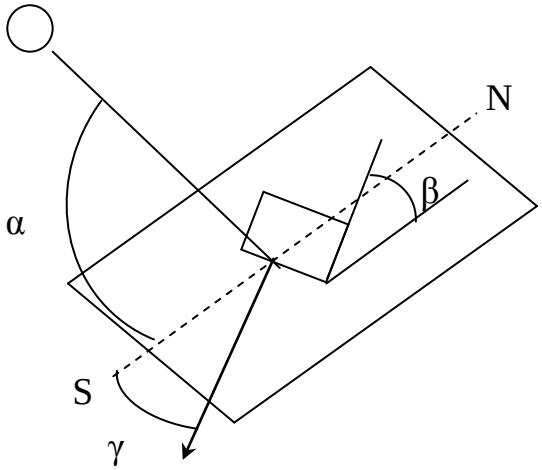


Рисунок 3.2. Параметры ориентации
солнечного коллектора в северном полушарии Земли

α – угол солнцестояния, β – угол наклона коллектора, γ – азимутальный угол коллектора, γ_C – азимутальный угол Солнца.

На рисунках 3.3 – 3.6 в качестве примера показаны среднестатистические графики солнечного излучения, достигающего поверхности Земли на широте Ростовской области.

Это среднестатистические данные метеостанций, то есть, строго говоря, графики изменения математического ожидания интенсивности солнечного излучения в течение суток по сезонам года. Для определения параметров нагревательных солнечных систем и солнечных электростанций необходимо иметь график гарантированной интенсивности солнечного излучения.

Так как солнечное излучение является случайной величиной, то более корректно говорить об интенсивности солнечного излучения, гарантированной с какой-то, заранее заданной, вероятностью. Такая вероятность интенсивности солнечного излучения соответствует вероятности попадания случайной величины в заданный интервал, и может быть определена следующим образом:

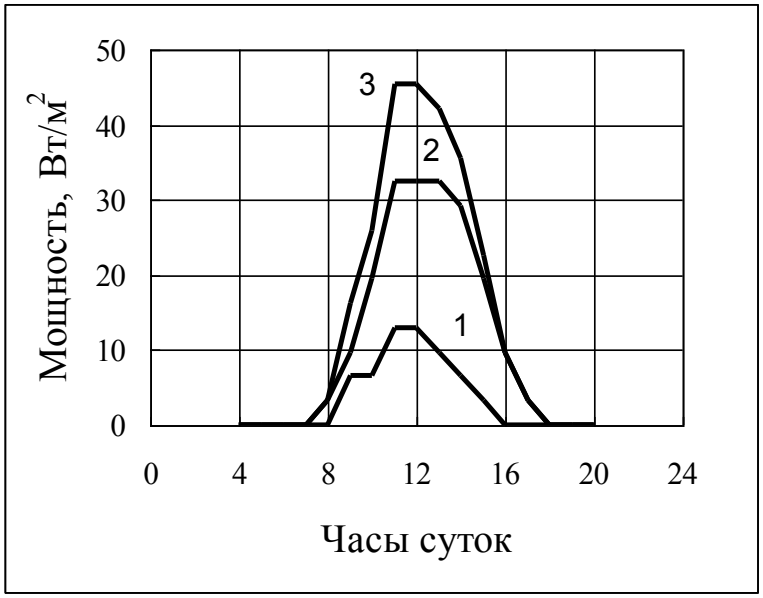


Рисунок 3.3. Поток солнечного излучения в январе

1 – прямое излучение; 2 – рассеянное излучение; 3 – суммарное излучение

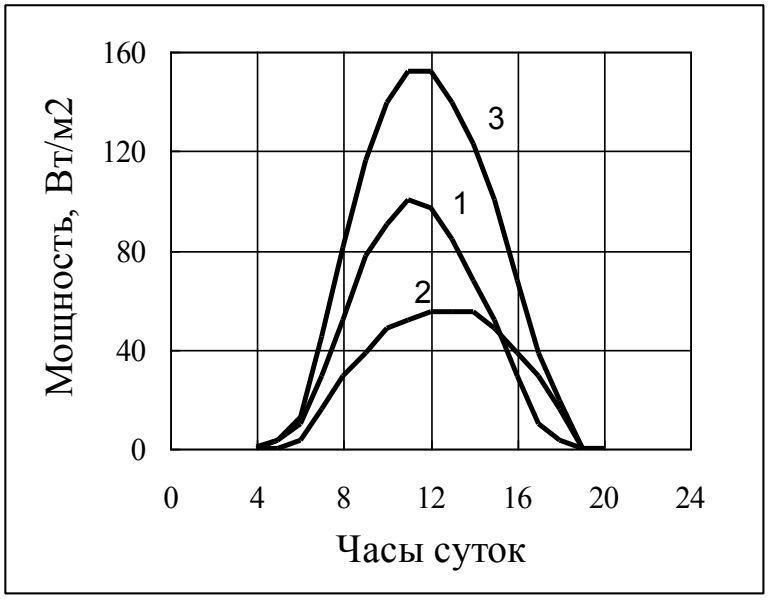


Рисунок 3.4. Поток солнечного излучения в апреле

1 – прямое излучение; 2 – рассеянное излучение; 3 – суммарное излучение

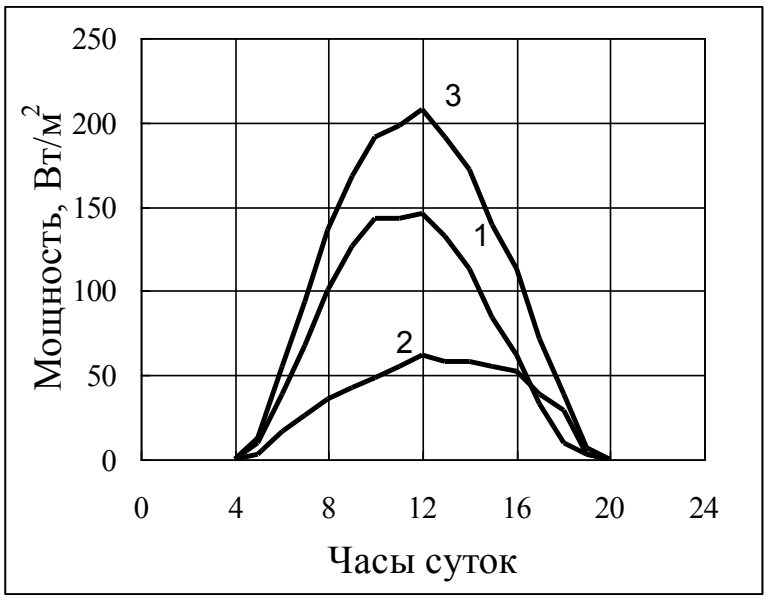


Рисунок 3.5. Поток солнечного излучения в июле

1 – прямое излучение; 2 – рассеянное излучение; 3 – суммарное излучение

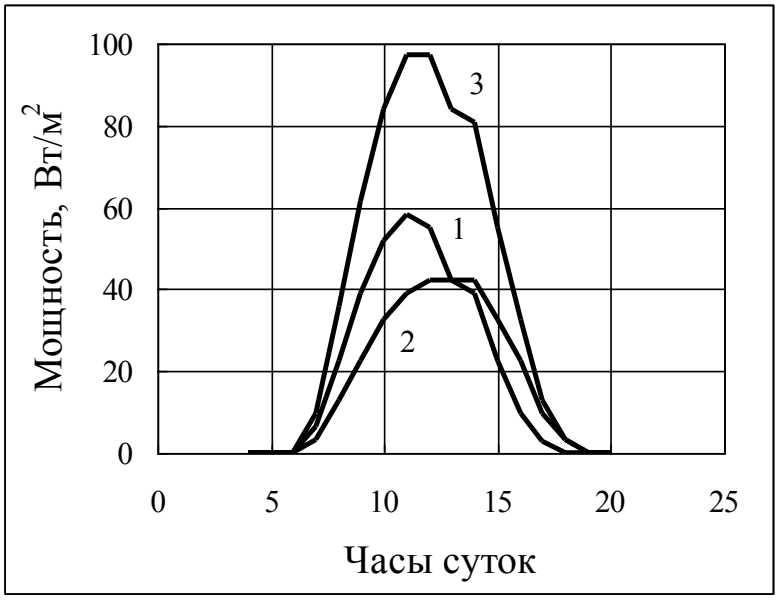


Рисунок 3.6. Поток солнечного излучения в октябре

1 – прямое излучение; 2 – рассеянное излучение; 3 – суммарное излучение

$$P(N_X \le N \le N_{max}) = \int_{N_X}^{N_{max}} N(t)\,dt \qquad (3.1)$$

где $P(N_X \le N \le N_{max})$ – вероятность того, что интенсивность солнечного излучения будет находиться в интервале $N_X ... N_{max}$;

N_X – гарантированная интенсивность солнечного излучения, Вт/м^2;

N_{max} – максимально возможная интенсивность солнечного излучения в данной местности, Вт/м^2.

Если интенсивность солнечного излучения распределена по нормальному закону, что, например, имеет место на территории Ростовской области, то искомую вероятность можно определить, используя функцию Лапласа:

$$P(N_X \le N \le N_{max}) = \Phi\left[\frac{N_{max} - \overline{N}}{\sigma_C}\right] - \Phi\left[\frac{N_X - \overline{N}}{\sigma_C}\right] \qquad (3.2)$$

где $\overline{N}$ – математическое ожидание интенсивности солнечного излучения (данные метеостанций), Вт/м^2;

σ_C – стандартное отклонение интенсивности солнечного излучения, Вт/м^2.

Стандартное отклонение интенсивности солнечного излучения для любого момента времени можно определить из условия симметрии нормального распределения:

$$0{,}5 = \Phi\left[\frac{\overline{N}}{\sigma_C}\right] \qquad (3.3)$$

На рисунке 3.7 в качестве примера приведены гарантированные графики интенсивности солнечного излучения, полученные на основании метеоданных по Ростовской области для июля. Эти графики описывают плотность солнечного излучения на следящую площадку.

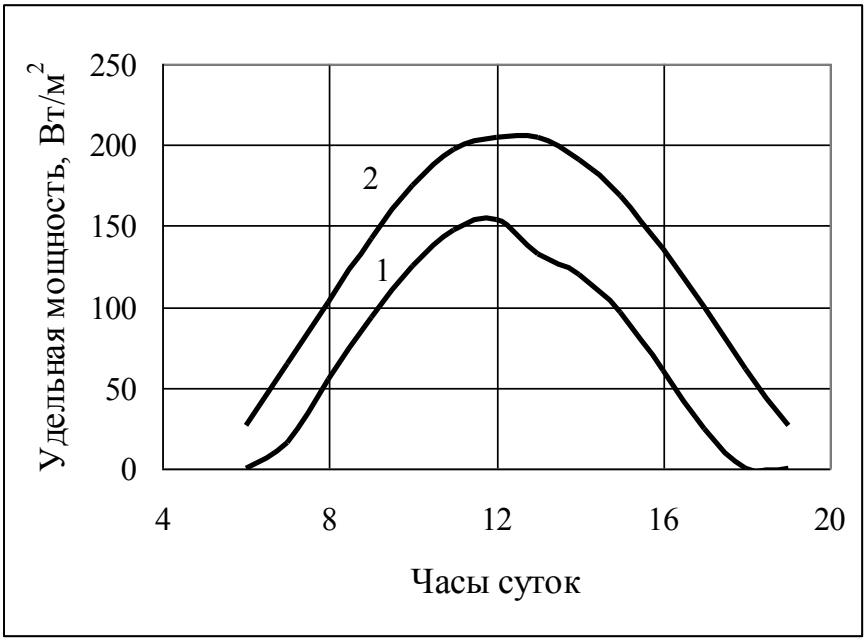


Рисунок 3.7. Графики
гарантированного солнечного излучения
1 – вероятность 0,9, 2 – вероятность 0,5.

Аналогичные графики для всех месяцев, имеющие место на территории России, можно получить на основе метеорологических данных.

3.2. Физические основы процесса преобразования энергии солнечного излучения в тепло

Принцип получения тепла очень простой – лучистая энергия солнечного излучения поглощается веществом и переходит в кинетическую

энергию атомов вещества, которые при увеличении колебаний увеличивают свою температуру. Теплоту от нагретого тела можно передавать различными способами менее нагретому телу.

Процесс нагрева поясняется рисунком 3.8.

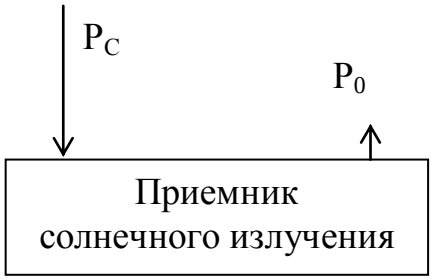


Рисунок 3.8. Процесс нагрева

Поток лучистой энергии, поглощаемой каким либо приемником солнечного излучения, равен /2, 3, 8, 9/:

$$P_C = \alpha_{ПР} F_{ПР} G_{ПР} \qquad (3.4)$$

где P_C – поток лучистой энергии, поглощаемый приемником солнечного излучения, Вт;

$\alpha_{ПР}$ – коэффициент поглощения поверхностью приемника солнечного излучения;

$F_{ПР}$ – площадь освещаемой поверхности, $м^2$;

$N_{ПР}$ – интенсивность солнечного излучения на приемник, $Вт/м^2$.

Приемник солнечного излучения, нагреваясь до температуры, превышающей температуру окружающей среды, сам начинает отдавать тепло в окружающую среду. Поток отдачи тепла определяется по формуле /9/:

$$P_0 = (T_{ПР} - T_{ОС})F_{ПР}\beta_{ПР} = \frac{T_{ПР} - T_{ОС}}{R_t} \qquad (3.5)$$

Здесь $T_{ПР}$ – температура поверхности приемника, К;

$T_{ОС}$ – температура окружающей среды, К;

$\beta_{ПР}$ – коэффициент теплоотдачи, Вт/К·м^2;

R_t – термическое сопротивление, К·с/Дж.

Результирующий поток тепла равен геометрической сумме потока лучистой энергии от Солнца и потока теплоотдачи в окружающую среду:

$$P_{\Sigma} = \alpha_{ПР}F_{ПР}N_{ПР} - \frac{T_{ПР} - T_{ОС}}{R_t} = \eta_{СИ}F_{ПР}N_{ПР} \qquad (3.6)$$

где $\eta_{СИ}$ – коэффициент захвата солнечного излучения.

Как следует из (3.5) для более полного использования энергии солнечного излучения для нагрева приемника необходимо увеличивать коэффициент захвата солнечного излучения, то есть, увеличивать коэффициент поглощения солнечного излучения приемника и его термическое сопротивление. Последнее эквивалентно уменьшению коэффициента теплоотдачи. Эти условия учитываются при создании солнечных коллекторов – нагревательных устройств.

3.3. Солнечные коллекторы. Типы, принципы действия и методы расчета

Солнечные системы отопления могут быть пассивными и активными. Пассивными называются системы солнечного отопления, в которых в качестве элемента, воспринимающего солнечную радиацию и преобразующего ее в теплоту, служат само здание или его отдельные ограждения (здание-коллектор, стена-коллектор, кровля-коллектор и т. п. (рисунок 3.9)

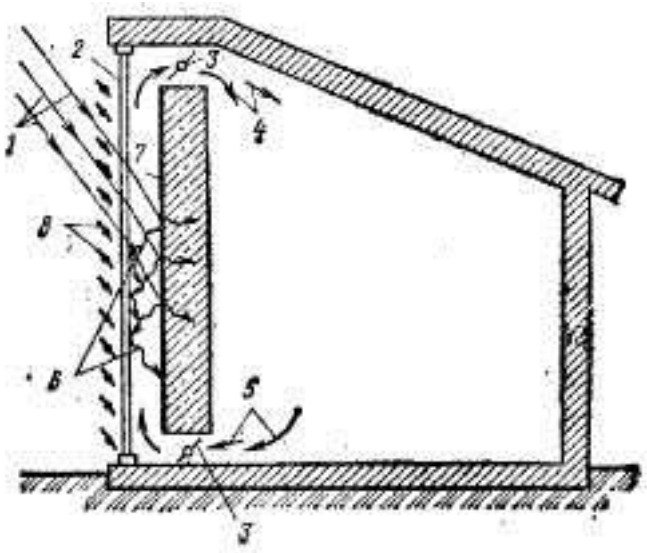


Рисунок 3.9. Пассивная низкотемпературная система солнечного отопления "стена-коллектор".

1 - солнечные лучи; 2 - лучепрозрачный экран; 3 - воздушная заслонка; 4 - нагретый воздух; 5 - охлажденный воздух из помещения; 6 - собственное длинноволновое тепловое излучение стены; 7 -черная лучевоспринимающая поверхность стены; 8 - жалюзи.

Активные солнечные системы имеют нагреватель, воспринимающий энергию солнечного излучения и отдающий тепло нагреваемым элементам. В качестве нагревателя может использоваться любой материал, а сам нагреватель может быть любой конструкции. Но от этих параметров зависит эффективность всей системы получения тепла, поэтому

остановимся более подробно на солнечных коллекторах, устройствах воспринимающих энергию солнечного излучения и преобразующих эту энергию в тепло.

Солнечный коллектор состоит из приемной панели, поглощающей поток солнечного излучения и передающей тепло теплоносителю (жидкости или газу), и сервисной сети (трубопроводы, перекачивающие насосы и т.п.). Для повышения эффективности приемная панель теплоизолирована со всех сторон, при этом сторона, обращенная к солнцу, закрывается прозрачным селективным покрытием (рисунок 3.10)

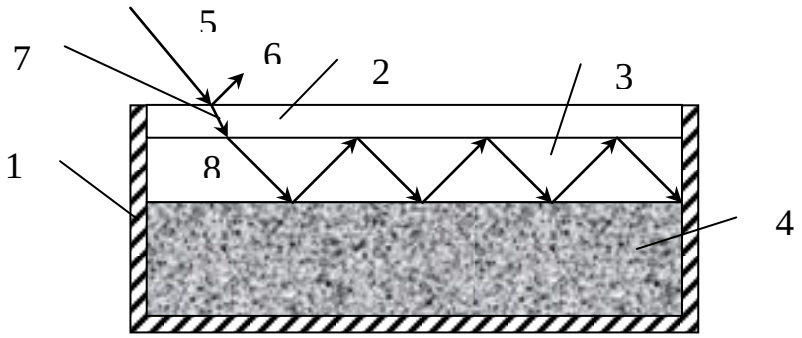


Рисунок 3.10. Схема солнечного коллектора
с селективным покрытием

1 – теплоизоляционный корпус, 2 – селективное покрытие, 3 – воздушный промежуток, 4 – приемная панель, 5 – падающий луч света, 6 – отраженный луч, 7 – преломленный луч, 8 – ход света между приемной панелью и селективным покрытием.

Селективное покрытие пропускает бóльшую часть спектра и отражает инфракрасные лучи. Прошедший через селективное покрытие свет, отражается от теплопоглотителя в виде инфракрасных лучей, которые в свою очередь отражаются от внутренней стороны селективного покры-

тия и обратно попадают на теплопоглотитель. Таким образом, значительно снижаются потери тепла посредством отражения.

Полезная мощность, отводимая с единицы площади коллектора, определяется следующим образом /1, 5, 6, 9/:

$$N_К = N_{ПР} k_{ОПТ} k_Т - \Delta P_0 \qquad (3.7)$$

где $N_К$ – удельная полезная мощность, Вт/м^2;

$k_{ОПТ}$ – оптический к.п.д. коллектора;

$k_Т$ – коэффициент эффективности приемной панели, равный отношению теплоты, переданной теплоносителю, к поглощенной теплоте;

ΔN – плотность тепловых потерь солнечного коллектора, Вт/м^2.

Оптический к.п.д. равен:

$$k_{ОПТ} = \mu_{СП}\, \alpha_{ПР} \qquad (3.8)$$

где $\mu_{СП}$ – пропускная способность селективного покрытия;

В современных солнечных коллекторах оптический к.п.д. близок к единице. Коэффициент эффективности приемной панели в настоящее время превышает 0,9. Таким образом, современные солнечные коллекторы в отношении теплоприемной способности практически достигли совершенства, и дальнейшее повышение их эффективности в этом направлении продвигается медленно.

Как уже отмечалось, при нагревании солнечного коллектора температура его поверхности повышается и превышает температуру окружающей среды. Это приводит к тому, что нагретый коллектор начинает

отдавать тепло в окружающую среду. Поток отдачи тепла с единицы поверхности коллектора с учетом селективного покрытия определяется по формуле:

$$\Delta N = k_T k_{СП}(T_{ПР} - T_{ОС}) \qquad (3.9)$$

где k_T – суммарный коэффициент тепловых потерь, Вт/м^{2}град.

Анализируя (3.9), можно сделать вывод о необходимости снижать коэффициент конвективного обмена с окружающей средой и снижения черноты поверхности. Это достигается путем улучшения теплоизоляции, применения двойного остекления, помещения коллектора в место, защищенное от ветра, путем применения зеркального покрытия корпуса (кроме приемной стороны) и селективностью приемной стороны.

Кроме того, из (3.9) следует, что с увеличением разности температуры коллектора и температуры окружающей среды тепловые потери возрастают, следовательно, к.п.д. падает.

Мощность, необходимая для нагрева теплоносителя, например, прокачиваемой жидкости, определяется подачей этой жидкости, ее теплоемкостью и требуемой температурой нагрева /8/:

$$N_П = g\, c_P\, (T_2 - T_1) \qquad (3.10)$$

где $N_П$ – полезная мощность нагрева, Вт/м^2;

g – подача теплоносителя, кг/м^{2}с;

c_P – удельная теплоемкость жидкости при постоянном давлении, Дж/кг. град.;

T_2 – температура жидкости на выходе, К;

T_1 – температура жидкости на входе, К.

Как следует из уравнения баланса мощности, к.п.д. солнечного коллектора может быть определено следующим образом /8/:

$$\eta_К = \frac{gc_p\Delta T}{N_C} = k_{ОПТ}k_Т - \frac{\Delta P}{N_C} \qquad (3.11)$$

где ΔT – разность температур теплоносителя и окружающей среды, град.

Или с учетом линейного приближения функции тепловых потерь (3.9), получаем /8, 9/:

$$\eta_К = k_Т(\mu_{СП}\,\alpha_{ПР} - k_{СП}\frac{\Delta N}{N_C}) \qquad (3.12)$$

Таким образом, к.п.д. солнечного коллектора тем выше, чем более прозрачно защитное покрытие, большая поглотительная способность и меньше коэффициент теплоотдачи. При увеличении температуры окружающей среды к.п.д. солнечного коллектора так же растет. С увеличением температуры теплоносителя к.п.д. солнечного коллектора уменьшается. Это еще раз подтверждает эффективность использования солнечных нагревателей в теплых климатических зонах, например, в Южном регионе России. При этом солнечные нагреватели могут использоваться для обогрева в весенне-осенний периоды, а в летнее время для получения горячей воды и в холодильных машинах (кондиционерах).

Эффективность солнечного коллектора зависит от его типа. На рисунках 3.11 – 3.13 приведены типы солнечных коллекторов в порядке возрастания эффективности.

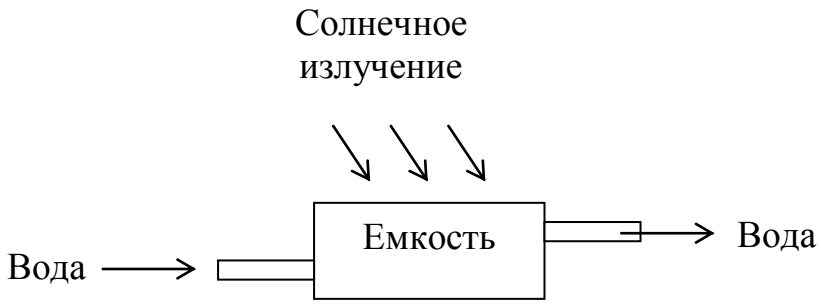


Рисунок 3.11. Металлическая емкость без теплоизоляции

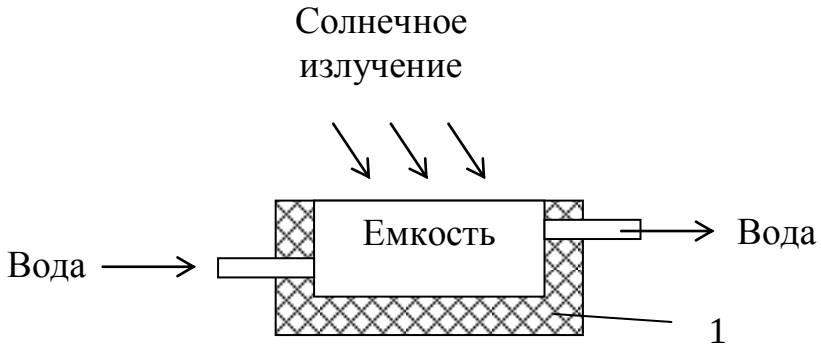


Рисунок 3.12. Металлическая емкость с теплоизоляцией

1 - теплоизоляция

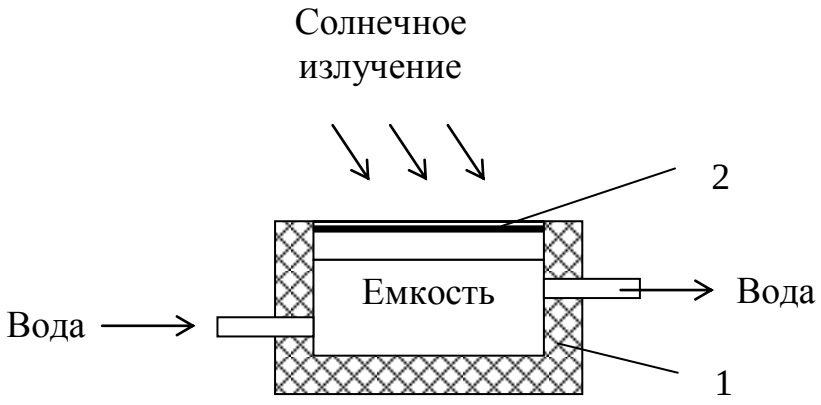


Рисунок 3.13. Металлическая емкость с теплоизоляцией
и селективным покрытием

1 – теплоизоляция, 2 – селективное покрытие

В качестве теплоносителей активных солнечных коллекторов могут применяться различные вещества.

Воздух является широко распространенным незамерзающим во всем диапазоне рабочих параметров теплоносителем. При применении его в качестве теплоносителя возможно совмещение систем отопления с системой вентиляции. Однако воздух имеет малую теплоемкость, что ведет к увеличению расхода металла на устройство систем воздушного отопления по сравнению с водяными системами.

Вода является теплоемким и широкодоступным теплоносителем. Однако при температурах ниже 0°С в нее необходимо добавлять незамерзающие жидкости. Кроме того, нужно учитывать, что вода, насыщенная кислородом, вызывает коррозию трубопроводов и аппаратов. Но расход металла в водяных солнечных коллекторах значительно ниже, чем в воздушных, что способствует более широкому их применению.

3.4. Оптимизация параметров ориентации солнечных коллекторов

Солнечные нагревательные установки с теплоизоляцией и селективным покрытием позволяют получить температуру теплоносителя (обычно воды) порядка 80 – 100°С без применения концентраторов солнечного излучения. Такой температуры достаточно для теплоснабжения и горячего водоснабжения. Однако солнечные коллекторы для максимального получения энергии солнечного излучения должны быть ориентированы должным образом. При этом следует учитывать, что прозрачность атмосферы, определяющая интенсивность прямого солнечного излучения изменяется в течение суток и года. Так, например, на территории Ростовской области по статистике в первой половине светового дня атмосфера более прозрачна, а во второй половине дня появляется облач-

ность. На основании этого можно предположить, что фиксированные преобразователи должны иметь отрицательный азимутальный угол, то есть, должны быть повернуты в сторону востока на какой-то угол. Изменение азимутального угла повлечет и изменение угла наклона, так как Солнце, не достигнув полуденного положения, будет иметь меньший угол солнцестояния.

Плотность солнечного излучения, поступающего на солнечный коллектор, определяется по формуле /4, 5, 6/:

$$S_К = \Sigma[S_{Пi} \cos\alpha_i \cos(\gamma_{C\,i} - \gamma) \sin\beta + S_{Гi} \cos\beta] \qquad (3.13)$$

где: $S_К$ - суммарная за год плотность солнечного излучения на коллектор с параметрами ориентации γ и β, Вт/м^2;

$S_{Пi}$ - плотность солнечного излучения на перпендикулярную к нему площадку за i-тый промежуток времени, Вт/м^2;

α_i - средний угол солнца над горизонтом в i-тый период времени, град;

γ_{Ci} - средний азимут солнца за i-тый период времени, град.

Метеорологические станции имеют наиболее полную информацию о плотности солнечного излучения на горизонтальную поверхность. Выразим $S_П$ через $S_Г$:

$$S_П = \frac{S_Г}{\sin\alpha} \qquad (3.14)$$

Тогда (3.12) будет иметь вид:

$$S_К = \Sigma S_{Гi}[\mathrm{ctg}\alpha_i \cos(\gamma_{Ci} - \gamma) \sin\beta + \cos\beta] \qquad (3.15)$$

Как следует из (3.15), суммарная годовая плотность солнечного излучения на фиксированный коллектор зависит от двух параметров, γ и β.

Оптимальное значение угла γ определяется из равенства:

$$\frac{dS_K}{d\gamma} = 0, \text{ при } \beta = const \neq 0 \qquad (3.16)$$

Проведя дифференцирование, получаем:

$$\frac{dS_K}{d\gamma} = \sin\beta\left[S_{\Gamma 1}ctg\alpha_1\sin(\gamma_{C1} - \gamma) + \ldots + S_{\Gamma m}ctg\alpha_m\sin(\gamma_{Cm} - \gamma)\right] \qquad (3.17)$$

Воспользуемся тригонометрическим тождеством

$$\sin(\gamma_{Ci} - \gamma) = \sin\gamma_{Ci}\cos\gamma - \cos\gamma_{Ci}\sin\gamma \qquad (3.18)$$

Обозначив $A_i = S_{\Gamma i}ctg\alpha_i$, разделив (3.16) на $\sin\beta \neq 0$ и с учетом (3.18), получаем:

$$A_1\sin\gamma_{C1}\cos\gamma - A_1\cos\gamma_{C1}\sin\gamma + A_m\sin\gamma_{Cm}\cos\gamma - A_m\cos\gamma_{Cm}\sin\gamma = 0 \qquad (3.19)$$

$$tg\gamma = \frac{A_1\sin\gamma_{C1} + A_2\sin\gamma_{C2} + \ldots + A_m\sin\gamma_{Cm}}{A_1\cos\gamma_{C1} + A_2\cos\gamma_{C2} + \ldots + A_m\cos\gamma_{Cm}} \qquad (3.20)$$

Или, проведя обратную подстановку, окончательно получаем:

$$\mathrm{tg}\gamma = \frac{\sum S_{\Gamma i} \mathrm{ctg}\alpha_i \sin\gamma_{Ci}}{\sum S_{\Gamma i} \mathrm{ctg}\alpha_i \cos\gamma_{Ci}} \qquad (3.21)$$

Как следует из (3.21), оптимальный азимутный угол ориентации солнечного коллектора не зависит от угла его наклона к горизонту.

$$\gamma_{ОПТ} = \mathrm{arctg}\frac{\sum S_{\Gamma i} \mathrm{ctg}\alpha_i \sin\gamma_{Ci}}{\sum S_{\Gamma i} \mathrm{ctg}\alpha_i \cos\gamma_{Ci}} \qquad (3.22)$$

Оптимальный угол β определяется при $\gamma = \gamma_{ОПТ}$ из условия:

$$\frac{dS_К}{d\beta} = 0 \qquad (3.23)$$

Выполнив дифференцирование, получаем:

$$\frac{dS_К}{d\beta} = \cos\beta \sum \left[S_{\Gamma i} \mathrm{ctg}\alpha_i \cos(\gamma_{Ci} - \gamma_{ОПТ})\right] - \sin\beta \sum S_{\Gamma i} = 0 \qquad (3.24)$$

$$\mathrm{tg}\beta = \frac{\sum \left[S_{\Gamma i} \mathrm{ctg}\alpha_i \cos(\gamma_{Ci} - \gamma_{ОПТ})\right]}{\sum S_{\Gamma i}}\ ; \qquad (3.25)$$

$$\beta_{опт} = \mathrm{arctg}\frac{\sum \left[S_{\Gamma i} \mathrm{ctg}\alpha_i \cos(\gamma_{Ci} - \gamma_{ОПТ})\right]}{\sum S_{\Gamma i}} \qquad (3.26)$$

Анализируя (3.26), замечаем, что оптимальный угол наклона солнечного коллектора к горизонту зависит от его азимутального угла $\gamma_{ОПТ}$. Отсюда последовательность оптимизации параметров ориентации солнечного коллектора должна быть следующей:

- вычисляется оптимальный азимутальный угол солнечного коллектора по формуле (3.22);
- вычисляется оптимальный угол наклона солнечного коллектора по формуле (3.26) при фиксированном оптимальном азимутальном угле.

В таблице 3.1 в качестве примера приведены расчетные и рекомендуемые на территории Ростовской области параметры ориентации фиксированных батарей фотоэлектрических преобразователей.

Таблица 3.1

Параметры ориентации

фиксированной батареи фотоэлектрических преобразователей

Месяц	Азимутальный угол, град.	Угол наклона к горизонту, град.
Январь	– 0,3	70,4
Февраль	– 0,3	62,9
Март	– 1,3	51,8
Апрель	– 18,5	40,6
Май	– 16,4	31,1
Июнь	– 11,7	27,2
Июль	– 14,3	28,4
Август	– 15,6	35,7
Сентябрь	– 20,7	47,3
Октябрь	– 5,6	57,8
Ноябрь	– 8,5	67,5
Декабрь	– 17,6	71,8

3.5. Аккумулирование тепла

Аккумулирование тепловой энергии основано на нагреве какого-либо тела. Если тело нагрето до какой-то температуры, то оно при соприкосновении с другим телом или окружающей средой с меньшей температурой передаст ему некоторое количество тепла.

Количество тепла, запасенное телом, которое может быть в последующем отдано окружающей среде или другому телу, определяется по формуле /1, 3/:

$$Q = cm(T_T - T_{OC}) \qquad (3.27)$$

где: Q – количество тепла, Дж;

c – теплоемкость аккумулятора тепла, Дж/град.кг;

m – масса аккумулятора тепла, кг;

T_T – температура аккумулятора тепла, К.

Анализируя формулу (3.27), видно, что для повышения емкости теплового аккумулятора необходимо применять тела с большой теплоемкостью и большой массы. Кроме того, можно предположить эффективность нагревания аккумулятора тепла до максимально возможной температуры.

Однако особенностью теплового аккумулятора в виде нагретого тела является то, что после прекращения подвода тепловой энергии суммарный тепловой поток становится равен потоку теплоотдачи в окружающую среду. То есть, аккумулированное тепло должно расходоваться сразу после прекращения процесса накопления. Рассмотрим, в течение какого времени после отключения от источника тепловой энергии

аккумулятор полностью расходует запасенное тепло, то есть, достигнет температуры окружающей среды.

Тепловой баланс аккумулятора описывается следующим дифференциальным уравнением /8, 9/:

$$cm\frac{dT_T}{dt} = \frac{T_T - T_{OC}}{R_t} \qquad (3.28)$$

Разделяя переменные и интегрируя, получаем:

$$t = cmR\ \ln(\Delta T) \qquad (3.29)$$

где ΔT – превышение температуры аккумулятора над температурой окружающей среды.

На рисунке 3.14 показан график изменения времени разряда теплового аккумулятора в зависимости от ΔT при cmR = 5000 с.

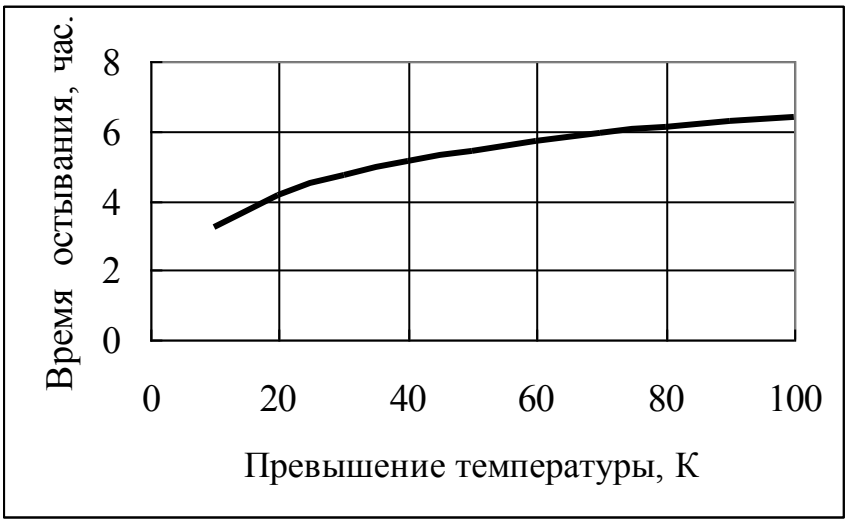


Рисунок 3.14. Функция времени остывания теплового аккумулятора

Как следует из графика, время остывания теплового аккумулятора изменяется по экспоненте и при увеличении ΔТ более 100 градусов увеличивается незначительно. Отсюда следует, что тепловые аккумуляторы целесообразно применять в низкотемпературных системах теплоснабжения или горячего водоснабжения, с превышением температуры над окружающей средой не более 80К. Солнечные нагревательные установки способны создавать такую разность температур.

Значительно увеличить время остывания теплового аккумулятора можно путем создания фазовых превращений нагреваемых тел. Если в процессе нагревания и охлаждения происходят фазовые превращения аккумулятора тепла, например, его плавление, то количество теплоты определяется следующим образом:

$$Q = cm(T_T - T_{OC}) + m\lambda \qquad (3.30)$$

Здесь λ – удельная теплота плавления плавления, Дж/кг.

Если нагреть теплонакопитель до температуры фазового перехода, например, твердое вещество до температуры его плавления, то подводимое тепло будет идти на его фазовое превращение (плавление). При этом температура теплонакопителя не будет увеличиваться вплоть до полного его расплавления. После прекращения нагрева теплонакопитель начнет возвращаться в исходное твердое состояние без изменения температуры вплоть до полного затвердевания. И только после этого тепло будет расходоваться во внешнюю среду.

Это свойство можно использовать для задержки времени остывания теплового аккумулятора, однако при этом надо учитывать, что потребуется подвести больше тепловой энергии на величину, необходимую для плавления теплонакопителя. Вместе с тем, если аккумулированное тепло необходи-

мо сразу после отключения источника энергии, то от аккумулятора с фазовым превращением можно получать больше тепла и в течение более длительного периода времени.

При использовании фазовых превращений появляются две противоречивые потребности – необходимо запасти как можно больше тепловой энергии при как можно меньших температурах фазового перехода.

Большинство химически чистых веществ не требуют большой энергии для фазового перехода, хотя некоторые, например, литий, требуют значительного количества теплоты для кипения. Но температура кипения лития равна 1315^{o}C. Ясно, что это сильно ограничивает область его применения в качестве аккумулятора тепла, так как при высоких температурах очень трудно обеспечить необходимую теплоизоляцию.

Однако существует категория веществ, которые удовлетворяют обоим требованиям. Такие вещества называются гидратами. В таблице 3.2 приводятся свойства наиболее подходящих гидратов для накопления тепла в системах солнечного нагрева /8/.

Таблица 3.2

Характеристики гидратов для тепловых аккумуляторов

Гидрат	Температура плавления, ^{o}C	Теплота плавления, Дж/кг
$Na_2SO_4 + 10H_2O$	18	186
$Al_2(SO_4)_3 + 12H_2O$	88	260
$NaC_2H_3O_2 + 3H_2O$	58	264
$LiNO_3 + 3H_2O$	30	306

Недостатками теплого аккумулятора с фазовыми превращениями является то, что при переходе из одного фазового состояния в другое изменяется объем вещества, что приводит к разрыву корпуса или к пропаданию теплового контакта. В этой связи солнечные теплоаккумулирующие коллекторы

необходимо выполнять из эластичных материалов, но одновременно с большой теплопроводностью. Это может быть обеспечено путем армирования, например, резины, но высоких теплопроводностей все же пока получить не удается.

Вопросы для самоконтроля

1. Чему равна солнечная постоянная?
2. На какие основные области можно разделить спектр солнечного излучения?
3. Что такое гарантированное солнечное излучение?
4. Что называется солнечным коллектором?
5. Чем отличается пассивная система солнечного отопления от активной?
6. Какими способами добиваются повышения эффективности солнечного коллектора?
7. По какому критерию проводится оптимизация ориентации солнечного коллектора?
8. Какими параметрами определяется аккумулятор тепла?
9. Как изменяется температура теплового аккумулятора с фазовым переходом?
10. Что такое к.п.д. аккумулятора?

Задания для закрепления материала

1. Проведите наблюдения за прозрачностью атмосферы в Вашей местности.
2. Определите, какие качественные отклонения от классических будут иметь параметры ориентации солнечного коллектора в Вашей местности.

3. Поместите кусочек льда в среду с комнатной температурой и измеряйте его температуру во время плавления и далее. Сделайте выводы.
4. Заметьте, за какое время температура вскипяченной воды (не менее 1 литра) достигнет температуры окружающей среды.
5. Рассчитайте теплоту отданную вскипяченной водой.

Лекция 4. **Солнечные электростанции**

4.1. Тепловые солнечные электростанции

Солнечные тепловые электростанции в простейшей интерпретации представляют собой электростанцию с паровой машиной, котел которой нагревается за счет сфокусированного солнечного излучения.

Сфокусированное солнечное излучение позволяет получать достаточно высокие для работы паровой машины температуры (до 700^{o}C). При этом можно получать и достаточно высокий к.п.д.

Еще более лучших показателей можно достичь, используя тепловые машины внешнего сгорания (двигатели Стирлинга). Такое применение диктуется расположением источника тепла (солнечного излучения) вне камеры сгорания. Кроме того, термический к.п.д. двигателя Стирлинга равен к.п.д. цикла Карно. Еще одним достоинством двигателя внешнего сгорания является малый шум при работе.

Цикл Стирлинга (рисунок 4.1) включает изотермическое сжатие (1 – 2), изохорный подвод теплоты (2 – 3), изотермическое расширение (3 – 4) и изохорный процесс (4 – 1), замыкающий цикл.

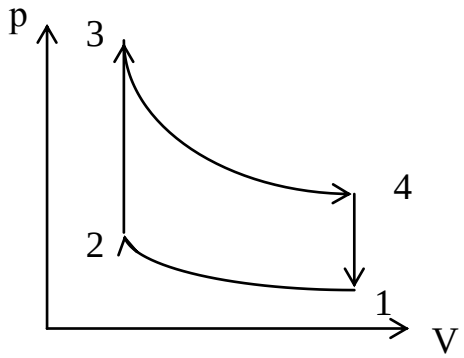


Рисунок 4.1. Цикл Стирлинга

Термический к.п.д. цикла Стирлинга равен отношению совершенной в цикле полезной работе к количеству теплоты, затраченной на производство этой работы. В цикле Стирлинга теплота подводится в процессах 2 – 3 и 3 – 4, а отбирается в процессах 4 – 1 и 1 – 2. Количество теплоты, выделяемое в двигателе при сжатии газа, поглощается газом при расширении, следовательно, этот теплообмен является внутренним, и его можно не учитывать при определении термического к.п.д. Таким образом, для расчета термического к.п.д. цикла Стирлинга необходимо знать только входящую (процесс 3 – 4) и выходящую (процесс 1 – 2) теплоту.

Первый закон термодинамики для изотермического процесса имеет вид /8/:

$$dQ = p\,dV \tag{4.1}$$

Или для одного моля идеального газа /8/:

$$dq = RT\frac{dV}{V} \tag{4.2}$$

Отсюда для двух рассматриваемых процессов после интегрирования получаем:

$$Q_{3-4} = RT\ln\frac{V_4}{V_3} \qquad -Q_{1-2} = RT\ln\frac{V_1}{V_2} \tag{4.3}$$

Термический к.п.д. цикла Стирлинга определяется следующим выражением /8/:

$$\eta = \frac{Q_{3-4} - |Q_{1-2}|}{Q_{3-4}} = \frac{T_3 - T_1}{T_3} \qquad (4.4)$$

Как видим, термический к.п.д. цикла Стирлинга эквивалентен термическому к.п.д. цикла Карно.

Устройство и принцип действия реального двигателя Стирлинга, имеющего цикл близкий к теоретическому циклу, показан на рисунке 4.2.

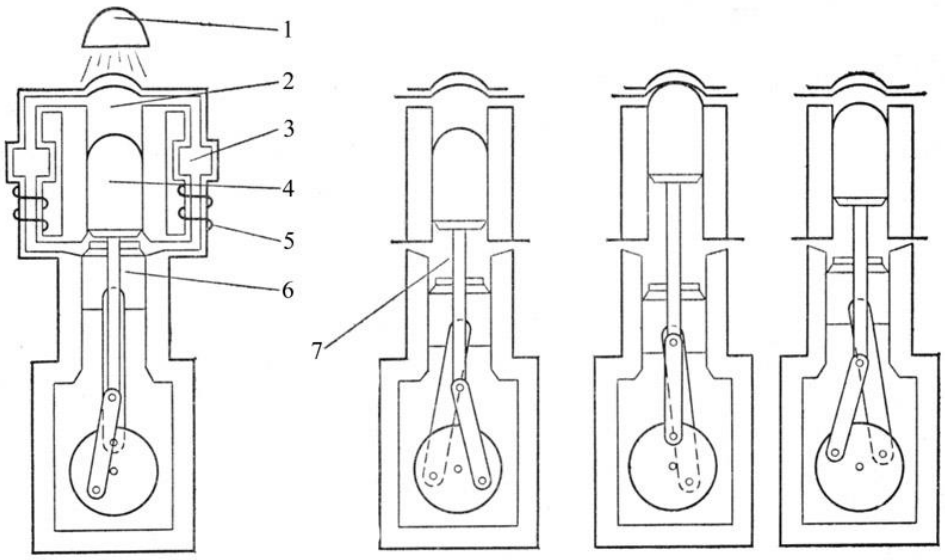


Рисунок 4.2. Устройство и схема работы
двигателя Стирлинга

1 – источник концентрированного солнечного излучения, 2 – горячая зона, 3 – регенератор, 4 – вытесняющий поршень, 5 – охладитель, 6 – силовой поршень, 7 – холодная зона.

Двигатель работает следующим образом.

Газ под действием концентрированного солнечного излучения нагревается в горячей зоне и, расширяясь, проходит через регенератор, где охлаждается. После прохождения регенератора охлажденный газ поступает в холодную зону и давит на силовой поршень, толкая его вниз. В

идеальном цикле это соответствует процессам 3 – 4 и 4 – 1, в реальном двигателе эти процессы идут одновременно и не могут быть разделены.

Силовой поршень связан с вытесняющим поршнем так, что при движении силового поршня вниз, вытесняющий поршень движется вверх, выталкивая газ из горячей зоны через регенератор.

Достигнув нижнего значения, силовой поршень начинает двигаться вверх, вытесняя уже охлажденный газ через регенератор в горячую зону. Проходя через регенератор, газ нагревается до температуры T_2. Вытесняющий поршень при этом достигает своего нижнего значения.

Газ в горячей зоне нагревается до температуры T_3 и цикл повторяется.

Серийное производство двигателей внешнего сгорания сдерживается из-за его больших размеров и трудностей конструкции нагреваемой стенки цилиндра. С освоением композиционных материалов, выдерживающих высокие температуры, двигатели внешнего сгорания стали выпускаться некоторыми европейскими фирмами.

Однако такого типа солнечные электростанции могут работать только при ясной погоде, так как требуют прямого излучения, способного фокусироваться. Это обстоятельство создает повышенные требования к аккумулированию энергии и, следовательно, приводит к повышению стоимости вырабатываемой энергии. Снижения стоимости сейчас добиваются различными путями, основными из которых являются:

- прямое применение тепла для процессов, требующих нагрева;
- применение теплоносителей, обладающих высоким аккумулирующим эффектом;
- применение солнечных тепловых электростанций в качестве дополнительных источников электроэнергии в системной электроэнергетике.

Выбор путей снижения стоимости зависит от назначения электростанции, и, в частности, для автономного использования будет ограничен первыми двумя. Рассмотрим эти направления.

Солнечная электростанция с паровым котлом требует конденсатора, который охлаждается водой. Нагретая охлаждающая вода должна сама в свою очередь охлаждаться. Целесообразно тепло от охлаждающей воды отводить путем его передачи тем объектам, которые наоборот требуют нагрева, например, в батареи отопления. Однако следует отметить, что в большее время года (когда солнечное излучение имеет достаточную мощность) нагрев не требуется. В этом случае тепло можно отводить к испарителям холодильников.

Более перспективными представляются солнечные электростанции, в которых в качестве теплоносителя применяется какой-либо химический реагент, имеющий обратимые реакции. Это предположение основано на следующем принципе.

Если в качестве теплоносителя использовать какую-либо химическую среду, то можно исключить потери между концентратором и паровой турбиной. Это позволит использовать тепло в течение длительного времени, например, в ночное время или в период облачности. Схема такой электростанции приведена на рисунке 4.3.

В этой системе используется эндотермическая реакция диссоциации аммиака, которая идет с дефицитом энергии $\Delta H = -46$ кДж/моль /10/. Солнечное излучение используется для снабжения системы энергией, необходимой для протекания этой реакции. Продукты диссоциации в камере синтеза частично восстанавливаются в молекулы аммиака, выделяемое при этом тепло используется для работы паровой машины или теплового двигателя Стирлинга. Дальнейшая рекомбинация продуктов диссоциации происходит в теплообменнике. Сепаратор разделяет потоки жидких и газообразных составляющих.

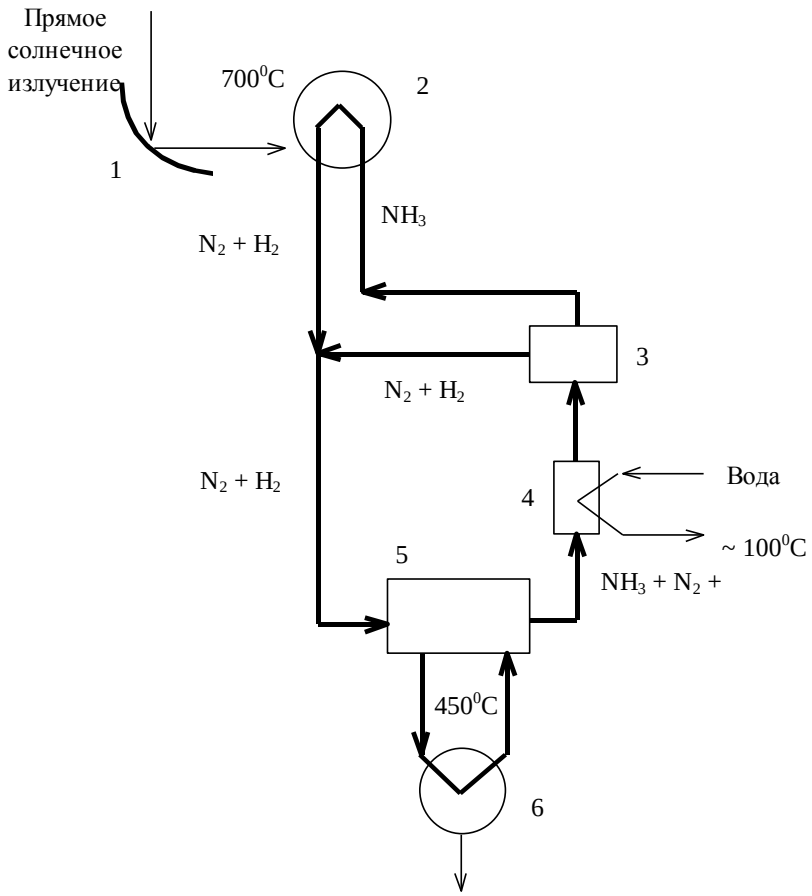


Рисунок 4.3. Солнечная электростанция с использованием аммиака

1 - концентратор; 2 - камера диссоциации; 3 - сепаратор; 4 - конденсатор; 5 - камера синтеза; 6 - тепловая машина.

Описанная солнечная электростанция многовариантна, что требует ее обоснования для различных ситуаций. Рассмотрим варианты описанной системы и их влияние на технико-экономические показатели.

В солнечной электростанции могут использоваться ***различные эндотермические реакции***, которые отличаются дефицитом энергии, стои-

мостью компонентов и их безопасностью, и, несомненно, будут влиять на технико-экономические параметры электроснабжения.

Каждая реакция может протекать в ***различных условиях***, например, при разных температурах и давлении. Так диссоциация аммиака в принципе может протекать при давлениях от 0,1 МПа до нескольких десятков МПа. Чем больше давление, тем толще и прочнее должны быть емкости, но их объем при этом будет снижаться. Очевидно, есть смысл определить наилучшие условия протекания реакций.

Естественно, что любые принятые условия можно обеспечить только путем изменения ***конструктивных параметров*** системы (а в некоторых случаях это может оказаться невыполнимо в принципе). Так, при автономной работе солнечные концентраторы должны подавать энергию в количестве, достаточном и для работы электростанции в период отсутствия солнечной энергии, то есть, достаточной для зарядки аккумуляторов. Расход энергии зависит от ее накопления и потребления, то есть, от графиков поступления энергии солнечного излучения и графика нагрузки.

Таким образом, создание солнечной электростанции с тепловой машиной является явно многофакторной оптимизационной задачей. Причем ее решение зависит от массы управляемых факторов и процессов (выбор реагентов и химических реакций, выбор условий их протекания, учет и управление графиками нагрузки, способов аккумулирования энергии). Однако из-за высокой стоимости таких солнечных электростанций их применение для автономного электроснабжения пока неприемлемо. Возможно с расширением фермерского производства, особенно животноводства, такие солнечные электростанции получат большие перспективы.

Использование солнечных тепловых электростанций в системной электроэнергетике не требует аккумулирования энергии, что позволяет значительно уменьшить стоимость электроэнергии.

Энергию солнечного излучения можно преобразовывать в электроэнергию непосредственно, минуя преобразования в тепловую и кинетическую энергию. Такое преобразование происходит в фотоэлектрических преобразователях, полупроводниковых приборах, способных под действием света генерировать электродвижущую силу постоянного тока.

Рассмотрим кратко особенности устройства и работы фотоэлектрических преобразователей.

Фотоэлектрические преобразователи представляет собой полупроводниковое устройство, в котором под действием света появляется электрический потенциал. Электрические свойства полупроводников описываются зонной теорией, согласно которой валентная зона и зона проводимости разделены энергетическим зазором, называемым запрещенной зоной (рисунок 4.4).

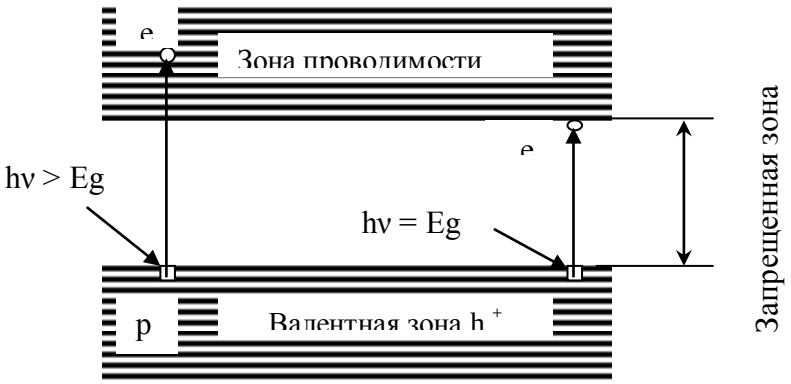


Рисунок 4.4. Зонная структура полупроводника
с собственной проводимостью

При попадании фотона в валентный электрон, электрон возбуждается, и при достаточной энергии фотона может перейти в зону проводимости.

В настоящее время в фотоэлектрических преобразователях применяется кремний. Чистый кремний не содержит примесных атомов. Технически чистый кремний содержит незначительное число примесных атомов, которые могут отдавать или присоединять электроны. Если в полупроводник с собственной проводимостью внести примесь ионов, то возникает примесная проводимость. Так, например, если четырехвалентный атом кремния в кристаллической решетке заместить атомом с меньшей валентностью, то в решетке возникает ***акцепторный*** узел, способный захватывать свободные электроны. Энергетические уровни акцепторных атомов располагаются в запрещенной зоне вблизи валентной зоны. Отсутствие свободных электронов приводит к появлению положительных состояний, называемых ***дырками***. Дырки имеют тяготение к заполнению электронами, но тогда на месте присоединенного электрона появляется своя дырка. Такое явление можно интерпретировать, как перемещение дырок в веществе полупроводника.

Если внести примесь с большей валентностью, чем кремний, то возникнут ***донорные*** узлы, способные отдавать электроны. В этом случае по веществу полупроводника будут перемещаться электроны.

Первого типа полупроводники называются полупроводниками p-типа, а вторые – n-типа.

Материалы с примесной проводимостью обладают более высокой электропроводностью, чем технически чистые полупроводники. Электропроводность полупроводников n-типа выше, чем чистых полупроводников, так как энергия ионизации доноров меньше ширины запрещенной зоны, и, при возбуждении фотонами, электроны легче переходят в зону проводимости, т. е., для возбуждения требуется меньшая энергия фотона. Аналогичная ситуация и для полупроводников p-типа, только здесь требуется меньше энергии для перехода дырок в валентную зону.

Если соединить p-полупроводник и n-полупроводник, то заряды (электроны и дырки) будут притягиваться к соответствующим веществам, образуя в месте соединения обедненную зону (рисунок 4.5).

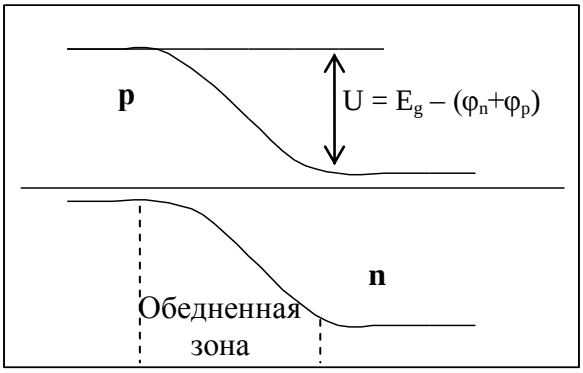


Рисунок 4.5. Схема формирования p-n перехода
в фотоэлементе

Так как по обе стороны перехода имеется избыток носителей заряда (дырок в материале p-типа и электронов в материале n-типа) в переходе существуют градиенты концентрации дырок dp/dx и электронов dn/dx, которые стремятся вызвать диффузию носителей заряда (диффузионный ток). Здесь x – расстояние от границы перехода.

Концентрация дырок и электронов уменьшается с увеличением расстояния x вследствие рекомбинации. Наряду с основными носителями в p и n материалах существуют и неосновные (противоположной полярности) носители.

Период времени с момента перехода носителя в ту область, где он является неосновным, до момента его рекомбинации с основным носителем является временем жизни неосновного носителя. Диффузионная длина (расстояние, пройденное неосновным носителем до рекомбинации) определяется следующими уравнениями /7/:

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \tag{4.5}$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \tag{4.6}$$

где L_p, L_n – диффузионная длина соответствующего носителя;

D_p, D_n – коэффициент диффузии соответствующего материала;

τ_p, τ_n – время жизни соответствующего неосновного носителя.

Вследствие диффузии и рекомбинации электронов и дырок на сторонах p-n перехода будет формироваться разность потенциалов, называемых потенциальным барьером. Этот потенциал вызывает дрейф дырок из материала n-типа в материал p-типа и дрейф электронов в противоположном направлении, то есть дрейфовый ток.

Динамическое равенство диффузии и дрейфа носителей в любой момент времени t и на любом расстоянии x от pn-перехода соответствует принципу сохранения заряда. Например, для дырок этот принцип описывается следующим уравнением /7/:

$$\frac{\partial p_П}{\partial t} = -\frac{p_П - p_{П0}}{\tau_p} + D_p \frac{\partial^2 p_П}{\partial x^2} - \mu_p \frac{\partial (p_П U_0)}{\partial x} \tag{4.7}$$

где $p_П$ – концентрация дырок на переходе;

$p_{П0}$ – равновесная концентрация дырок на границе обедненной области при x = 0;

μ_p – подвижность дырок;

U_0 – напряжение потенциального барьера.

Подвижность дырок является постоянной величиной для материала и связана с коэффициентом диффузии уравнением Эйнштейна:

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{e} \qquad (4.8)$$

Здесь k – постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура;

e – заряд электрона.

Из уравнения (4.7) вытекает, что увеличение тока (левая часть) зависит от разности концентраций возбужденных дырок, дырок, находящихся на границе обедненной области (x = 0), и суммы диффузионного и дрейфового токов. Аналогичное уравнение можно составить и для электронов.

Граничными условиями уравнения (4.7) при отсутствии освещения (первое слагаемое правой части равно нулю) являются:

$$p_П = 0 \text{ при } x = \infty;\ p_П = p_{П0}\exp\frac{eU}{kT} \text{ при } x = 0 \qquad (4.9)$$

При этих граничных условиях решением уравнения (4.7), с учетом аналогичного уравнения для электронов, будет:

$$j = j_0\exp\left[\frac{eU}{kT} - 1\right] \qquad (4.10)$$

Здесь j – плотность тока в полупроводнике, А/м^2;

j_0 – плотность тока насыщения, А/м^2.

$$j_0 = \frac{eD_p p_{П0}}{L_p} + \frac{eD_n n_{П0}}{L_n} \qquad (4.11)$$

Решая уравнение (4.7) для освещенного фотоэлемента (первое слагаемое правой части не равно нулю), получаем:

$$j = j_Ф + j_0 \exp\left[\frac{eU}{kT} - 1\right] \qquad (4.12)$$

где $j_ф$ – плотность фототока, А/м^2.

Эквивалентная схема фотоэлемента, соответствующая выражению (4.12), показана на рисунке 4.6. Здесь $j_В$ – второе слагаемое в (4.12).

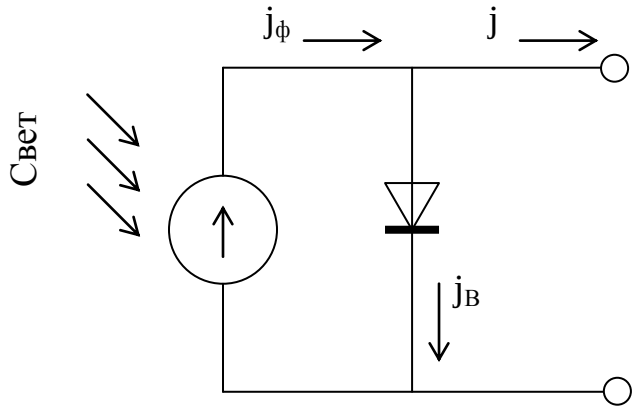


Рисунок 4.6. Эквивалентная схема идеального фотоэлемента.

Практически ток, протекающий в фотоэлементе при освещении, отличается от расчетного по выражению (4.12), что объясняется наличи-

ем собственного сопротивления. Эквивалентная схема такого фотоэлемента приведена на рисунке 4.7.

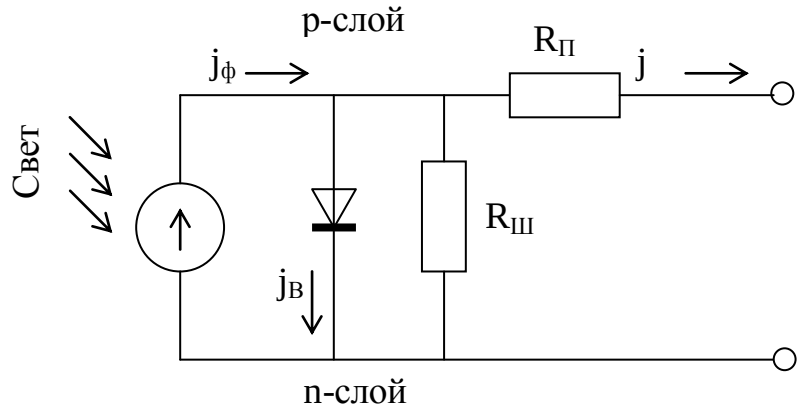


Рисунок 4.7. Эквивалентная схема
реального фотоэлемента

$R_Ш$ – собственное шунтовое сопротивление фотоэлемента, $R_П$ – собственное последовательное сопротивление реального фотоэлемента, обусловленное присоединением выводов.

С учетом реальных изменений, уравнение тока фотоэлемента принимает вид /7, 11/:

$$j = j_ф - j_0\left\{\exp\left[\frac{e(U+ jR_П)}{AkT}\right]-1\right\} - \frac{U}{R_Ш} \qquad (4.13)$$

где А – поправочный коэффициент, принимающий значения 1 – 5.

В настоящее время к.п.д. батареи фотоэлектрических преобразователей реально составляет 12 – 15%, то есть, для гарантированного получения мощности 1 кВт потребуется приблизительно 35 $м^2$ батарей ФЭП (при мощности солнечного излучения 200 $Вт/м^2$). Максимальный теоре-

тический к.п.д. фотоэлектрических преобразователей может достигнуть 45%. Реальные фотоэлектрические преобразователи имеют гораздо меньший к.п.д., и увеличение его. требует огромных усилий.

На рисунке 4.8 показана вольтамперная характеристика фотоэлемента.

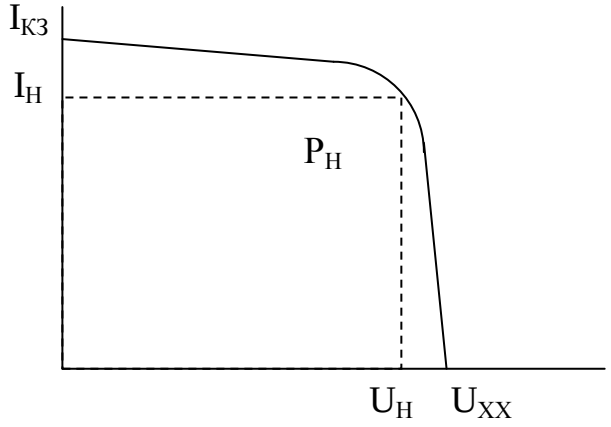


Рисунок 4.8. Вольтамперная характеристика
реального фотоэлемента

$I_{КЗ}$ – ток короткого замыкания, $I_Н$ – номинальный ток, $U_Н$ – номинальное напряжение, U_{XX} – напряжение холостого хода, $P_Н$ – номинальная мощность.

Номинальная мощность определяется следующим условием:

$$P = IU \rightarrow max \qquad (4.14)$$

Или, учитывая функциональную зависимость тока от напряжения, получаем:

$$P = f(U)U \rightarrow max \qquad (4.15)$$

Здесь f(U) – зависимость тока фотоэлемента от напряжения.

4.3. Концентраторы и системы слежения

Для повышения эффективности использования энергии солнечного излучения в солнечных электростанциях применяются концентраторы и системы слежения за Солнцем, представляющие периферийные устройства.

Тепловые солнечные электростанции вообще не могут работать без концентраторов солнечного излучения и систем слежения за Солнцем, а в солнечных электростанциях на фотоэлектрических преобразователях применение концентрированного солнечного излучения позволяет увеличить коэффициент использования энергии с 12 – 14% до 15 – 18% в коммерческих энергоустановках. В лабораторных энергоустановках на фотоэлектрических преобразователях этот показатель уже в настоящее время превышает 20% /4/.

Системы слежения обеспечивают повышение коэффициента использования энергии солнечного излучения в 1,3 раза в зимние месяцы и в 1,8 раза в летний сезон (таблица 4.1).

Следует отметить, что принцип слежения зависит от наличия и типа концентратора. В солнечных тепловых электростанциях система слежения должна иметь высокую точность наведения и обычно выполняется в функции интенсивности солнечного излучения. Вариант такой системы представлен на рисунке 4.9.

Принцип работы устройства показан на примере узла слежения за азимутом Солнца (VT5, VT6)

При освещении фотоэлемента VD3 в нем энергия излучения Солнца преобразуется в электрическую энергию. Начинает протекать ток база-эмиттер транзистора VT5, посредством которого он открывается. Ток, текущий по цепи коллектор-эмиттер VT5 – база-эмиттер VT6, открывает

транзистор VT6. Катушка реле К3 оказывается подключенной к источнику питания (ИП), контакт реле К3.1 размыкается и двигатель М2 отключается от источника питания.

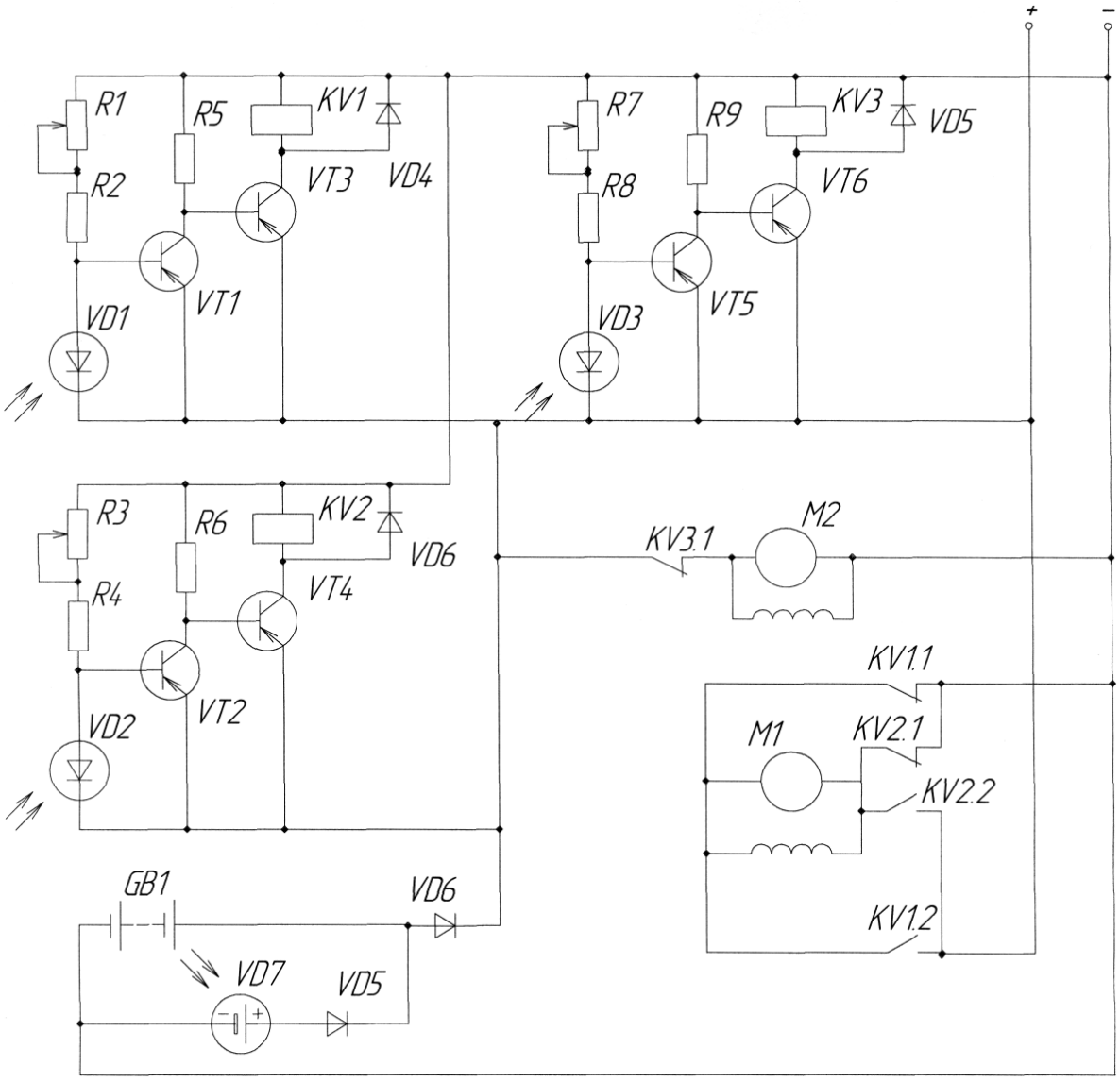


Рисунок 4.9. Принципиальная электрическая схема слежения батареи фотоэлектрических преобразователей за Солнцем

При изменении азимутального угла Солнца и затенении фотоэлемента VD3 (разориентация панели фотоэлектрических преобразователей) ток база-эмиттер транзистора VT5 не течет, транзистор VT5 закрыт, ка-

тушка реле KV3 отключается от источника питания, контакт реле замыкается, тем самым, подключая двигатель M2 к источнику питания. Двигатель поворачивает панель фотоэлектрических преобразователей до их полного освещения, то есть до полной ориентации на Солнце. После наведения панели фотоэлектрических преобразователей на Солнце двигатель M2 отключается.

Чувствительность устройства регулируется при помощи переменного резистора R7.

Узел слежения за высотой солнцестояния (VT1, VT3; VT2,VT4) работает аналогично, но выполняет реверсирование и коммутацию двигателя M1.

Таблица 4.1

Поступление энергии солнечного излучения
на плоские преобразователи солнечной энергии

Месяц года	Среднесуточное поступление энергии, кДж/м^2	
	Фиксированный преобразователь	Следящий преобразователь
Январь	2600	3320
Февраль	3790	4980
Март	6840	9120
Апрель	10050	14930
Май	12560	20200
Июнь	13970	23440
Июль	14100	23440
Август	14220	22010
Сентябрь	11390	17640
Октябрь	7400	10250
Ноябрь	4000	5430
Декабрь	1800	2340

Точные системы слежения требуются и при использовании простейших концентраторов в солнечных электростанциях на фотоэлектрических преобразователях, так как такие концентраторы утрачивают эффективность при рассогласовании угла наведения на Солнце более 1 – 2 градусов. Альтернативным вариантом в электростанциях на фотоэлектрических преобразователях являются концентраторы второго порядка, представляющие собой поверхности вращения парабол.

Концентраторы второго порядка (параболические фоконы или фоклины) позволяют собирать лучи, попадающие во входную зону под углом до 45 градусов и более. Это, во-первых, позволяет использовать не только прямое, но и часть рассеянного солнечного излучения, а во-вторых, угол наведения при суточном ходе Солнца можно изменять только два раза в сутки. Такие системы слежения могут работать в функции времени и являются более простыми и более дешевыми. Вариант такой системы слежения показан на рисунке 4.10.

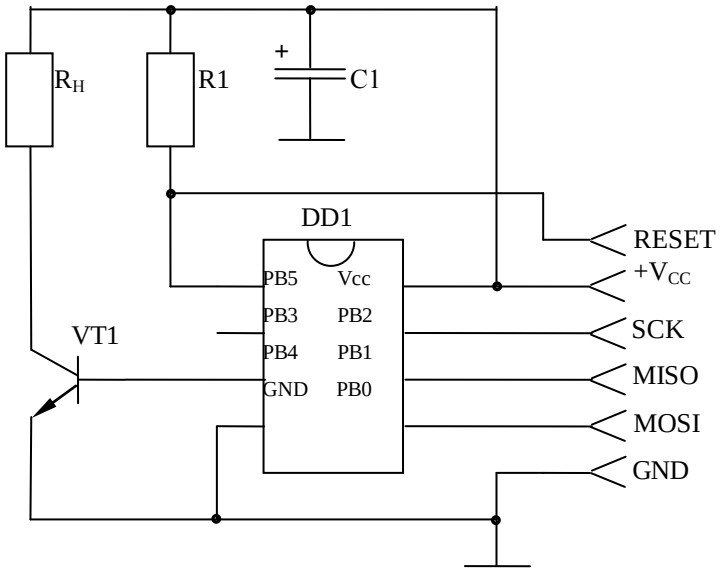


Рисунок 4.10. Принципиальная схема слежения
в функции времени

Таким образом, существует два основных альтернативных варианта автономных солнечных электростанций:

- отсутствие или простые концентраторы солнечного излучения в сочетании со сложной системой слежения:
- сложные концентраторы в сочетании с простой системой слежения.

Для выбора того или иного варианта необходимо рассмотреть принципы работы и эффективность концентраторов и проанализировать их технические возможности.

Концентрирование основано на собирании лучей с большой площади и направлении их на малую площадь. Коэффициент концентрации солнечного излучения фоконов и фоклинов различных типов при этом определяется следующим образом /4, 6/:

$$K_K = \frac{F_{BX}}{F_{ПР}} (k_{ОТР})^n \qquad (4.16)$$

где K_K – коэффициент концентрации фокона (фоклина);

F_{BX} – площадь входного отверстия, м^2;

$F_{ПР}$ – площадь приемника, м^2;

n – количество отражений луча;

$k_{ОТР}$ – коэффициент отражения внутренней поверхности концентратора.

Типы концентраторов солнечного излучения приведены на рисунке 4.11.

Наименьший коэффициент концентрации имеют концентраторы с образующей 1. Концентраторы с образующей 4 имеют наибольший коэффициент концентрации и применяются в солнечных нагревателях.

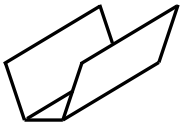
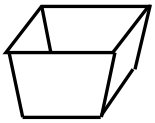
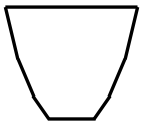
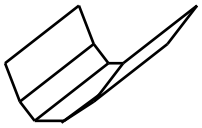
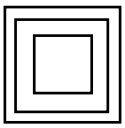
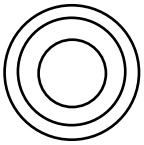
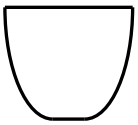
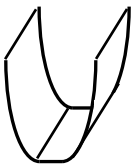
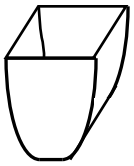
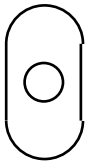
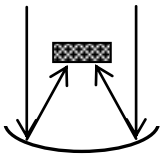
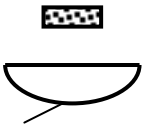
Форма образующей	Линейные	Многогранные	Круглые
 1			
 2		 Вид сверху	 Вид сверху
 3			 Вид сверху
 4			 Гиперболоид

Рисунок 4.11. Типы зеркальных концентраторов

Основные параметры концентраторов определяются в соответствии с их геометрическими формами.

Для определения параметров концентратора введем понятие граничного луча. Граничный луч – это луч, падающий перпендикулярно плоскости приемника, попадающий на верхнюю границу концентратора, и после n отражений попадающий на границу приемника. Очевидно, что после n отражений направление луча должно быть перпендикулярно образующей концентратора. В этом случае граничный луч отразится от образующей концентратора в ее нижней точке и, повторив свой ход в обратном направлении, выйдет из концентратора. Все остальные лучи, по-

падающие в приемное отверстие концентратора, после не более n отражений попадут на приемник.

На рисунке 4.12 показан ход граничного луча при двукратном отражении в четырехгранном или коническом концентраторе.

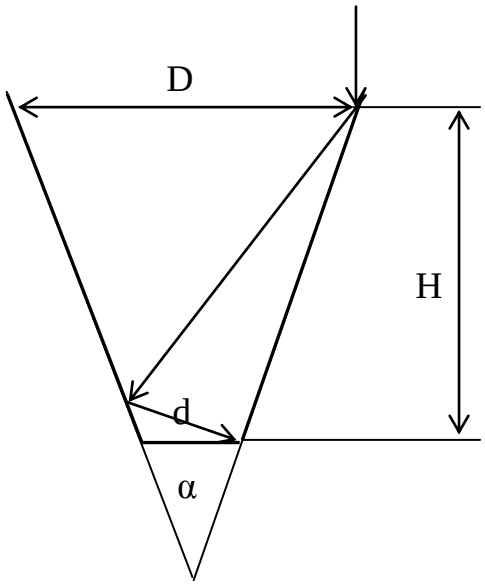


Рисунок 4.12. Ход граничного луча в четырехгранном концентраторе при двукратном отражении

D – диаметр или сторона входного отверстия, d – диаметр или сторона выходного отверстия, H – высота концентратора, α – угол раскрытия.

Параметры концентраторов с линейной образующей связаны между собой соотношениями:

$$K = k_{отр}^{n}\left(\frac{D}{d}\right)^{2} \qquad (4.17)$$

$$\sin\frac{\alpha}{2} = \frac{D-d}{2L} \qquad (4.18)$$

$$H = \frac{D - d}{2\,tg\frac{\alpha}{2}} \qquad (4.19)$$

Здесь K – коэффициент концентрации;

n – количество отражений граничного луча до попадания на приемник;

L – длина образующей, м

Для аналитического расчета концентраторов опишем зависимость угла их раскрытия от числа отражений. Для этого проведем геометрические построения (рисунок 4.13).

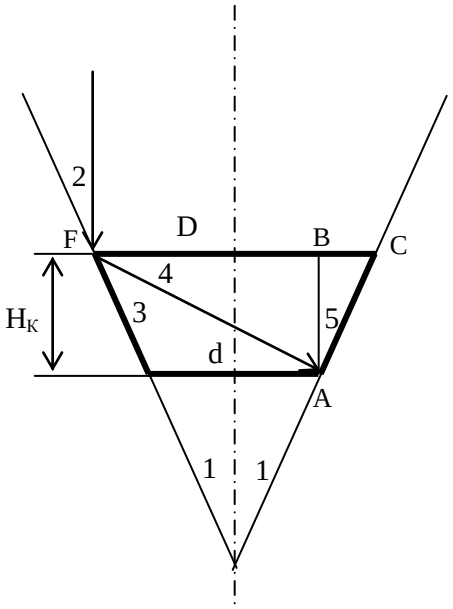


Рисунок 4.13. К расчету концентратора n = 1.

Из построений следует:

- угол 1 равен $\frac{\alpha}{2}$;

- угол 2 равен углу 5, равен углу 1, равен $\frac{\alpha}{2}$;
- угол 3 равен углу 2 по законам отражения;
- угол 4 равен углу 5, равен углу 1, так как угол А прямой.

Из треугольника АВС следует:

$$\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2} = \frac{R - r}{H_K} \tag{4.20}$$

Вместе с тем из треугольника AFB так же следует:

$$\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2} = \frac{H_K}{R + r} \tag{4.21}$$

Перемножив (4.20) и (4.21), получаем:

$$\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2} = \sqrt{\frac{R - r}{R + r}} \tag{4.22}$$

Данная зависимость позволяет определить угол раскрытия концентратора с однократным отражением.

Попытаемся найти зависимость угла раскрытия от количества отражений. При однократном отражении (рисунок 4.13) имеем:

$$\angle 2 + \angle 3 + \angle 4 = 90^{O} \text{ или } \alpha = \frac{180^{o}}{3} \tag{4.23}$$

Рассмотрим концентратор с двукратным отражением (рисунок 4.14).

Из рисунка следует:

- угол ACB равен углу ACE, равен $\frac{\alpha}{2}$;
- угол CFM равен углу CEB, равен 90 – α;
- угол AFM равен $\frac{\alpha}{2}$;
- угол AFN равен 90 – $\frac{\alpha}{2}$.

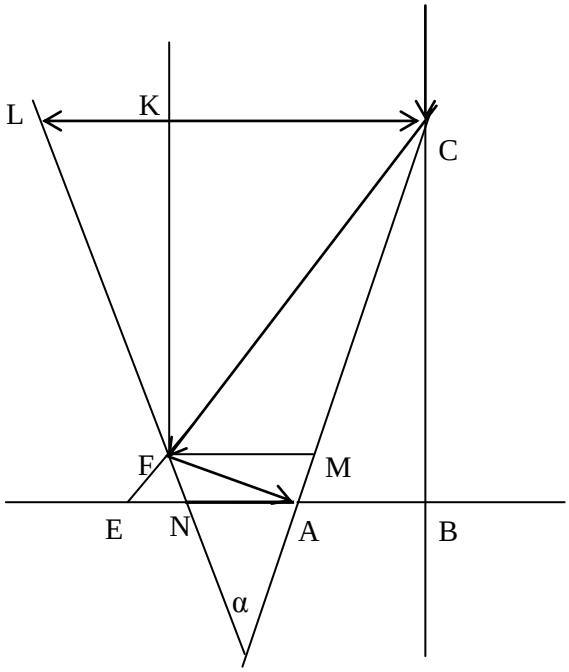


Рисунок 4.14. К расчету концентратора
с двукратным отражением

Таким образом, можно записать:

$$90-\alpha+\frac{\alpha}{2}+90-\frac{\alpha}{2}+90-\alpha=180 \qquad (4.24)$$

Откуда получаем:

$$\alpha = \frac{180^o}{4} \qquad (4.25)$$

Сравнивая (4.23) и (4.25), замечаем:

$$\alpha = \frac{\pi}{n+2} \qquad (4.26)$$

Формула (4.26) связывает угол раскрытия концентратора с числом отражений. Как следует из полученной формулы, угол раскрытия концентратора уменьшается с увеличением числа отражений (таблица 4.2). Это приводит к увеличению высоты концентратора при фиксированном коэффициенте концентрации.

Таблица 4.2

Геометрические параметры концентратора первого типа

Параметры концентратора	Число отражений		
	n = 1	n = 2	n = 3
Угол раскрытия, град.	60	45	36
Высота концентратора*) , м			
▪ К = 2, $k_{ОТР}$ = 1	0,036	0,050	0,064
▪ К = 10, $k_{ОТР}$ = 1	0,187	0,261	0,333
▪ К = 2, $k_{ОТР}$ = 0,8	0,050	0,093	0,150
▪ К = 10, $k_{ОТР}$ = 0,8	0,220	0,356	0,526

*) диаметр приемника равен 0,1 м

На рисунке 4.15 показано отношение диаметров входного отверстия и фотоприемника. С увеличением коэффициента концентрации и умень-

шением коэффициента отражения это отношение увеличивается. Причем при малых коэффициентах концентрации эта зависимость почти линейная.

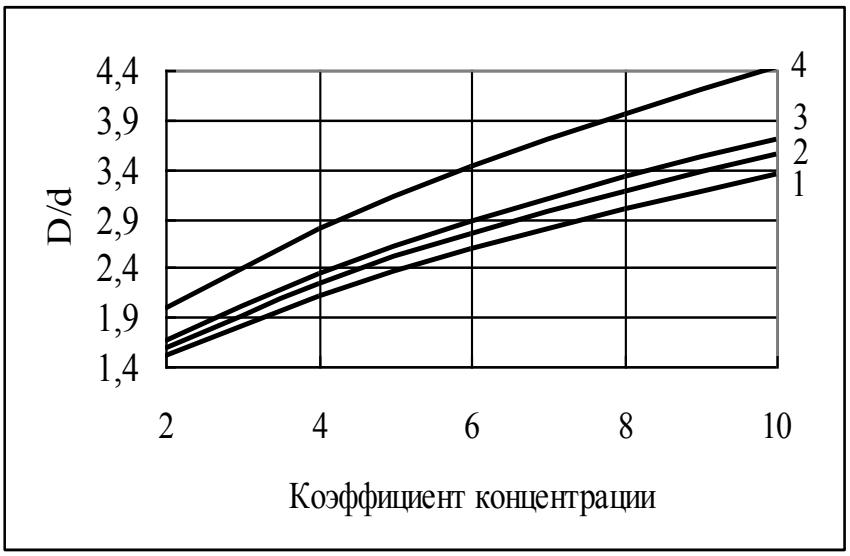


Рисунок 4.15. Размеры входа и приемника концентратора

1 – n = 1, $k_{ОТР}$ = 0,9; 2 – n = 1, $k_{ОТР}$ = 0,8; 3 – n = 3, $k_{ОТР}$ = 0,9; 4 – n = 3, $k_{ОТР}$ = 0,8;

При выборе концентратора большое значение имеет его материалоемкость. На рисунке 4.16 приведена зависимость площади поверхности концентратора от его параметров при коэффициенте отражения равном единице. Как следует из этих зависимостей, при увеличении количества отражений площадь поверхности растет.

В односекционных концентраторах с прямой образующей выполненных в виде конуса на фотоприемник попадает неравномерное облучение. Это вызвано поперечным искажением лучей от радиальной поверхности. В пирамидальных концентраторах облученность фотопринимающей поверхности гораздо равномернее по тем же соображениям. В этой связи не рекомендуется применять конические концентраторы.

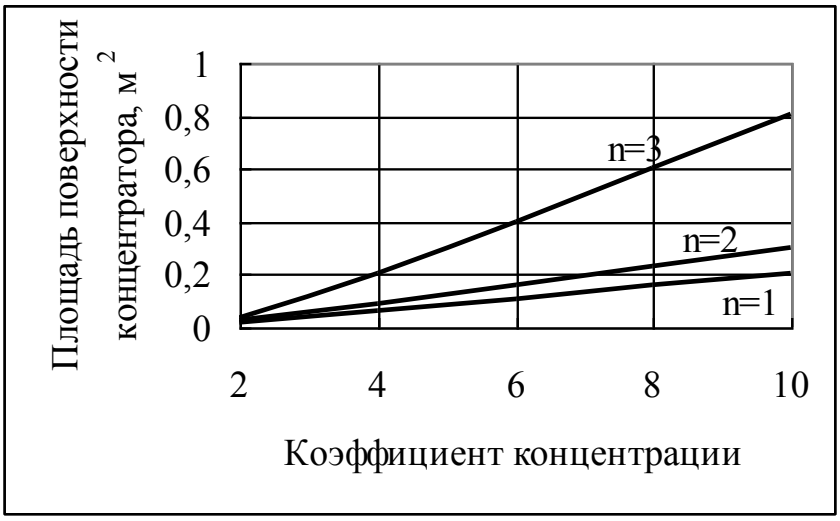


Рисунок 4.16. Площадь концентратора при диаметре фотоприемника 0,1м.

Фоконы по сравнению с фоклинами также имеют более равномерную облученность приемника, однако, фоклины требуют слежения только за высотой Солнца и не требуют азимутального слежения.

Кроме того, пирамидальные фоконы допускают неточную ориентацию на Солнце, что достигается увеличением ширины их граней. Необходимая ширина граней при этом определяется по формуле:

$$d' = d_0 \frac{\sum_n (-1)^n \cos(2n\theta + \delta_P)}{\cos(\theta + \delta_P)}; \qquad (4.27)$$

где d' – необходимая ширина плоскости фотоприемника;

d_0 – исходная ширина фотоприемника;

θ – угол наклона грани, $\theta = 90 - \frac{\alpha}{2}$;

δ – угол разориентации на Солнце относительно продольной оси фокона.

Коэффициент концентрации пирамидального концентратора с увеличенной шириной граней определяется по следующей формуле /4/:

$$K^{/} = \cos\delta + \sum_{n}(-1)^{n}\, k_{OTP}{}^{n}\cos(2n\theta + \delta) + \sum_{n}(-1)^{n}\, k_{OTP}{}^{n}\cos(2n\theta - \delta) \quad (4.28)$$

На рисунке 4.17 показано распределение концентрации солнечного излучения по плоскости фотоприемника, из которого следует, что при увеличении грани плоскости фотоприемника в соответствии с (4.27) солнечное излучение равномерно распределено практически по всей поверхности фотоприемника и равно расчетному значению при строгой ориентации.

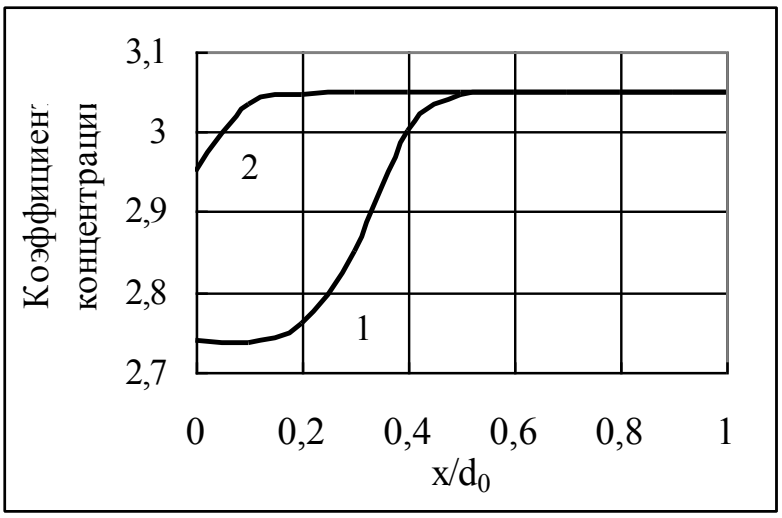


Рисунок 4.17. Концентрация солнечного излучения
на поверхности ФЭП при угле $\delta = 1^{o}$
1 – $d^{/}/d_0 = 3{,}75$; 2 – $d^{/}/d_0 = 4{,}10$ (соответствует (4.27))

Недостатком односекционных плоских фоконов являются их большие размеры (особенно высота) даже при умеренных коэффициентах концентрации.

Многосекционные фоконы (рисунок 4.18) по сравнению с односекционными требуют меньшей высоты. Коэффициент концентрации для многосекционных фоконов определяется по формуле /4/:

$$K_N = 1 + Nk_{OTP} \sum_N K_i \qquad (4.29)$$

Здесь K_N – коэффициент концентрации N-секционного фокона,

K_i – коэффициент концентрации i-той секции.

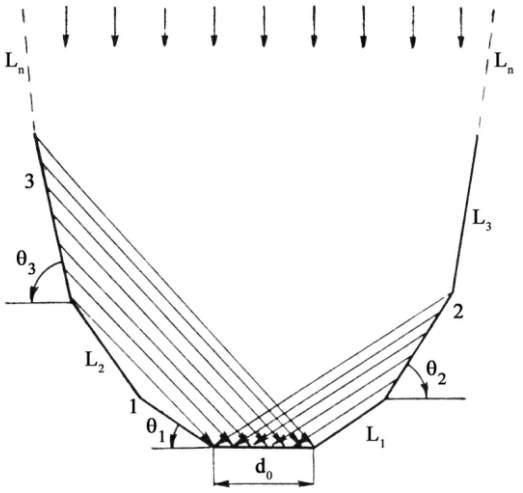


Рисунок 4.18. Многосекционный фокон

Ширина каждой секции (см. рисунок 4.18) определяется по формуле /4/:

$$L_i = -L_0 \frac{\cos 2\theta_i}{\cos \theta_i} \qquad (4.30)$$

Для определения геометрических параметров i-той секции необходимо знать параметры предыдущей секции. Практически задаются пара-

метрами первой секции, пользуясь формулами для односекционного концентратора, а затем последовательно рассчитывают остальные секции.

Многосекционные плоские концентраторы позволяют получить такие же коэффициенты концентрации при меньших размерах, чем односекционные. Однако и те, и другие не допускают больших разориентаций. Так при угле разориентации более 2 градусов их ширина возрастает в десятки раз.

Гораздо бóльшую разориентацию допускают параболические фоконы. На рисунке 4.19 показан ход световых лучей в параболическом концентраторе, из которого следует, что в нижней части концентрируются лучи, попадающие в приемное окно под различными углами.

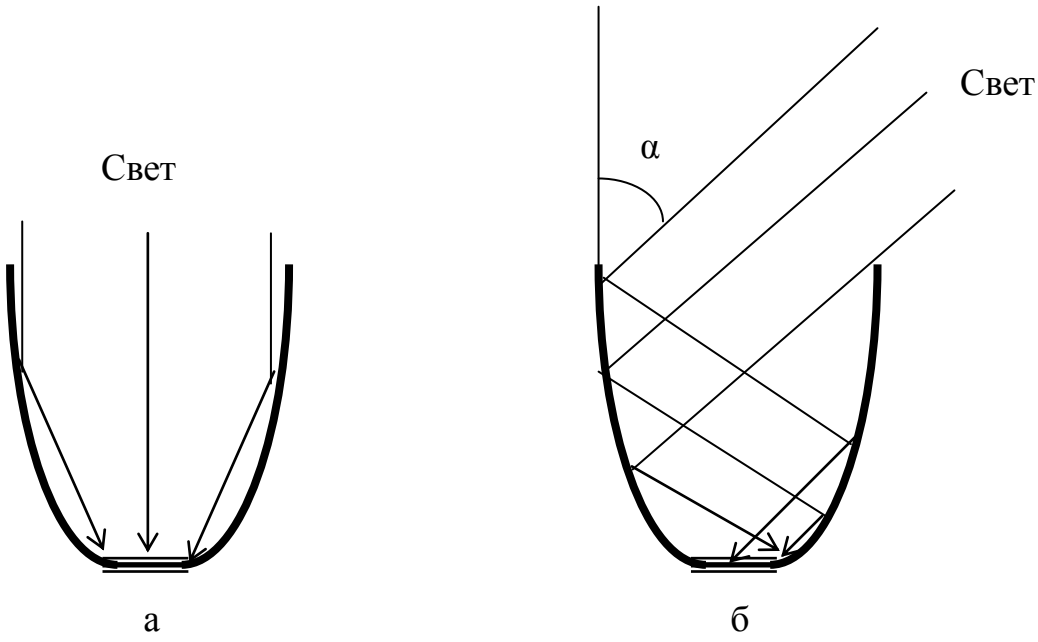


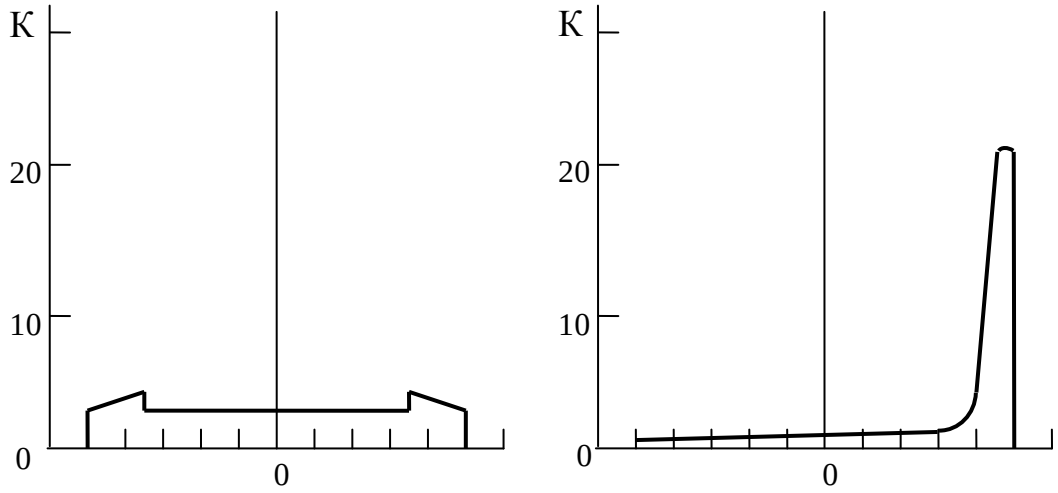
Рисунок 4.19. Параболический фокон

а – прямое попадание лучей света, б – свет попадает под углом α

В пределе теоретически можно преобразовать рассеянное излучение в концентрированное, то есть отказаться от системы слежения. Практически для таких концентраторов достаточно дискретного слежения в функ-

ции времени с наведением на Солнце 2 – 3 раза в сутки. При этом возможно использование и какой-то части рассеянного солнечного излучения.

Однако в параболических фоконах и фоклинах при концентрации косых лучей в фокусирующей плоскости (в плоскости фотоэлектрических преобразователей) плотность облучения может быть не равномерна, что снижает к.п.д. фотоэлектрических преобразователей /4, 11/. В качестве примера приведены графические изображения облученности приемной плоскости параболического фоклина с углом раскрытия 30^{o} в зависимости от угла попадания световых лучей (рисунок 4.20). Как следует из этого графика, неравномерность облученности может быть весьма существенной.



а б

Рисунок 4.20. Облученность фотоприемника в зависимости от угла попадания лучей

а – угол $\alpha = 0^{o}$; б – угол $\alpha = 30^{o}$

Отражающая поверхность параболического фокона (рисунок 4.21) образуется вращением параболы $A\text{-}A_1$ вокруг оси симметрии. Фокусное

расстояние образующей параболы выбирается таким образом, чтобы при расположении ее фокуса в точке В выходного отверстия фокона парабола при вращении прошла через точку А этого же отверстия. Точка А на параболе определяется как точка ее пересечения с линией, проведенной из точки В под углом α к оси вращения. При этом любой луч, попадающий в фокон со стороны входного отверстия под углом не более α, дойдет до его выходного отверстия, при больших углах падения луча, он, многократно отразившись, выйдет из фокона.

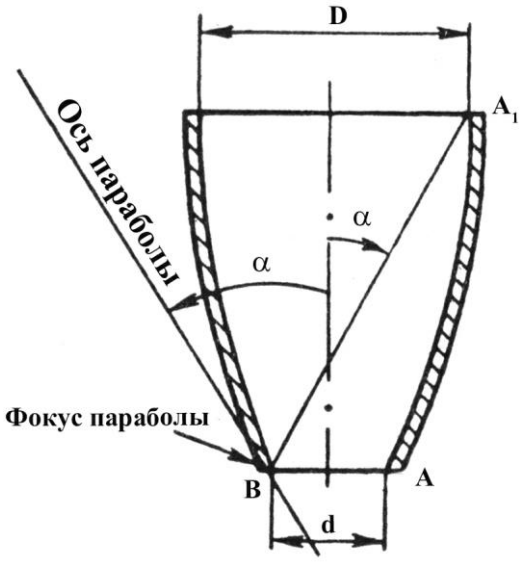


Рисунок 4.21. Параболический фокон

Таким образом, параболические фоконы допускают разориентацию на Солнце вплоть до угла α. Это и определяет целесообразность применения параболического фокона.

Геометрические параметры параболического фокона связаны между собой соотношениями /4/:

$$d = D \sin\alpha \qquad (4.31)$$

$$H = 0{,}5\,(D + d)\,\mathrm{ctg}\alpha \qquad (4.32)$$

Коэффициент концентрации параболического фокона равен:

$$K = \left(\frac{D}{d}\right)^2 = \frac{1}{\sin^2\alpha} \qquad (4.33)$$

Концентраторы только прямого солнечного излучения, представляющие собой конические или пирамидальные устройства, или линзы Френеля, в отличие от параболических концентраторов не позволяют использовать рассеянное солнечное излучение, часть энергии остается недоступной.

Для работы тепловых солнечных электростанций, описанных в п.4.1, необходимы очень высокие температуры. Такие температуры достигаются применением сильно концентрирующих систем (см. рисунок 4.11, образующая 4). Практическое применение получили линейные и цилиндрические концентраторы.

Линейный концентратор (рисунок 4.22) требует слежения только за углом солнцестояния и ориентируется в южном полушарии на юг.

Мощность, поглощаемая приемником, равна /5, 6, 9/:

$$N_{ПР} = k_{ОТРК}\,\alpha_{ПР}\,lD\,N_C \qquad (4.34)$$

где $k_{ОТРК}$ – коэффициент отражения поверхности концентратора;

$\alpha_{ПР}$ – коэффициент поглощения приемником;

lD – площадь сбора солнечной энергии, $м^2$;

N_C – интенсивность солнечного излучения, $Вт/м^2$.

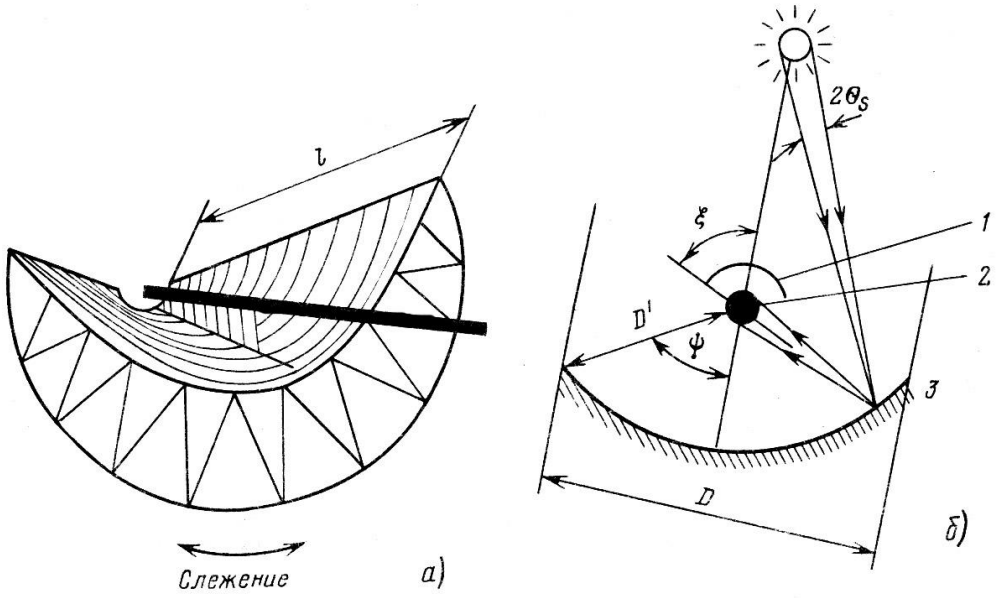


Рисунок 4.22. Линейный концентратор
солнечной тепловой электростанции
а – внешний вид, б - сечение
1 – экран, 2 – приемник концентрированного солнечного излучения

Теоретически температура приемника в таком концентраторе при интенсивности солнечного излучения 600 Вт/м^2, $k_{ОТРК}$ = 0,8 может достигать Т = 1160 К /9/. Практически из-за неточности изготовления параболического зеркала и прокачки жидкости температура достигает 970 – 1000 К, что, однако, достаточно для работы паровой машины /9/.

Гораздо большей температуры можно достичь, применяя цилиндрические концентраторы, образованные вращением параболы или гиперболы. Температура в таких концентраторах достигает 3000 К, что достаточно для работы теплового двигателя Стирлинга /8, 9/. Однако такие концентраторы более сложны и требуют слежения за Солнцем в двух направлениях. Последнее условие не только усложняет конструкцию, но и требует более сложного привода следящего механизма.

Вопросы для самоконтроля

1. Как определяется термический к.п.д. двигателя Стирлинга?
2. Почему двигатели Стирлинга не имеют широкого применения?
3. В каком устройстве энергия солнечного излучения преобразуется в электроэнергию?
4. Какой к.п.д. фотоэлектрических преобразователей?
5. Какие бываю следящие устройства?
6. Как классифицируются концентраторы солнечного излучения?
7. Какие концентраторы способны собирать и часть рассеянного излучения?
8. Какую температуру можно получить на выходе концентраторов?
9. Во сколько раз можно увеличить интенсивность солнечного излучения при слежении за Солнцем по сравнению с фиксированной площадкой?
10. Какими путями можно увеличить допустимый угол рассогласования в концентраторах первого порядка? Второго порядка?
11. Какие достоинства и недостатки у концентраторов первого и второго порядка по сравнению друг с другом?
12. Как влияет температура фотоэлектрического преобразователя на его к.п.д.?

Задания для закрепления материала

1. Выведите формулу зависимости угла раскрытия концентратора первого порядка от числа отражений.
2. Объясните работу системы слежения в функции солнечного излучения.

3. Изготовьте из белой бумаги конус и в ясный день исследуйте его способность собирать солнечное излучение при различной ориентации на Солнце.
4. Изготовьте из белой бумаги конус с отношением $\frac{R}{r} \geq 10$. Попытайтесь в ясный день зажечь с его помощью сухую фильтровальную бумагу.
5. Измерьте температуру на его выходе и сравните с температурой на освещенной Солнцем поверхности.

Точные системы слежения требуются и при использовании простейших концентраторов в солнечных электростанциях на фотоэлектрических преобразователях, так как такие концентраторы утрачивают эффективность при рассогласовании угла наведения на Солнце более 1 – 2 градусов. Альтернативным вариантом в электростанциях на фотоэлектрических преобразователях являются концентраторы второго порядка, представляющие собой поверхности вращения парабол.

Концентраторы второго порядка (параболические фоконы или фоклины) позволяют собирать лучи, попадающие во входную зону под углом до 45 градусов и более. Это, во-первых, позволяет использовать не только прямое, но и часть рассеянного солнечного излучения, а во-вторых, угол наведения при суточном ходе Солнца можно изменять только два раза в сутки. Такие системы слежения могут работать в функции времени и являются более простыми и более дешевыми. Вариант такой системы слежения показан на рисунке 4.10.

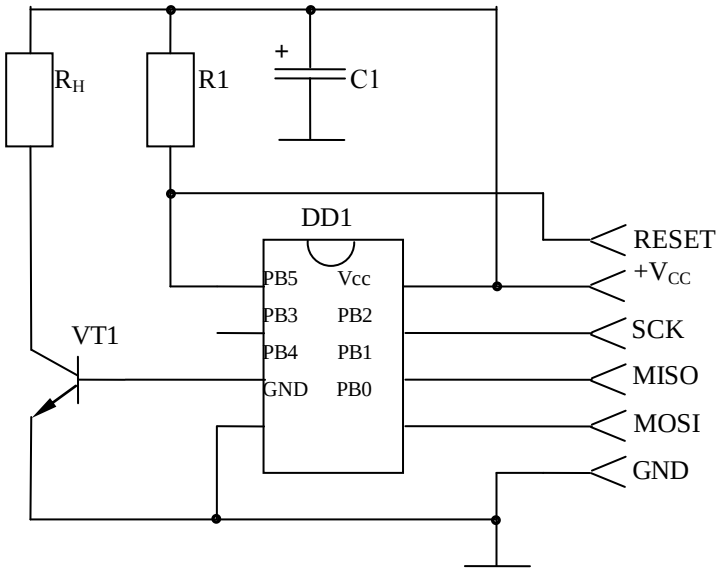


Рисунок 4.10. Принципиальная схема слежения
в функции времени

Таким образом, существует два основных альтернативных варианта автономных солнечных электростанций:

- отсутствие или простые концентраторы солнечного излучения в сочетании со сложной системой слежения:
- сложные концентраторы в сочетании с простой системой слежения.

Для выбора того или иного варианта необходимо рассмотреть принципы работы и эффективность концентраторов и проанализировать их технические возможности.

Концентрирование основано на собирании лучей с большой площади и направлении их на малую площадь. Коэффициент концентрации солнечного излучения фоконов и фоклинов различных типов при этом определяется следующим образом /4, 6/:

$$K_K = \frac{F_{BX}}{F_{ПР}} (k_{ОТР})^n \qquad (4.16)$$

где K_K – коэффициент концентрации фокона (фоклина);

F_{BX} – площадь входного отверстия, м^2;

$F_{ПР}$ – площадь приемника, м^2;

n – количество отражений луча;

$k_{ОТР}$ – коэффициент отражения внутренней поверхности концентратора.

Типы концентраторов солнечного излучения приведены на рисунке 4.11.

Наименьший коэффициент концентрации имеют концентраторы с образующей 1. Концентраторы с образующей 4 имеют наибольший коэффициент концентрации и применяются в солнечных нагревателях.

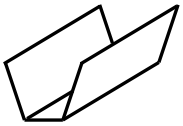
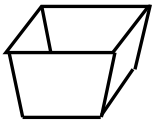
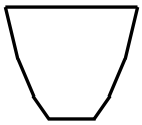
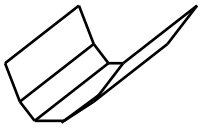
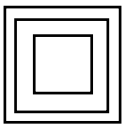
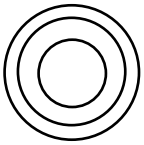
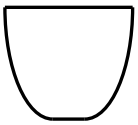
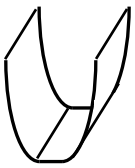
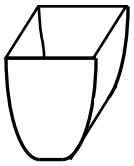
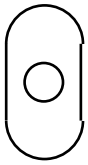
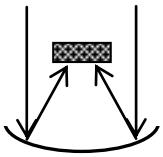
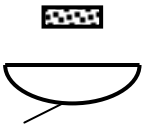
Форма образующей	Линейные	Многогранные	Круглые
 1			
 2		 Вид сверху	 Вид сверху
 3			 Вид сверху
 4			 Гиперболоид

Рисунок 4.11. Типы зеркальных концентраторов

Основные параметры концентраторов определяются в соответствии с их геометрическими формами.

Для определения параметров концентратора введем понятие граничного луча. Граничный луч – это луч, падающий перпендикулярно плоскости приемника, попадающий на верхнюю границу концентратора, и после n отражений попадающий на границу приемника. Очевидно, что после n отражений направление луча должно быть перпендикулярно образующей концентратора. В этом случае граничный луч отразится от образующей концентратора в ее нижней точке и, повторив свой ход в обратном направлении, выйдет из концентратора. Все остальные лучи, по-

падающие в приемное отверстие концентратора, после не более n отражений попадут на приемник.

На рисунке 4.12 показан ход граничного луча при двукратном отражении в четырехгранном или коническом концентраторе.

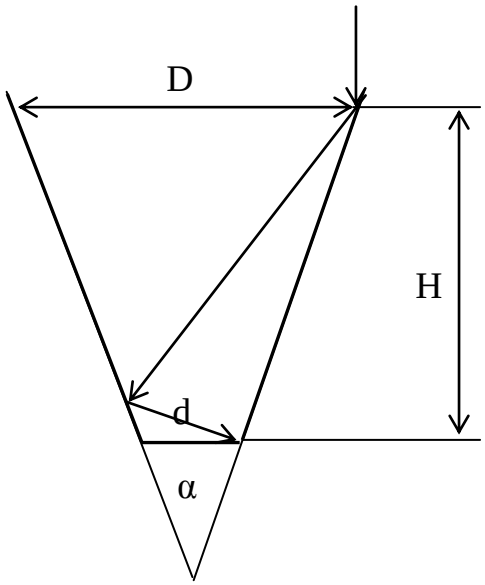


Рисунок 4.12. Ход граничного луча в четырехгранном концентраторе при двукратном отражении

D – диаметр или сторона входного отверстия, d – диаметр или сторона выходного отверстия, H – высота концентратора, α – угол раскрытия.

Параметры концентраторов с линейной образующей связаны между собой соотношениями:

$$K = k_{отр}^{n}\left(\frac{D}{d}\right)^{2} \qquad (4.17)$$

$$\sin\frac{\alpha}{2} = \frac{D-d}{2L} \qquad (4.18)$$

$$H = \frac{D - d}{2\,tg\frac{\alpha}{2}} \qquad (4.19)$$

Здесь K – коэффициент концентрации;

n – количество отражений граничного луча до попадания на приемник;

L – длина образующей, м

Для аналитического расчета концентраторов опишем зависимость угла их раскрытия от числа отражений. Для этого проведем геометрические построения (рисунок 4.13).

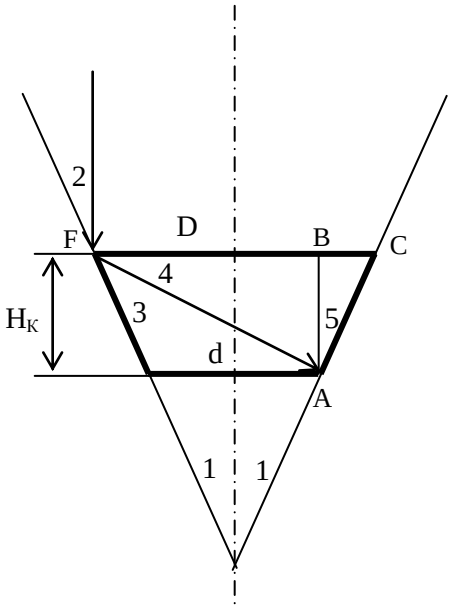


Рисунок 4.13. К расчету концентратора n = 1.

Из построений следует:

- угол 1 равен $\frac{\alpha}{2}$;

- угол 2 равен углу 5, равен углу 1, равен $\frac{\alpha}{2}$;
- угол 3 равен углу 2 по законам отражения;
- угол 4 равен углу 5, равен углу 1, так как угол А прямой.

Из треугольника АВС следует:

$$\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2} = \frac{R - r}{H_K} \tag{4.20}$$

Вместе с тем из треугольника AFB так же следует:

$$\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2} = \frac{H_K}{R + r} \tag{4.21}$$

Перемножив (4.20) и (4.21), получаем:

$$\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2} = \sqrt{\frac{R - r}{R + r}} \tag{4.22}$$

Данная зависимость позволяет определить угол раскрытия концентратора с однократным отражением.

Попытаемся найти зависимость угла раскрытия от количества отражений. При однократном отражении (рисунок 4.13) имеем:

$$\angle 2 + \angle 3 + \angle 4 = 90^{O} \text{ или } \alpha = \frac{180^{o}}{3} \tag{4.23}$$

Рассмотрим концентратор с двукратным отражением (рисунок 4.14).

Из рисунка следует:

- угол ACB равен углу ACE, равен $\frac{\alpha}{2}$;
- угол CFM равен углу CEB, равен 90 – α;
- угол AFM равен $\frac{\alpha}{2}$;
- угол AFN равен 90 – $\frac{\alpha}{2}$.

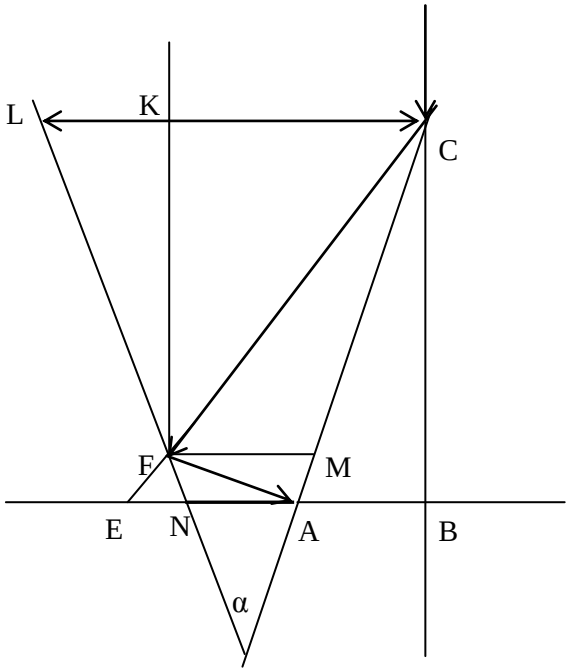


Рисунок 4.14. К расчету концентратора
с двукратным отражением

Таким образом, можно записать:

$$90-\alpha+\frac{\alpha}{2}+90-\frac{\alpha}{2}+90-\alpha=180 \qquad (4.24)$$

Откуда получаем:

$$\alpha = \frac{180^o}{4} \qquad (4.25)$$

Сравнивая (4.23) и (4.25), замечаем:

$$\alpha = \frac{\pi}{n+2} \qquad (4.26)$$

Формула (4.26) связывает угол раскрытия концентратора с числом отражений. Как следует из полученной формулы, угол раскрытия концентратора уменьшается с увеличением числа отражений (таблица 4.2). Это приводит к увеличению высоты концентратора при фиксированном коэффициенте концентрации.

Таблица 4.2

Геометрические параметры концентратора первого типа

Параметры концентратора	Число отражений		
	n = 1	n = 2	n = 3
Угол раскрытия, град.	60	45	36
Высота концентратора*) , м			
▪ К = 2, $k_{ОТР}$ = 1	0,036	0,050	0,064
▪ К = 10, $k_{ОТР}$ = 1	0,187	0,261	0,333
▪ К = 2, $k_{ОТР}$ = 0,8	0,050	0,093	0,150
▪ К = 10, $k_{ОТР}$ = 0,8	0,220	0,356	0,526

*) диаметр приемника равен 0,1 м

На рисунке 4.15 показано отношение диаметров входного отверстия и фотоприемника. С увеличением коэффициента концентрации и умень-

шением коэффициента отражения это отношение увеличивается. Причем при малых коэффициентах концентрации эта зависимость почти линейная.

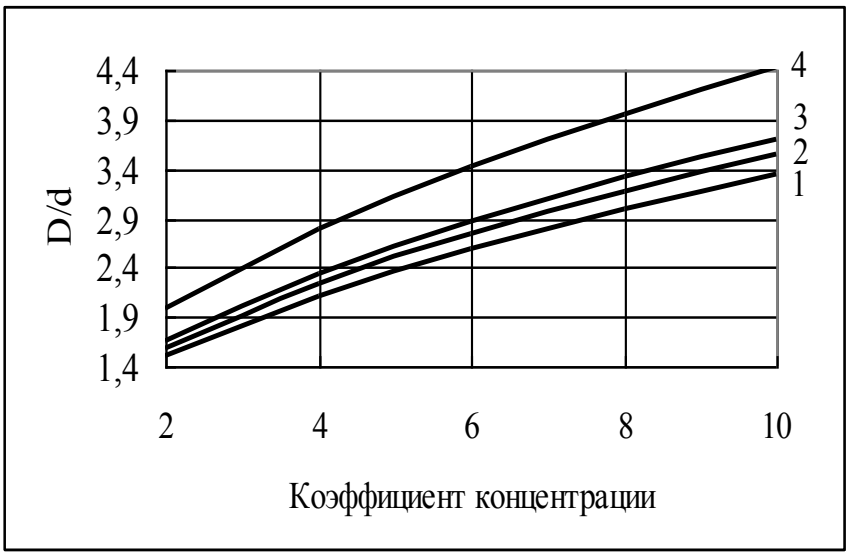


Рисунок 4.15. Размеры входа и приемника концентратора

1 – n = 1, $k_{ОТР}$ = 0,9; 2 – n = 1, $k_{ОТР}$ = 0,8; 3 – n = 3, $k_{ОТР}$ = 0,9; 4 – n = 3, $k_{ОТР}$ = 0,8;

При выборе концентратора большое значение имеет его материалоемкость. На рисунке 4.16 приведена зависимость площади поверхности концентратора от его параметров при коэффициенте отражения равном единице. Как следует из этих зависимостей, при увеличении количества отражений площадь поверхности растет.

В односекционных концентраторах с прямой образующей выполненных в виде конуса на фотоприемник попадает неравномерное облучение. Это вызвано поперечным искажением лучей от радиальной поверхности. В пирамидальных концентраторах облученность фотопринимающей поверхности гораздо равномернее по тем же соображениям. В этой связи не рекомендуется применять конические концентраторы.

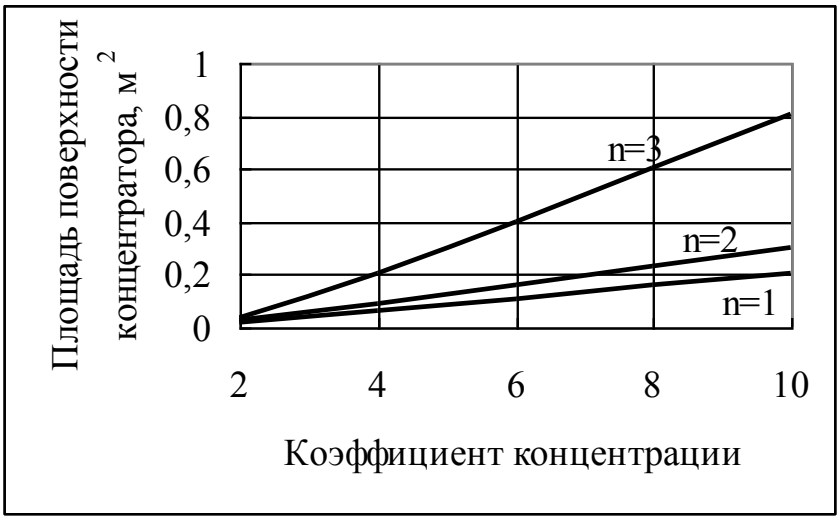


Рисунок 4.16. Площадь концентратора при диаметре фотоприемника 0,1м.

Фоконы по сравнению с фоклинами также имеют более равномерную облученность приемника, однако, фоклины требуют слежения только за высотой Солнца и не требуют азимутального слежения.

Кроме того, пирамидальные фоконы допускают неточную ориентацию на Солнце, что достигается увеличением ширины их граней. Необходимая ширина граней при этом определяется по формуле:

$$d' = d_0 \frac{\sum_n (-1)^n \cos(2n\theta + \delta_P)}{\cos(\theta + \delta_P)}; \qquad (4.27)$$

где d' – необходимая ширина плоскости фотоприемника;

d_0 – исходная ширина фотоприемника;

θ – угол наклона грани, $\theta = 90 - \frac{\alpha}{2}$;

δ – угол разориентации на Солнце относительно продольной оси фокона.

Коэффициент концентрации пирамидального концентратора с увеличенной шириной граней определяется по следующей формуле /4/:

$$K' = \cos\delta + \sum_n (-1)^n \, k_{OTP}{}^n \cos(2n\theta + \delta) + \sum_n (-1)^n \, k_{OTP}{}^n \cos(2n\theta - \delta) \quad (4.28)$$

На рисунке 4.17 показано распределение концентрации солнечного излучения по плоскости фотоприемника, из которого следует, что при увеличении грани плоскости фотоприемника в соответствии с (4.27) солнечное излучение равномерно распределено практически по всей поверхности фотоприемника и равно расчетному значению при строгой ориентации.

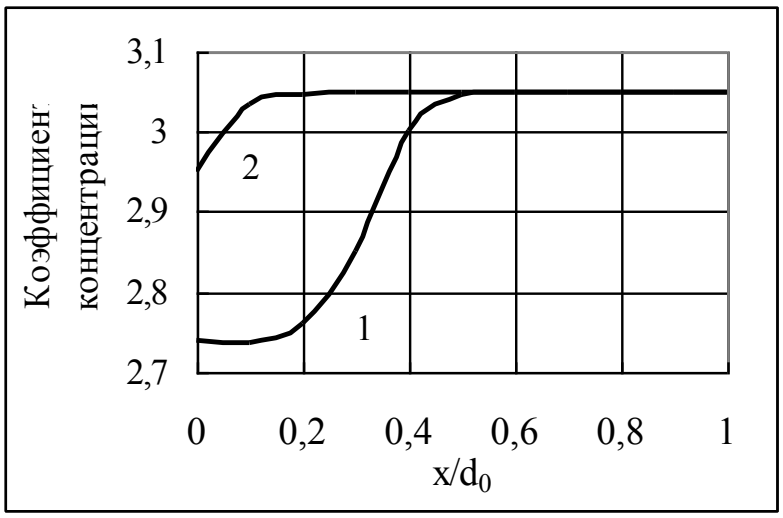


Рисунок 4.17. Концентрация солнечного излучения
на поверхности ФЭП при угле $\delta = 1^o$
1 – $d'/d_0 = 3{,}75$; 2 – $d'/d_0 = 4{,}10$ (соответствует (4.27))

Недостатком односекционных плоских фоконов являются их большие размеры (особенно высота) даже при умеренных коэффициентах концентрации.

Многосекционные фоконы (рисунок 4.18) по сравнению с односекционными требуют меньшей высоты. Коэффициент концентрации для многосекционных фоконов определяется по формуле /4/:

$$K_N = 1 + Nk_{OTP} \sum_N K_i \qquad (4.29)$$

Здесь K_N – коэффициент концентрации N-секционного фокона,

K_i – коэффициент концентрации i-той секции.

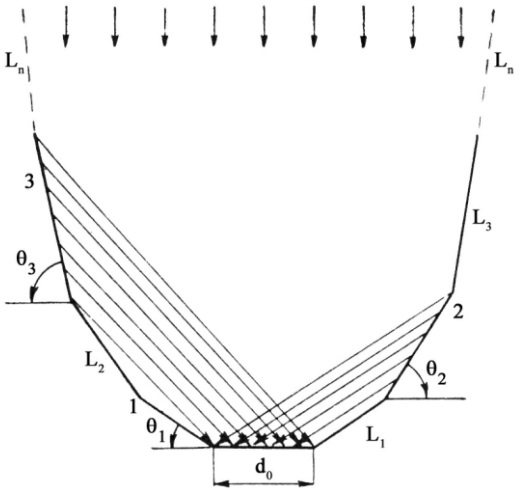


Рисунок 4.18. Многосекционный фокон

Ширина каждой секции (см. рисунок 4.18) определяется по формуле /4/:

$$L_i = -L_0 \frac{\cos 2\theta_i}{\cos \theta_i} \qquad (4.30)$$

Для определения геометрических параметров i-той секции необходимо знать параметры предыдущей секции. Практически задаются пара-

метрами первой секции, пользуясь формулами для односекционного концентратора, а затем последовательно рассчитывают остальные секции.

Многосекционные плоские концентраторы позволяют получить такие же коэффициенты концентрации при меньших размерах, чем односекционные. Однако и те, и другие не допускают больших разориентаций. Так при угле разориентации более 2 градусов их ширина возрастает в десятки раз.

Гораздо бóльшую разориентацию допускают параболические фоконы. На рисунке 4.19 показан ход световых лучей в параболическом концентраторе, из которого следует, что в нижней части концентрируются лучи, попадающие в приемное окно под различными углами.

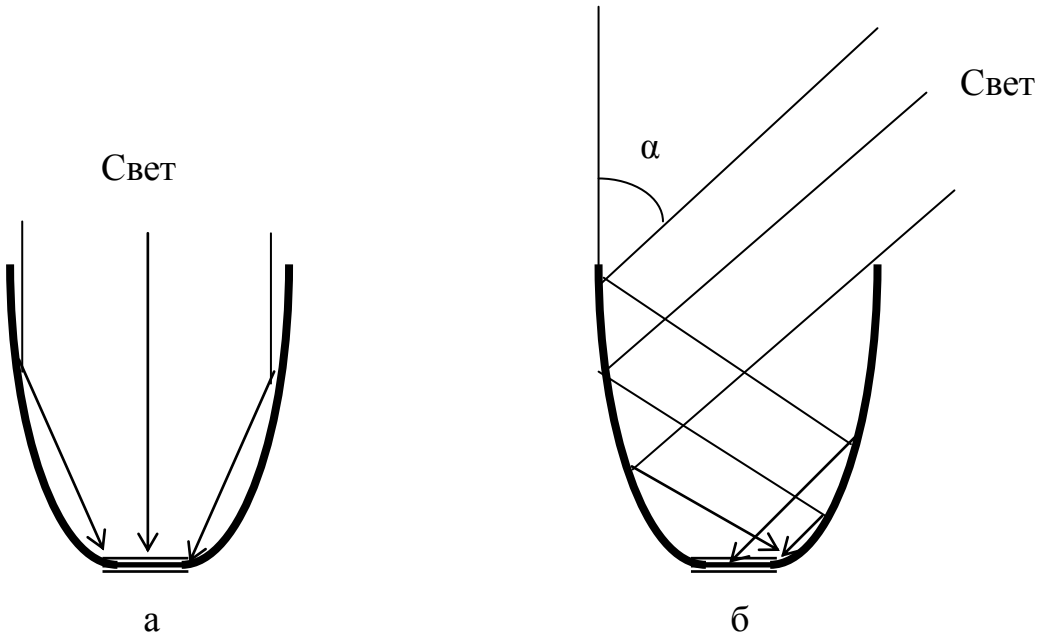


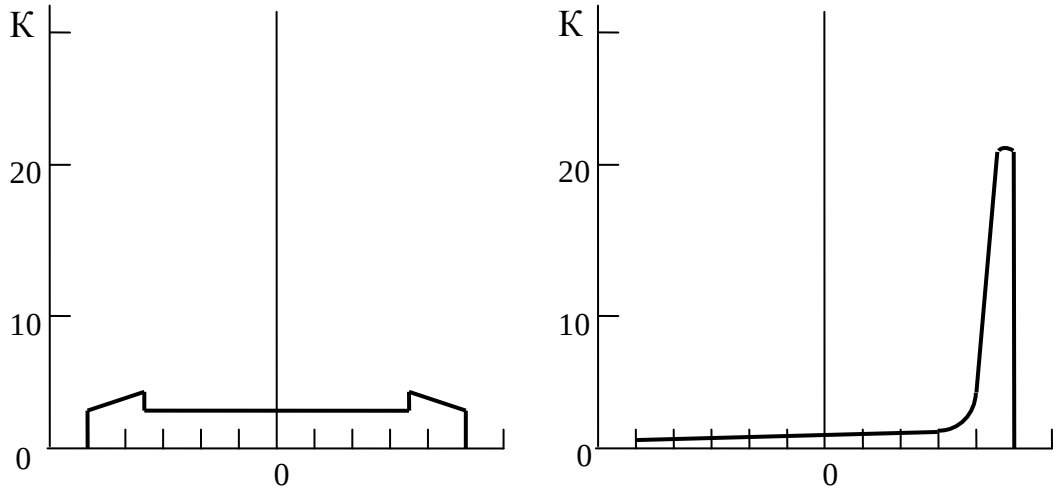
Рисунок 4.19. Параболический фокон

а – прямое попадание лучей света, б – свет попадает под углом α

В пределе теоретически можно преобразовать рассеянное излучение в концентрированное, то есть отказаться от системы слежения. Практически для таких концентраторов достаточно дискретного слежения в функ-

ции времени с наведением на Солнце 2 – 3 раза в сутки. При этом возможно использование и какой-то части рассеянного солнечного излучения.

Однако в параболических фоконах и фоклинах при концентрации косых лучей в фокусирующей плоскости (в плоскости фотоэлектрических преобразователей) плотность облучения может быть не равномерна, что снижает к.п.д. фотоэлектрических преобразователей /4, 11/. В качестве примера приведены графические изображения облученности приемной плоскости параболического фоклина с углом раскрытия 30^{o} в зависимости от угла попадания световых лучей (рисунок 4.20). Как следует из этого графика, неравномерность облученности может быть весьма существенной.



а б

Рисунок 4.20. Облученность фотоприемника в зависимости от угла попадания лучей

а – угол $\alpha = 0^{o}$; б – угол $\alpha = 30^{o}$

Отражающая поверхность параболического фокона (рисунок 4.21) образуется вращением параболы $A\text{-}A_1$ вокруг оси симметрии. Фокусное

расстояние образующей параболы выбирается таким образом, чтобы при расположении ее фокуса в точке В выходного отверстия фокона парабола при вращении прошла через точку А этого же отверстия. Точка А на параболе определяется как точка ее пересечения с линией, проведенной из точки В под углом α к оси вращения. При этом любой луч, попадающий в фокон со стороны входного отверстия под углом не более α, дойдет до его выходного отверстия, при больших углах падения луча, он, многократно отразившись, выйдет из фокона.

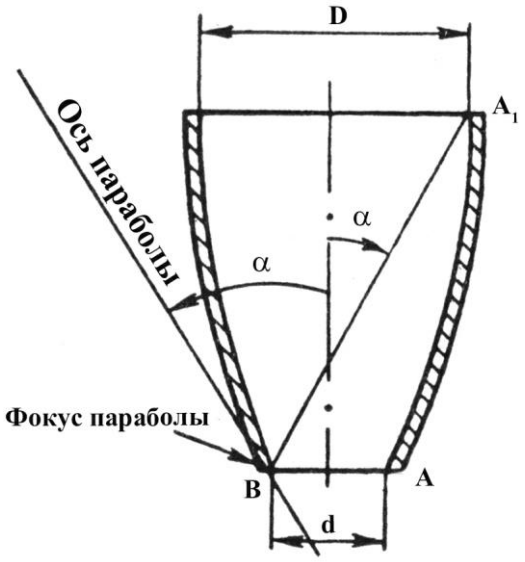


Рисунок 4.21. Параболический фокон

Таким образом, параболические фоконы допускают разориентацию на Солнце вплоть до угла α. Это и определяет целесообразность применения параболического фокона.

Геометрические параметры параболического фокона связаны между собой соотношениями /4/:

$$d = D \sin\alpha \qquad (4.31)$$

$$H = 0{,}5\,(D + d)\,\mathrm{ctg}\alpha \qquad (4.32)$$

Коэффициент концентрации параболического фокона равен:

$$K = \left(\frac{D}{d}\right)^2 = \frac{1}{\sin^2\alpha} \qquad (4.33)$$

Концентраторы только прямого солнечного излучения, представляющие собой конические или пирамидальные устройства, или линзы Френеля, в отличие от параболических концентраторов не позволяют использовать рассеянное солнечное излучение, часть энергии остается недоступной.

Для работы тепловых солнечных электростанций, описанных в п.4.1, необходимы очень высокие температуры. Такие температуры достигаются применением сильно концентрирующих систем (см. рисунок 4.11, образующая 4). Практическое применение получили линейные и цилиндрические концентраторы.

Линейный концентратор (рисунок 4.22) требует слежения только за углом солнцестояния и ориентируется в южном полушарии на юг.

Мощность, поглощаемая приемником, равна /5, 6, 9/:

$$N_{ПР} = k_{ОТРК}\,\alpha_{ПР}\,lD\,N_C \qquad (4.34)$$

где $k_{ОТРК}$ – коэффициент отражения поверхности концентратора;

$\alpha_{ПР}$ – коэффициент поглощения приемником;

lD – площадь сбора солнечной энергии, $м^2$;

N_C – интенсивность солнечного излучения, $Вт/м^2$.

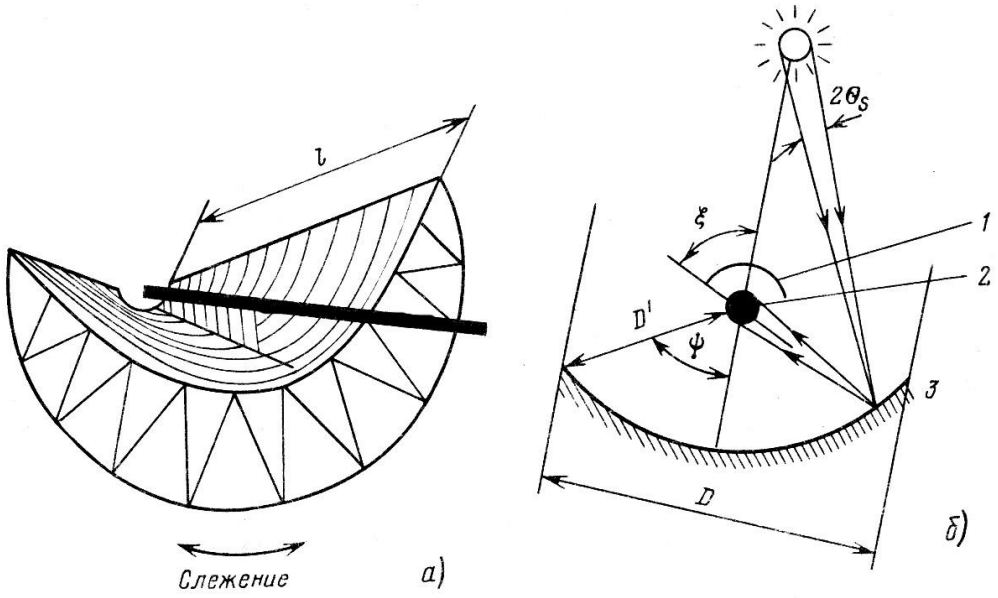


Рисунок 4.22. Линейный концентратор
солнечной тепловой электростанции
а – внешний вид, б - сечение
1 – экран, 2 – приемник концентрированного солнечного излучения

Теоретически температура приемника в таком концентраторе при интенсивности солнечного излучения 600 Вт/м^2, $k_{ОТРК}$ = 0,8 может достигать Т = 1160 К /9/. Практически из-за неточности изготовления параболического зеркала и прокачки жидкости температура достигает 970 – 1000 К, что, однако, достаточно для работы паровой машины /9/.

Гораздо большей температуры можно достичь, применяя цилиндрические концентраторы, образованные вращением параболы или гиперболы. Температура в таких концентраторах достигает 3000 К, что достаточно для работы теплового двигателя Стирлинга /8, 9/. Однако такие концентраторы более сложны и требуют слежения за Солнцем в двух направлениях. Последнее условие не только усложняет конструкцию, но и требует более сложного привода следящего механизма.

Лекция 5. **Расчет параметров автономных солнечных электростанций**

5.1. Выбор концентраторов и систем слежения

Для автономного электроснабжения на основе использования энергии солнечного излучения наиболее приемлемыми являются фотоэлектрические преобразователи, которые могут иметь фиксированный или следящий фотоприемник без концентратора или с концентратором солнечного излучения. Кроме того, они могут отличаться типом концентратора и точностью системы слежения. Все эти варианты имеют различные технико-экономические показатели и, следовательно, различную эффективность. Причем без соответствующего анализа нельзя отдать предпочтение какому-то конкретному варианту.

Предлагается наиболее эффективным считать вариант, имеющий наибольшую конкурентоспособность. Конкурентоспособность определяется стоимостью получаемой электроэнергии и надежностью получения этой электроэнергии. Для сравнения этих показателей необходимо добиться равенства одного из них, например, надежности. Причем показатель надежности должен быть на очень высоком уровне, так как при низкой надежности энергообеспечения эффективности вариантов сглаживаются.

Наибольшую надежность будет иметь вариант с дублированием солнечной электростанции топливной электростанцией. Однако если учесть общую стратегию развития энергетики (отказ от применения углеводородного ископаемого топлива), то дублирование топливной электростанцией может рассматриваться, как промежуточный вариант, а более перспективным будет солнечная электростанция с аккумулированием электроэнергии. Кроме того, необходимо рассмотреть возможность

повышения эффективности использования фотоэлектрических преобразователей за счет концентрирования солнечного излучения.

Стоимость концентраторов и систем слежения соизмеримы, кроме того системы слежения требуют собственных затрат электроэнергии, соизмеримой с нагрузкой. Это обусловливает задачу отыскания наиболее эффективного варианта автономной солнечной электростанции.

Учитывая, что тип концентратора не только диктует требования к системе слежения, но определяет и площадь батареи фотоэлектрических преобразователей, целевую функцию в рамках поставленной задачи можно представить в следующем виде:

$$\frac{C_К + C_{СЛ} + C_{ФЭП}}{W} \to \min \qquad (5.1)$$

где $C_К$, $C_{СЛ}$, $C_{ФЭП}$ – соответственно стоимость концентраторов, системы слежения и батареи ФЭП, руб.;

W – вырабатываемая за равный период электроэнергия, кВт.ч.

Стоимость концентраторов практически не зависит от его главного угла (предельного угла попадания лучей света), а зависит только от их типа. Стоимость системы слежения в первом приближении можно принять пропорциональной суточному количеству шагов наведения. Стоимость фотоэлектрических преобразователей пропорциональна их площади. Если принять площадь батареи фотоэлектрических преобразователей для всех вариантов одинаковой, например, равной 1 $м^2$, то из целевой функции (5.1) можно исключить последнее слагаемое, но при этом будет различно количество вырабатываемой энергии, так как параболические концентраторы способны собирать и часть рассеянного солнечного из-

лучения, которое может преобразовываться в дополнительную электроэнергию.

Вырабатываемая солнечной электростанцией энергия может быть определена по формуле:

$$w = \int_0^t N_C \eta_C t dt \qquad (5.2)$$

Или переходя от интегрирования к дискретному суммированию (что соответствует метеорологическим данным), получаем:

$$w = \Sigma (N_{Cj} \eta_{Cj} t_j) \qquad (5.3)$$

Здесь N_{Cj} – интенсивность солнечного излучения в фокусирующей плоскости, кВт/м^2;

η_{Cj} – к.п.д. батареи ФЭП при j-той интенсивности;

t_j – продолжительность периода с j-той интенсивностью, час;

w – электроэнергия, получаемая с единичной площади батареи фотоэлектрических преобразователей, кВт.ч/м^2.

В формуле (5.3) наибольшую трудность представляет определение к.п.д. батареи фотоэлектрических преобразователей в зависимости от ее облученности. Известна следующая зависимость к.п.д. от степени концентрации и температуры /7, 11/:

$$\eta_C = \eta_0 (1 + \beta \ln K)(1 - \chi \Delta T) \qquad (5.4)$$

где: η_0 – к.п.д. ФЭП без концентратора;

β – коэффициент, соответствующий однократному солнечному излучению;

χ – температурный градиент, зависящий от типа концентратора $град^{-1}$;

ΔT – приращение температуры в результате концентрации солнечного излучения, град.

Применение зависимостей (5.3) и (5.4) дает приблизительные результаты, так как не учитывается неравномерное облучение фотоэлектрических преобразователей при использовании параболических концентраторов. Тем не менее, если угол фокона не превышает 30^{o}, расчет достаточно точен и может использоваться при выборе варианта системы электроснабжения. Система слежения при таком угле должна обеспечивать изменение параметров наведения 3 раза в сутки.

С учетом особенностей концентраторов расчетным путем получено, что параболические концентраторы с апреля по октябрь позволяют получить с 1 $м^2$ кремниевых фотоэлектрических преобразователей 3650 Вт.часов электроэнергии постоянного тока, в то время, как концентраторы первого порядка 2900 Вт.часов /6/. То есть, применение параболических концентраторов позволяет получить на 26% больше электроэнергии постоянного тока.

На основании полученных данных и осредненных стоимостных показателей элементов солнечной электростанции были проведены сравнительные предварительные расчеты для различных вариантов (рисунки 5.1, 5.2) из которых следует, что наиболее конкурентоспособным вариантом является система слежения с трехкратным наведением и параболическими концентраторами. При этом принято, что стоимость системы слежения с параболическими концентраторами составляет 0,8 – 0,2 от стоимости системы слежения с концентраторами прямого излучения.

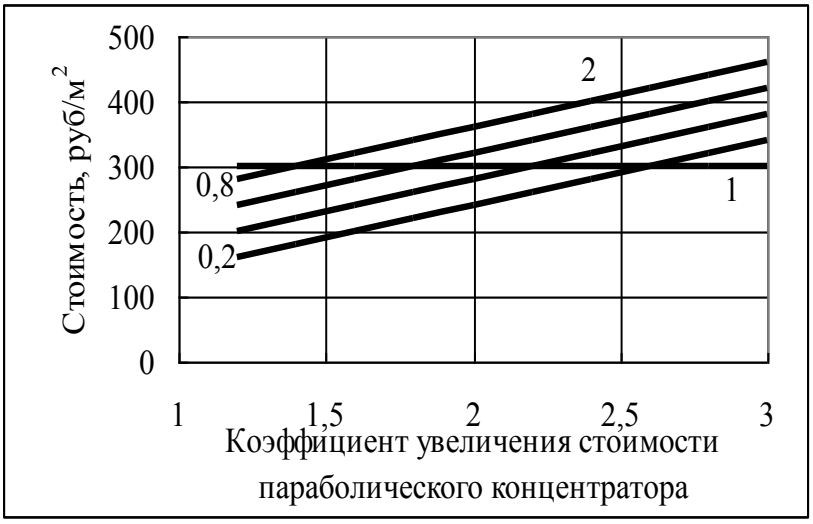


Рисунок 5.1. Стоимость системы концентрирования и слежения

1 – концентраторы первого порядка,

2 – параболические концентраторы

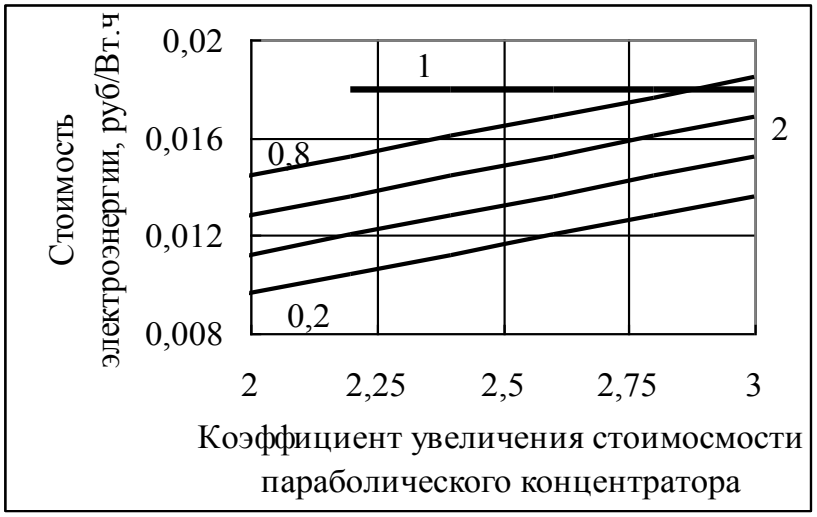


Рисунок 5.2. Стоимость электроэнергии

1 – концентраторы первого порядка,

2 – параболические концентраторы

Как следует из проведенного анализа стоимость электроэнергии (без учета стоимости фотоэлектрических преобразователей и аккумуляторов) с параболическими концентраторами и системой слежения с трехкратным

наведением более конкурентоспособна по сравнению с концентраторами прямого солнечного излучения.

Однако, учитывая возможные ошибки при вычислении получаемой электроэнергии, обусловленные влиянием местного перегрева фотоэлектрических преобразователей при концентрировании рассеянного солнечного излучения, был проведен сравнительный эксперимент, в ходе которого были установлены энергетические характеристики альтернативных систем концентрирования и слежения. В результате было установлено, что применение концентраторов первого порядка позволяет получить за летний (наиболее эффективный) период 2050 Вт.ч, а применение концентраторов второго порядка 2370 Вт.ч. То есть, тенденция увеличения во втором случае сохраняется, но прибавка составляет только 16%. Разница в стоимости электроэнергии при этом находится в интервале 35 – 3%.

Учет стоимости батарей фотоэлектрических преобразователей и аккумуляторов (собственно стоимости солнечной электростанции) снижает экономию в 2 – 5 раз, то есть переводит экономию в разряд не значительной, находящейся в пределах ошибки. То есть, системы концентрирования с этой точки зрения практически равнозначны.

Но так как концентраторы первого порядка требуют практически непрерывного перемещения, их применение влечет значительное увеличение потребления электроэнергии на привод системы слежения. Кроме того, концентраторы первого порядка имеют бóльшую поверхность и парусность, что требует повышенных мощностей для их перемещения. В некоторых случаях расход электроэнергии на привод системы слежения может быть соизмерим с электроэнергией, потребляемой полезными электроприемниками.

В этой связи, рекомендуется на объектах с установленной мощностью до 500 Вт не применять концентрирующие системы, на объектах с установленной мощностью 500 – 1000 Вт применять концентраторы первого поряд-

ка, на объектах с установленной мощностью более 1000 вт применять концентраторы второго порядка.

5.2. Расчет параметров автономной электростанции на фотоэлектрических преобразователях

Задачу использования солнечной электростанции для автономного электроснабжения небольших сельских потребителей можно сформулировать следующим образом: необходимо обеспечить электроснабжение потребителя, имеющего случайный график нагрузок, от источника энергии случайной мощности при минимальных затратах, при ограничении – электроснабжение на основе солнечной электростанции должно быть не менее надежно, чем традиционное.

Суточное электропотребление какого-либо абстрактного объекта можно представить графиком (рисунок 5.3).

Для удовлетворения потребности в электроэнергии можно либо использовать источник электроэнергии мощностью, обеспечивающей суточное энергопотребление (если позволяет график нагрузки), либо использовать источник меньшей мощности, но с аккумулированием энергии в периоды провала нагрузки и с отдачей аккумулированной энергии в часы пиковой нагрузки. Так как стоимость аккумуляторов априорно меньше стоимости солнечной электростанции на фотоэлектрических преобразователях, и солнечное излучение отсутствует в ночные часы, то второй вариант в соответствии с поставленной задачей будет предпочтительнее.

Если мощность источника энергии постоянна, то, при аккумулировании энергии в периоды провалов, генерируемую мощность можно выбрать из условия /5, 6/:

$$\sum(N_Г - N_{Пj})\, t_{1j}\, \eta_A = \sum(N_{Пi} - N_Г)\, t_{2i} \qquad (5.5)$$

где: $N_Г$ – генерируемая мощность, кВт;

N_{1j} – мощность потребителя в j-тый период, меньшая, чем генерируемая мощность, кВт;

N_{2i} – мощность потребителя в i-тый период, большая, генерируемая мощность, кВт;

t_{1j} – продолжительность j-того периода, час;

t_{2i} – продолжительность i-того периода, час;

η_A – к.п.д. аккумулятора энергии.

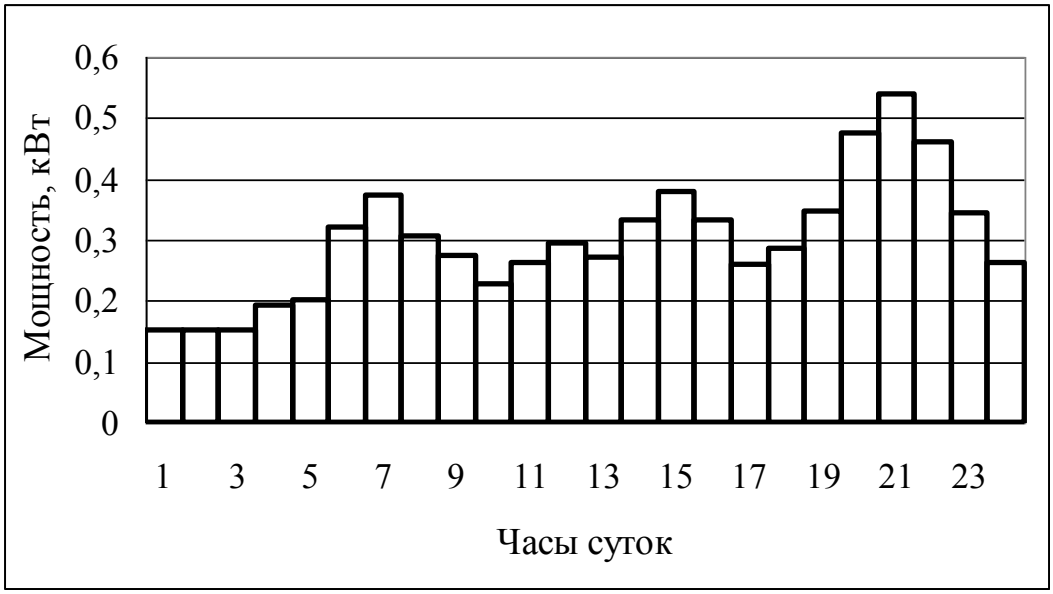


Рисунок 5.3. График нагрузки абстрактного объекта электропотребления

В уравнении (5.5) левая часть представляет собой избыточную энергию, которая может быть аккумулирована. К.п.д. аккумулятора учитывает, что в последующем в пиковую нагрузку можно выдать только часть аккумулированной энергии.

Уравнение (5.5) является трансцендентным и его следует решать графически относительно генерируемой мощности. На рисунке 5.4 показан пример такого решения для приведенной абстрактной нагрузки для летних месяцев при $\eta_A = 0,7$ и среднегодовом поступлении солнечной энергии в этот период на территории Ростовской области..

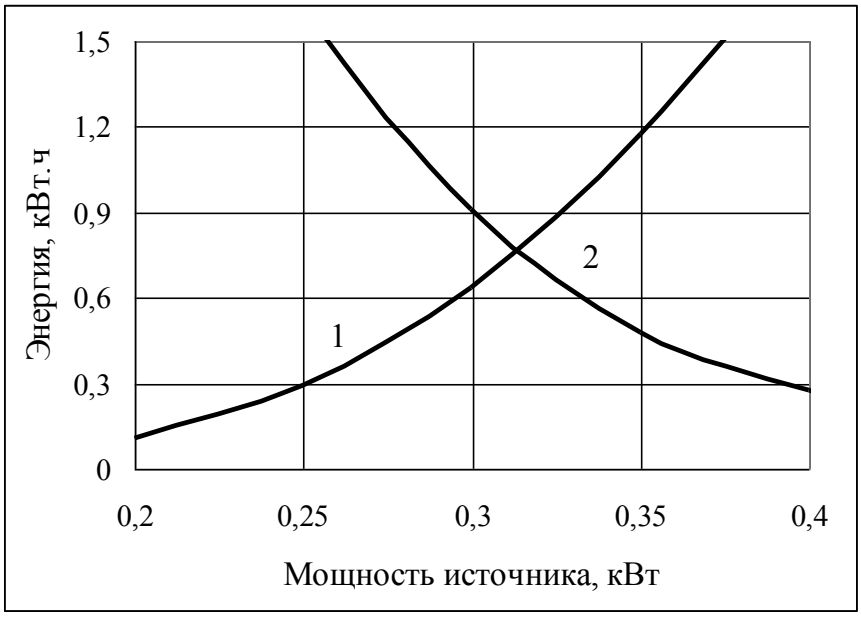


Рисунок 5.4. Графическое решение уравнения (5.5)
1 – левая часть, 2 – правая часть

В приведенном примере минимальная мощность источника энергии должна быть равной 0,32 кВт.

Для удовлетворения ограничения целевой функции необходимо учитывать особенность поступления солнечной энергии, которая определяет мощность генерируемой ФЭП электроэнергии при случайной интенсивности солнечного излучения. С учетом этого вероятностью энергообеспечения будет вероятность того, что энергии солнечного излучения будет достаточно для удовлетворения потребностей в получаемой электроэнергии. Минимальное

значение мощности батареи фотоэлектрических преобразователей при этом можно определить из равенства /5, 6/:

$$\sum(N_{Фj} - N_{1j})\, t_{1j}\, \eta_A = \sum(N_{2i} - N_{Фi})\, t_{2i} \qquad (5.6)$$

где: $N_{Фj}$ – мощность батареи фотоэлектрических преобразователей в j-тый период, превышающая мощность потребителя в этот же период, кВт;

$N_{Фi}$ – мощность батареи фотоэлектрических преобразователей в i-тый период, меньшая мощности потребителя в этот же период, кВт.

Учитывая, что мощность фотоэлектрического преобразователя определяется из условия

$$N_Ф = N_C\, F_Ф\, \eta_Ф \qquad (5.7)$$

уравнение (5.6) можно записать в следующем виде:

$$\sum(N_{Cj}\, F_Ф\, \eta_Ф - N_{1j})\, t_{1j}\, \eta_A = \sum(N_{2i} - N_{Ci}\, F_Ф\, \eta_Ф)\, t_{2i} \qquad (5.8)$$

Здесь: N_{Cj} – удельная мощность солнечного излучения в j-тый период, кВт/м^2;

$F_Ф$ – площадь батареи фотоэлектрических преобразователей, м^2;

$\eta_Ф$ – к.п.д. батареи фотоэлектрических преобразователей.

Уравнение (5.10) относительно площади батареи фотоэлектрических преобразователей также решается графически. На рисунке 5.5 показан пример такого решения для прежней нагрузки при следящей системе

батареи фотоэлектрических преобразователей без концентраторов. Полученная в результате этого площадь батареи фотоэлектрических преобразователей равна 58 м^2, что обеспечивает вероятность энергообеспечения не менее 0,9. Как видно с увеличением вероятности энергообеспечения площадь батареи фотоэлектрических преобразователей растет.

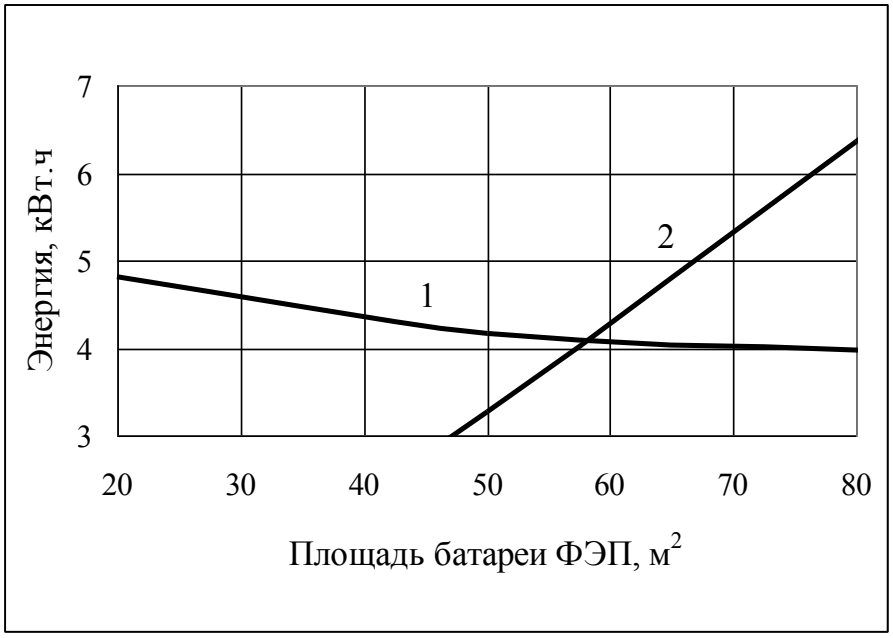


Рисунок 5.5. Решение уравнения (5.8)
при вероятности энергообеспечения 0,9
1 – левая часть, 2 – правая часть

Определенная таким образом площадь батареи фотоэлектрических преобразователей будет достаточной для зарядки аккумуляторов и питания нагрузки с заданной вероятностью энергообеспечения в течение расчетного периода. То есть, расчетная площадь фотоэлектрических преобразователей способна в летнее время обеспечить заданную нагрузку в течение 1990 часов, что составляет 0,9 от расчетного периода. В остальное время (220 часов)

нагрузка будет удовлетворяться не менее, чем на 50%. Емкость аккумуляторов при этом можно определить из соотношения /5, 6/:

$$C_A = \sum \frac{(N_{2i} - N_{Ci} F_Ф \eta_Ф) t_{2i}}{U_H} \qquad (5.9)$$

где C_A – емкость аккумуляторной батареи, А.ч.;

U_H – номинальное напряжение потребителя, В.

Таким образом, для данного примера (при вероятности энергообеспечения 0,9) площадь фотоэлектрических преобразователей должна быть 60 $м^2$, а емкость батареи аккумуляторов (при напряжении потребителей U_H = 220 В) 20 А.ч, или общая емкость аккумуляторов 380 А.ч.

5.3. Методика массовых расчетов автономных солнечных электростанций

В процессе инженерных расчетов определяются оптимальные параметры автономных энергетических комплексов, приводящие к их наиболее высокой конкурентоспособности. В п.п. 5.1, 5.2 приведена теория и получены основные методические положения построения автономных солнечных электростанций на основе фотоэлектрических преобразователей. Однако, для выбора и проектирования автономных систем электроснабжения для конкретных условий (для конкретного заказчика) применение полученных методических положений затруднительно ввиду необходимости оптимизации параметров автономных энергетических комплексов для каждого конкретного случая.

Для проведения расчетов параметров автономных солнечных электростанций для массовых заказчиков желательно иметь инженерные ме-

тоды, позволяющие получать искомые оптимальные параметры более простыми способами без поиска экстремумов целевых функций. В основе таких расчетов могут быть различные эмпирические функции (например, функции уравнений линейной регрессии), графики и таблицы, описывающие зависимости оптимальных параметров от влияющих факторов. Получить такие зависимости можно путем описания движения оптимального параметра в области изменения влияющих на него факторов.

В таблице 5.1 приведены оптимальные параметры автономной системы электроснабжения удаленных сельских объектов на основе использования энергии солнечного излучения, а на рисунках 5.6 и 5.7 приведены графики этих параметров в зависимости от средней потребляемой мощности электроприемников и требуемой надежности электроснабжения /5, 6/.

Таблица 5.1

Расчетные параметры автономного энергетического комплекса сезонно работающих объектов

Средняя нагрузка объекта, Вт	Площадь ФЭП ($м^2$) при вероятности энергообеспечения:					Емкость аккумуляторной батареи (А.ч) при вероятности энергообеспечения				
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
200	22,3	26,0	29,0	31,2	35,5	190	190	190	185	170
250	28,0	32,5	35,8	38,3	44,5	240	230	225	215	225
300	33,0	38,5	42,5	46,0	53,0	275	260	250	250	270
350	38,5	44,7	49,3	53,5	62,0	310	285	285	295	310
400	43,5	51,0	56,7	61,0	71,0	330	330	340	340	355

Так как оптимальные размеры батареи фотоэлектрических преобразователей и емкость аккумуляторных батарей зависят от двух исходных параметров – средней нагрузки потребителя и надежности энергообеспечения (см. таблицу 5.1), то можно построить поверхности отклика этих параметров

автономной системы электроснабжения (рисунки 5.8 и 5.9). Полученные поверхности отклика достаточно точно описываются уравнениями регрессии третьей степени.

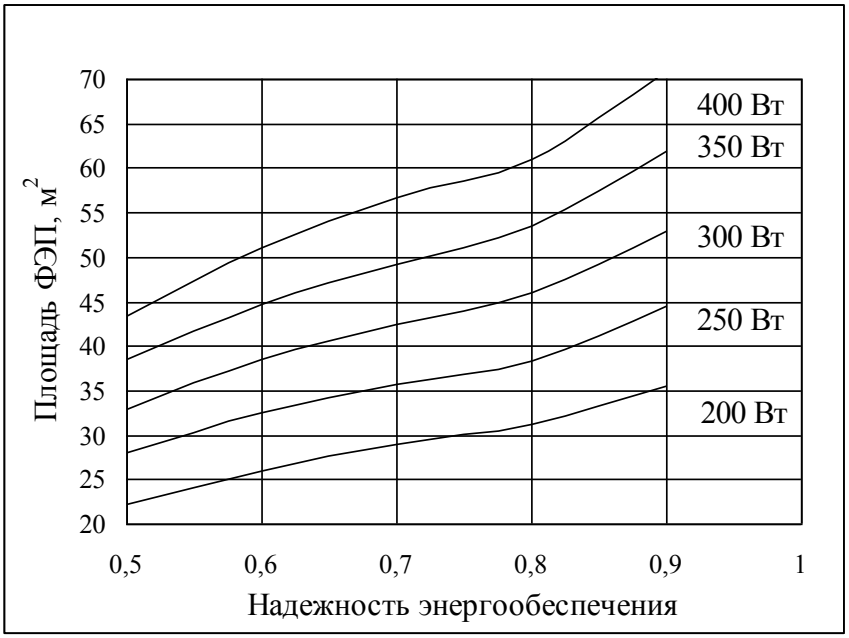


Рисунок 5.6. Размеры батареи фотоэлектрических преобразователей в зависимости от нагрузки и надежности энергообеспечения

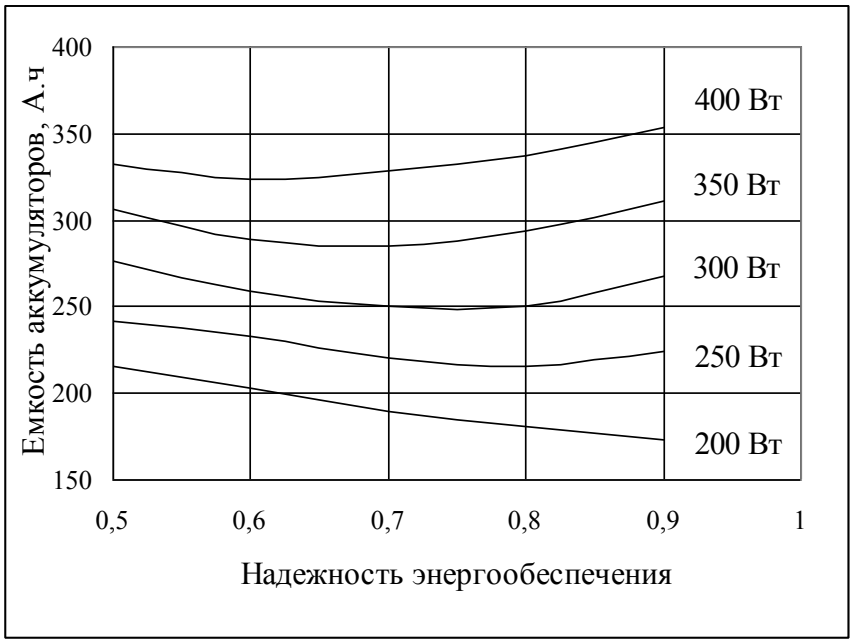


Рисунок 5.7. Емкость аккумуляторных батарей в зависимости от нагрузки и надежности энергообеспечения

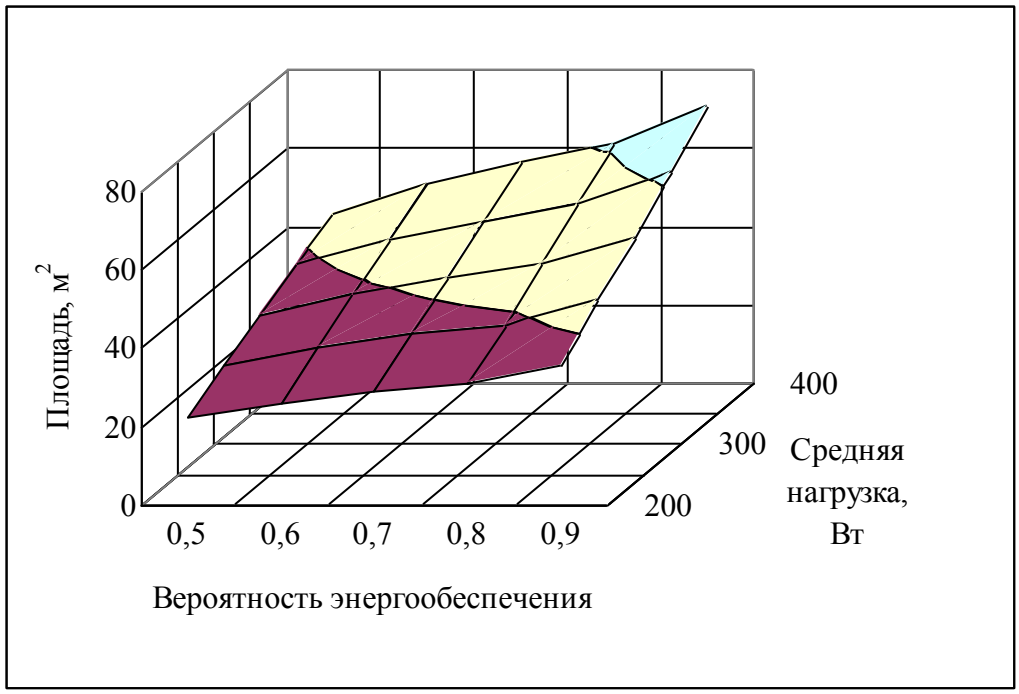


Рисунок 5.8. Оптимальная площадь батареи ФЭП

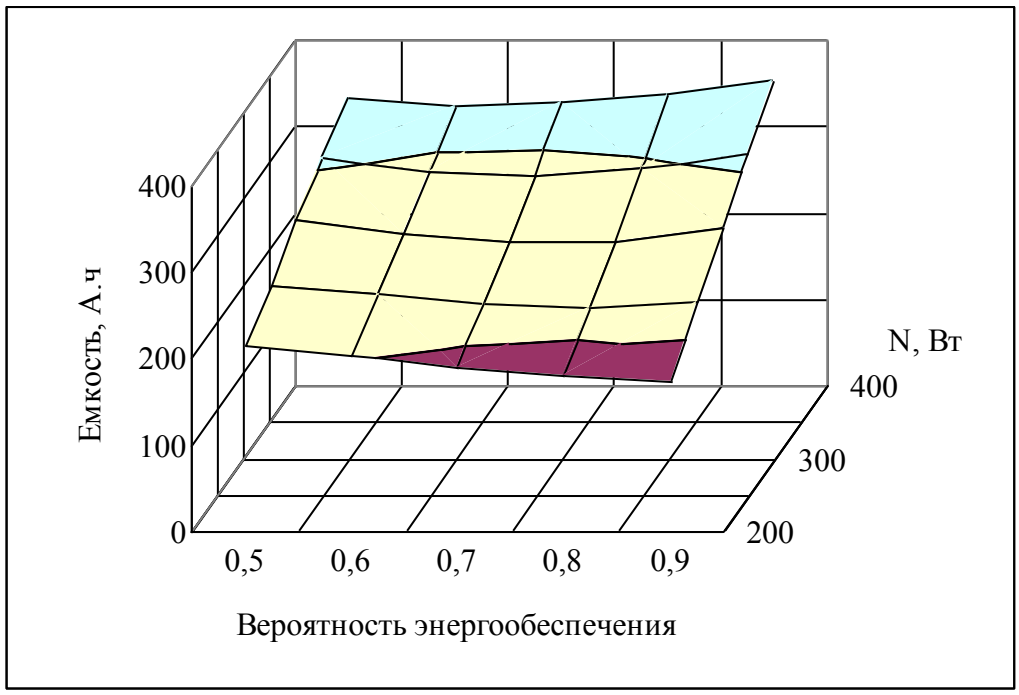


Рисунок 5.9. Оптимальная емкость аккумуляторной батареи

$$F = 0{,}066x_1 + 596x_2 + 0{,}168x_1x_2 - 0{,}0002x_1^2 - 894x_2^2 + \\ + 1{,}9E\text{-}07x_1^3 + 435x_2^3 - 131 \qquad (5.10)$$

$$C_A = 0{,}449x_1 - 370x_2 + 0{,}786x_1x_2 - 0{,}0013x_1^2 - 216x_2^2 + \\ + 1{,}9E\text{-}06x_1^3 + 288x_2^3 + 303 \qquad (5.11)$$

Здесь: x_1 – среднесуточная нагрузка, Вт;

x_2 – заданная вероятность энергообеспечения.

По полученным уравнениям регрессии можно проводить массовые расчеты параметров автономных солнечных электростанций на фотоэлектрических преобразователях солнечного излучения. В случае применения концентраторов солнечного излучения и систем слежения площадь батарей фотоэлектрических преобразователей уменьшается и определяется по формуле:

$$F_{УТ} = k_{УТ} F \qquad (5.12)$$

где $F_{УТ}$ – уточненное значение площади батарей фотоэлектрических преобразователей, $м^2$;

F – площадь батареи фотоэлектрических преобразователей по формуле (5.10), $м^2$;

$k_{УТ}$ – коэффициент уточнения.

Значения коэффициентов уточнения площади батарей фотоэлектрических преобразователей приведены в таблице 5.2 /6/.

Таблица 5.2

Значения коэффициентов уточнения

Вариант	Коэффициент уточнения
1. Система точного слежения без концентраторов	0,75
2. Параболические концентраторы с периодическим слежением и коэффициентом концентрации:	
до 3;	0,65
3 – 5;	0,55
больше 5.	0,50
3. Концентраторы первого порядка с системой точного слежения и коэффициентом концентрации:	
до 3;	0,65
больше 3.	0,55

5.4. Особенности расчета автономной солнечной электростанции для передвижной пасеки

В сельском хозяйстве очень много объектов, которые имеют производственную нагрузку в дневное время и бытовую в ночное время. То есть, производственная нагрузка совпадает с периодом солнечного сияния, хотя в утренние и вечерние часы, а также при пасмурной погоде интенсивность солнечного излучения может быть недостаточной для генерирования фотоэлектрическими преобразователями электроэнергии. Типичным представителем такого объекта являются передвижные пасеки. Передвижные пасеки,

кроме того, являются и уникальными объектами электроснабжения, допускающие применение только солнечных электростанций на фотоэлектрических преобразователях. Нежелательность применения иных автономных электростанций определяется следующим.

Топливные электростанции не могут использоваться на передвижных пасеках из-за вредных выбросов выхлопных газов и производимого шума. Ветроэлектростанции являются стационарными сооружениями, требующими фундамента, и также не могут использоваться для электроснабжения передвижных пасек. Кроме того, шум, производимый ветроэлектростанциями, также оказывает вредное воздействие на пчел. Формально могут использоваться электрохимические аккумуляторы с зарядкой их в стационарных условиях и последующей доставкой. Однако регулярная замена аккумуляторов для передвижной пасеки не всегда осуществима из-за отсутствия дорог с твердым покрытием к месту ее расположения.

Таким образом, можно заключить, что уже в настоящее время энергия солнечного излучения является наиболее приемлемой для использования в автономных системах электроснабжения передвижных пасек и не имеет серьезных альтернатив.

При обосновании варианта солнечной электростанции необходимо учитывать требования со стороны потребителя.

Передвижные пасеки комплектуются из мобильных модулей, расположенных на автотракторных прицепах. Каждый модуль содержит 20 – 25 ульев и может быть оборудован помещением для дежурного персонала. Потребители электрической энергии характеризуются графиком нагрузки, и проявляются в виде возмущающих воздействий. Для серийного освоения автономных солнечных электростанций для передвижных пасек необходимо иметь усредненные или типичные графики нагрузки. Кроме того, наличие таких графиков является необходимым условием конкретизации параметров автономной солнечной электростанции.

На передвижной пасеке могут иметь место следующие потребители энергии (таблица 5.3).

Таблица 5.3.

Потребители электроэнергии модуля передвижной пасеки на 20 – 25 ульев

Потребитель	Количество	Мощность, Вт	Род тока
1. Лампа люминесцентная	2	8х2=16	Постоянный, переменный.
2. Минителевизор	1	15	То же
3. Радиоприемник	1	1	То же
4. Автохолодильник	1	37	Постоянный
5. Медогонка	1	60	То же
6. Электронож	1	15	То же

Освещение применяется только в бытовой комнате дежурного персонала. Наружное постоянное освещение пасеки не допускается технологией содержания пчел. Бытовые приборы (минителевизор, радиоприемник) применяются периодически. Автохолодильник используется постоянно с циклом работы 1/3 (1/3 работы, 2/3 простоя).

Производственными потребителями являются медогонка и электронож. Рекомендуется применять медогонку с приводом ПЭМ-60. Электрический привод ПЭМ-60 для медогонки предназначен для использования, как на крупных, так и на малых, любительских, пасеках при производстве товарного меда в полевых и стационарных условиях.

Электропривод может быть установлен на стандартных хордовых двух, трех или четырех рамочных медогонках. Применение данного электропривода резко сокращает трудоемкость работ и затраты времени при откачке товарного меда и, как следствие, обеспечивает получение большего количества меда.

Технические характеристики электропривода ПЭМ-60 следующие:

- тип электропривода – импульсный;
- номинальное напряжение питания – 12В;

- мощность электродвигателя – 60вт;
- потребляемая энергия (средняя) – 30 Вт.час;
- рабочий диапазон напряжения питания – от 8 до 15В;
- режим работы – продолжительный, экономичный;
- скорость вращения – регулируемая от 30 до 150 об/мин;
- режим вращения – стабилизированный;
- контроль напряжения аккумулятора – 15 В,10 В, 8 В визуальный;
- масса привода - 1,7 кг.

Электропривод работает в импульсном режиме, подталкивая медогонку. Время работы привода в течение часа составляет 13,3 минуты, за рабочий день 10 часов откачивается 10 ульев (1 улей/час).

Анализируя состав потребителей электроэнергии, видно, что все они могут потреблять электроэнергию постоянного тока. Следовательно, для автономной солнечной электростанции передвижной пасеки не нужен инвертор напряжения.

Еще одной особенностью работы потребителей энергии передвижной пасеки является то, что медогонка и электронож (основные производственные потребители) работают с июня по сентябрь. В октябре пасека переводится на зимнее содержание, и последняя отгонка меда производится в стационарных условиях от централизованной системы электроснабжения.

Графики работы потребителей электрической энергии приведены на рисунках 5.10 – 5.12.

Как следует из приведенных графиков бытовые потребители электроэнергии и освещение, в основном, работают в ночное время, то есть в период отсутствия энергии солнечного излучения. Медогонка и электронож, напротив, используются в дневное время. Причем при пуске медогонки возникает пусковой ток, что необходимо учитывать при обосновании схемы электроснабжения. Учитывая, что электродвигатель работает в импульсном режиме, то всплески тока будут происходить достаточно часто.

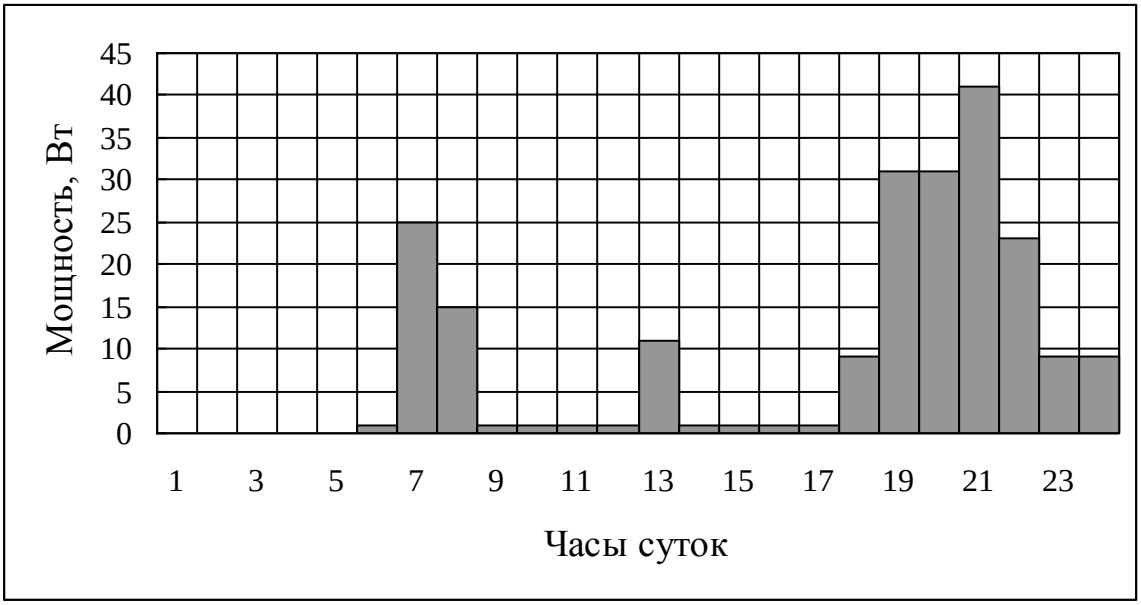


Рисунок 5.10. График работы потребителей электроэнергии (апрель)

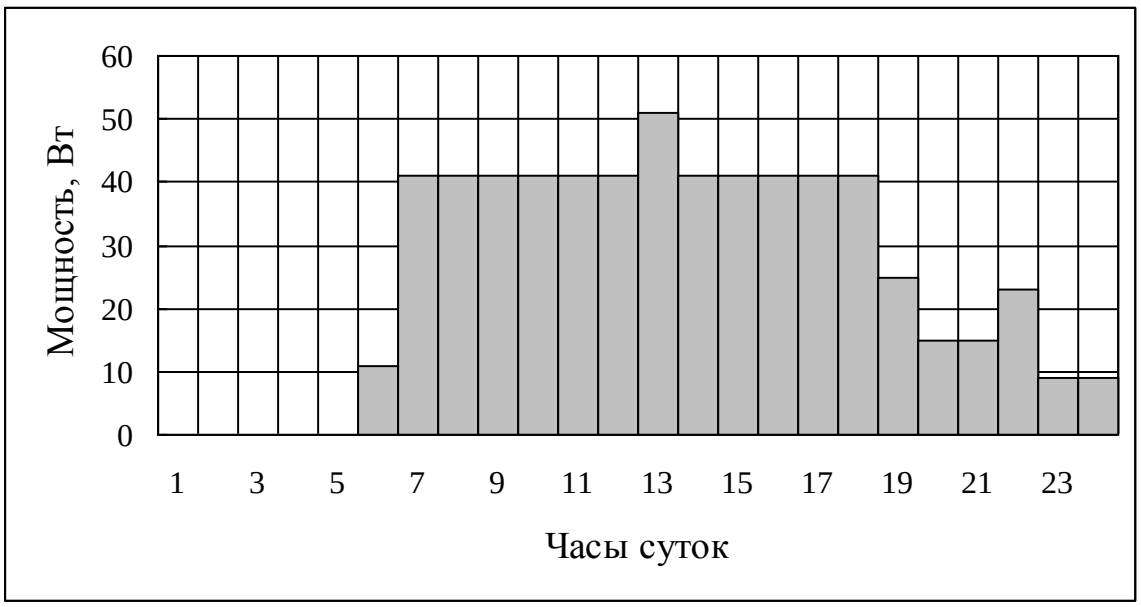


Рисунок 5.11. График работы потребителей электроэнергии (июль)

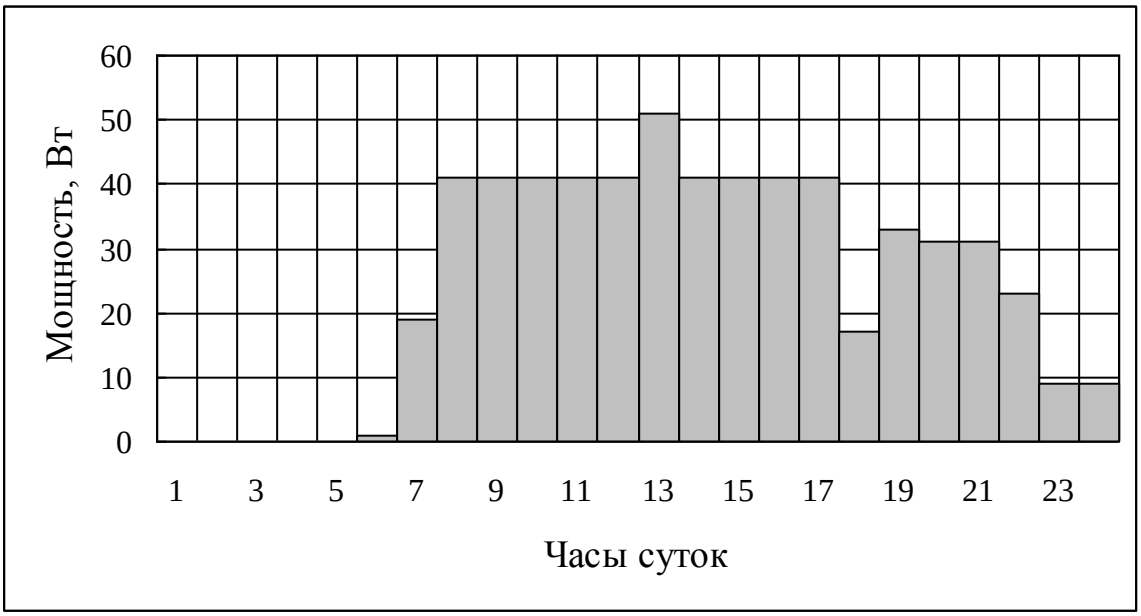


Рисунок 5.12. График работы потребителей электроэнергии (сентябрь)

Еще одной особенностью работы потребителей энергии передвижной пасеки является то, что медогонка и электронож (основные производственные потребители) работают с июня по сентябрь. В октябре пасека переводится на зимнее содержание, и последняя отгонка меда производится в стационарных условиях от централизованной системы электроснабжения.

Очевидно, наиболее напряженным периодом будет сентябрь, так как интенсивность солнечного излучения и продолжительность солнечного сияния в этот период меньше, чем летом. Кроме того, в этот же время увеличивается период использования освещения.

На основании анализа нагрузок потребителей электрической энергии, характеристик солнечного излучения, периферийных устройств и преобразователей энергии Солнца в электроэнергию, наиболее конкурентоспособной системой автономного электроснабжения на основе солнечной электростанции будет система, приведенная на рисунке 5.13.

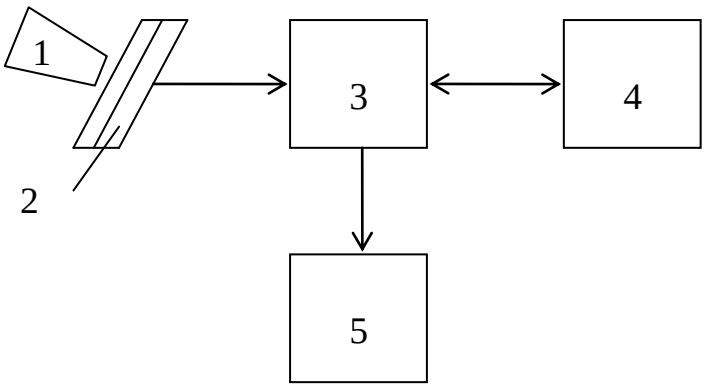


Рисунок 5.13. Автономная система электроснабжения на основе фотоэлектрических преобразователей с аккумуляторным резервом

1 – концентратор, 2 – фотоэлектрический преобразователь, 3 – коммутатор, 4 – аккумуляторная батарея с контролером режима заряда, 5 – потребители электроэнергии постоянного тока.

В процессе расчета ее параметров необходимо оптимизировать параметры ориентации батарей фотоэлектрических преобразователей, определить из условий достаточности площадь фотоэлектрических преобразователей и емкость аккумуляторных батарей с учетом графика нагрузки и поступления энергии солнечного излучения.

В данной электростанции аккумуляторы работают в квазибуферном режиме, который предусматривает их зарядку от батареи фотоэлектрических преобразователей и разрядку на дневных потребителей электроэнергии при отключении от фотоэлектрических преобразователей. Переключение батареи аккумуляторов на зарядку от ФЭП и разрядку на потребителей электроэнергии осуществляется коммутатором. Такой вариант автономной солнечной электростанции позволяет исключить прямую связь фотоэлектрических преобразователей с потребителями электроэнергии, имеющими пусковые токи и устранить их влияние на фотоэлементы.

Алгоритм управления зарядом и разрядом аккумуляторов приведен на рисунке 5.14.

Принципиальная электрическая схема автономной солнечной электростанции с квазибуферной схемой работы аккумуляторов приведена на рисунке 5.15. Схема осуществляет зарядку аккумуляторных батарей от фотоэлектрических преобразователей VD1 и коммутацию их на нагрузку R_H.

Слежение за состоянием аккумуляторных батарей и их коммутация производится при помощи микроконтроллера Atmel ATtiny461, который при помощи встроенного компаратора (выводы PA5-PA7) обрабатывает сигналы, полученные от аккумуляторных батарей, и в зависимости от состояния каждой включает на нагрузку или заряжает их.

Сбор информации о состоянии аккумуляторных батарей производится посредством полевых транзисторов VT1, VT2, VT5, VT6, транзисторы VT3 и VT4 отвечают за зарядку аккумуляторных батарей, VT7 и VT8 за электроснабжение нагрузки. Управление всеми транзисторами производится подачей логического 0 или 1 с соответствующих портов микроконтроллера.

Площадь батарей фотоэлектрических преобразователей и емкости аккумуляторных батарей определяется исходя из следующих соображений.

Емкость заряженной аккумуляторной батареи должна обеспечить работу дневных производственных потребителей в течение периода, требуемого для зарядки второй аккумуляторной батареи с учетом работы ночных потребителей электроэнергии. Причем во время зарядки второй аккумуляторной батареи должна обеспечиваться работа дневных бытовых потребителей от источника энергии для зарядки (батареи фотоэлектрических преобразователей).

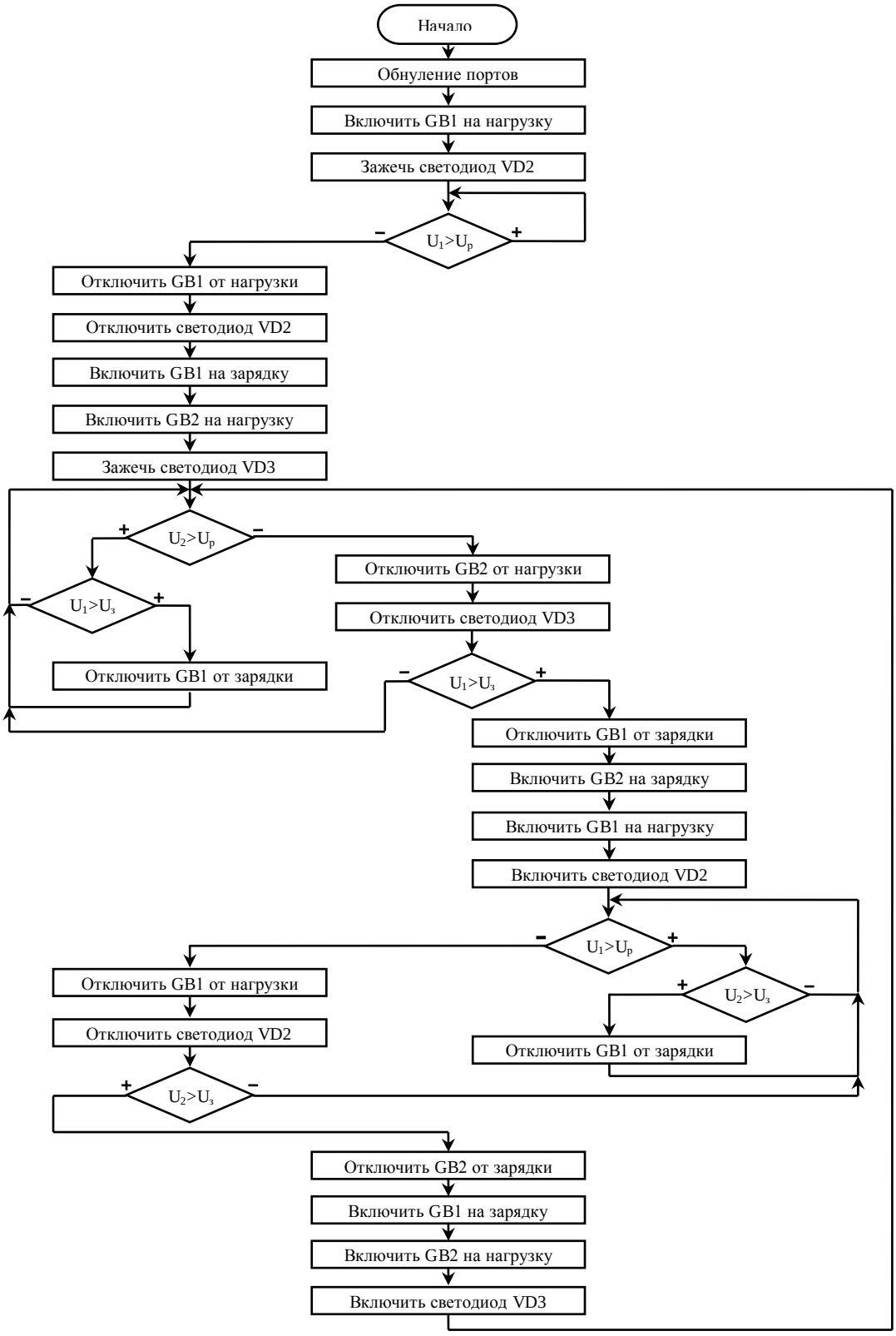


Рисунок 5.14. Алгоритм управления зарядом и разрядом аккумуляторов

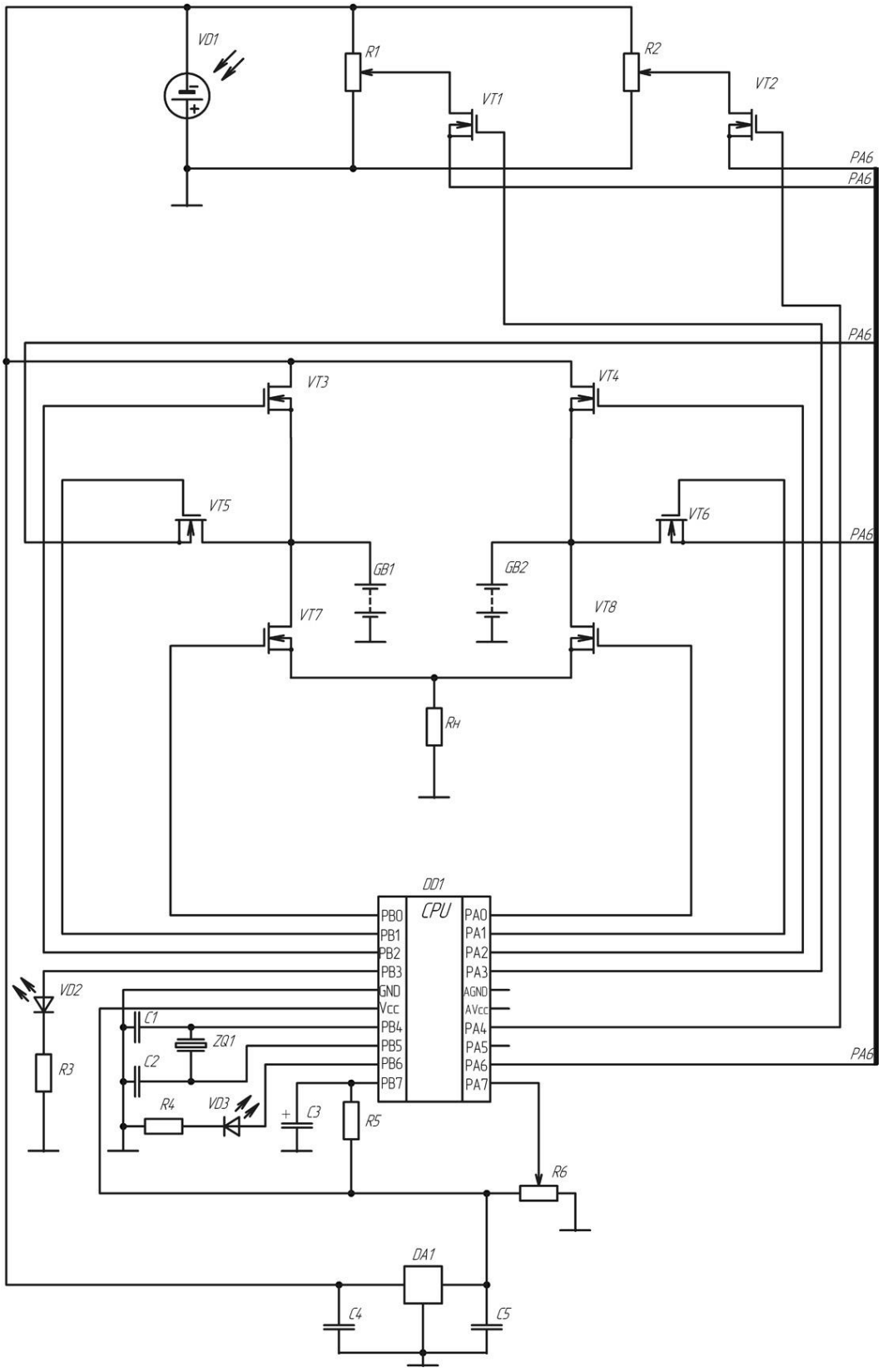


Рисунок 5.15. Схема электрическая принципиальная автономной солнечной электростанции с квазибуферной системой работы аккумуляторов

Учитывая принятый график работы передвижной пасеки, это условие можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} C_A U_{AP} = \sum\limits_j N_{ДПj} t_{ДПj} + \sum\limits_j N_{НБj} t_{НБj} \\ \sum\limits_i N_{СЭi} t_i = \left(\dfrac{C_A U_{АЗ}}{\eta_A} + n \sum\limits_j N_{ДБj} t_{ДБj} + (n-1) \sum\limits_j N_{НБj} t_{НБj} \right) k_{ЗАП} \end{cases} \quad (5.13)$$

где: C_A – емкость батареи аккумуляторов, А.ч;

U_{AP} – напряжение разряда аккумулятора, В;

$N_{ДПj}$ – мощность j-того дневного производственного потребителя, Вт;

$t_{ДПj}$ – время работы j-того дневного производственного потребителя в течение суток, час;

$N_{НБj}$ – мощность j-того ночного бытового потребителя, Вт;

$t_{НБj}$ – время работы j-того ночного бытового потребителя в течение суток, час;

$N_{СЭi}$ – мощность солнечной электростанции в i-тый период суток, Вт;

t_i – продолжительность i-того периода суток, час;

η_A – к.п.д. аккумулятора;

$U_{АЗ}$ – напряжение зарядки аккумулятора, В;

$N_{ДБj}$ – мощность j-того дневного бытового потребителя, Вт;

$t_{ДБj}$ – время работы j-того дневного бытового потребителя, час;

$k_{ЗАП}$ – коэффициент запаса мощности;

n – количество дней, предшествующих производственному циклу.

Если задать время работы дневных производственных и ночных бытовых потребителей электроэнергии, то решение системы уравнений (5.13) не

представляет трудностей. Искомое время работы можно определить исходя из технологии получения меда.

По технологии содержания пчел и производства меда откачка меда производится в течение 1 – 3 дней, так как откачка в течение большего времени может привести к возникновению, так называемого, пчелиного воровства и гибели пчелиных семей. По той же причине (предотвращение пчелиного воровства) откачке должны подвергаться все ульи пасеки. Кроме того, для предотвращения пчелиного воровства период откачки меда не должен быть меньше одного месяца.

Так как производительность электропривода медогонки ограничена, то параметры автономной солнечной электростанции удобно вести в расчете на 10 пчелиных ульев (откачка в течение одного дня, продолжительность цикла 10 часов). Режимы работы производственных дневных потребителей, являющихся нагрузкой на заряженный аккумулятор, при этих условиях имеют значения, представленные в таблице 5.4.

Таблица 5.4.

Параметры производственной нагрузки на заряженный аккумулятор

Потребитель электроэнергии	Мощность, Вт	Время работы в цикле, час
1.Электропривод медогонки ПЭМ-60	60	2,2
2. Электронож	15	1,0

Рабочему циклу будет предшествовать разрядка аккумулятора на ночные бытовые потребители в течение одной ночи перед откачкой меда. Нагрузка со стороны этих потребителей приведена в таблице 5.5.

На основании приведенных данных нагрузки можно из первого уравнения системы (5.13) определить необходимую емкость аккумулятора.

$$C_A = \frac{\sum_j N_{ДПj} t_{ДПj} + \sum_j N_{НБj} t_{НБj}}{U_{АР}} \qquad (5.14)$$

Таблица 5.5.

Параметры бытовой нагрузки на заряженный аккумулятор

Потребитель электроэнергии	Мощность, Вт	Время работы перед циклом, час
1.Лампа люминесцентная 1	8	0,5
2. Лампа люминесцентная 2	8	3,0
3. Автохолодильник	37	3,0
4. Минителевизор	5	3,0

В расчете на один цикл минимальная емкость аккумулятора составляет 25 А.ч. При средней продолжительности откачки меда два дня достаточная емкость аккумулятора 50 А.ч.

Мощность батареи фотоэлектрических преобразователей, необходимая для зарядки аккумулятора до требуемой емкости, рассчитывается по второму уравнению системы (5.13).

$$\sum_i N_{СЭi} = \frac{\left(\frac{C_A U_{АЗ}}{\eta_A} + n\sum_j N_{ДБj} t_{ДБj} + (n-1)\sum_j N_{НБj} t_{НБj} \right) k_{ЗАП}}{\sum_i t_i} \qquad (5.15)$$

Режимы работы дневных бытовых потребителей, определяющих второе слагаемое правой части (5.15), приведены в таблице 5.6.

С учетом того, что время работы ФЭП, предшествующее циклу откачки в сентябре, составляет не менее 28 дней, суммарное время работы фотоэлектрических преобразователей равно 28 * 15 = 420 часов.

Таблица 5.6.

Параметры дневной бытовой нагрузки на фотоэлектрические преобразователи

Потребитель электроэнергии	Мощность, Вт	Время работы в дневное время суток, час
1. Автохолодильник	37	5,0
2. Радиоприемник	1	3,0
3. Минителевизор	15	1,0

При к.п.д. аккумулятора 0,75 средняя достаточная мощность фотоэлектрических преобразователей составит 18 Вт.

При этом коэффициент запаса рассчитывается следующим образом:

$$k_{ЗАП} = \frac{1}{P(N_{СИ} \geq N_{Г})} \qquad (5.16)$$

где $P(N_{СИ} \geq N_{Г})$ – вероятность того, что интенсивность солнечного излучения будет не меньше заранее заданного гарантированного значения.

Таким образом, для зарядки аккумулятора и работы дневных бытовых потребителей энергии требуемая среднесуточная мощность фотоэлектрических преобразователей составляет 20 Вт. Для обеспечения такой мощности необходимо определить требуемую площадь фотоэлектрических преобразователей.

В отличие от известных методик расчета мощности топливных электростанций, следует учитывать, что мощность солнечной электростанции зависит от поступающей энергии солнечного излучения. С учетом этого, площадь фотоэлектрических преобразователей определяется исходя из следующих положений.

Электроэнергия, вырабатываемая фотоэлектрическими преобразователями, равна:

$$W_{СЭ} = nF_{ФЭП}\eta_{С}\sum_{i} N_{СИi}t_{i} \qquad (5.17)$$

где: $N_{СИi}$ – интенсивность солнечного излучения в i-тый период, Вт/м^2;

t_i – продолжительность i-того периода, час;

$F_{ФЭП}$ – площадь фотоэлектрических преобразователей, м^2.

Учитывая известную зависимость мощности и энергии, получаем:

$$\sum_{i} N_{СЭi}t_{i} = nF_{ФЭП}\eta_{С}\sum_{i} N_{СИi}t_{i} \qquad (5.18)$$

Откуда определяется достаточная площадь батареи фотоэлектрических преобразователей

$$F_{ФЭП} = \frac{\sum_{i} N_{СЭi}t_{i}}{n\eta_{С}\sum_{i} N_{СИi}t_{i}} \qquad (5.19)$$

На рисунке 5.16 приведен график интенсивности солнечного излучения на фиксированную площадку, гарантированной с вероятностью 0,9 с учетом работы параболоцилиндрических концентраторов солнечного излучения. При этом принято, что параболоцилиндрический концентратор будет работать только при интенсивности солнечного излучения не более 120 Вт/м^2, так как при более высоких значениях интенсивности и коэффициенте концентрации 8,5 к.п.д. фотоэлектрического преобразователя будет снижаться.

На рисунке 5.17 приведен график зависимости мощности фотоэлектрических преобразователей от площади батареи.

В соответствии с приведенной интенсивностью солнечного излучения, получаем, что площадь батарей фотоэлектрических преобразователей, вы-

численная по условиям достаточности, должна быть не менее 0,4 м^2 без концентраторов солнечного излучения, и 0,3 м^2 с применением концентраторов в утренние и вечерние часы.

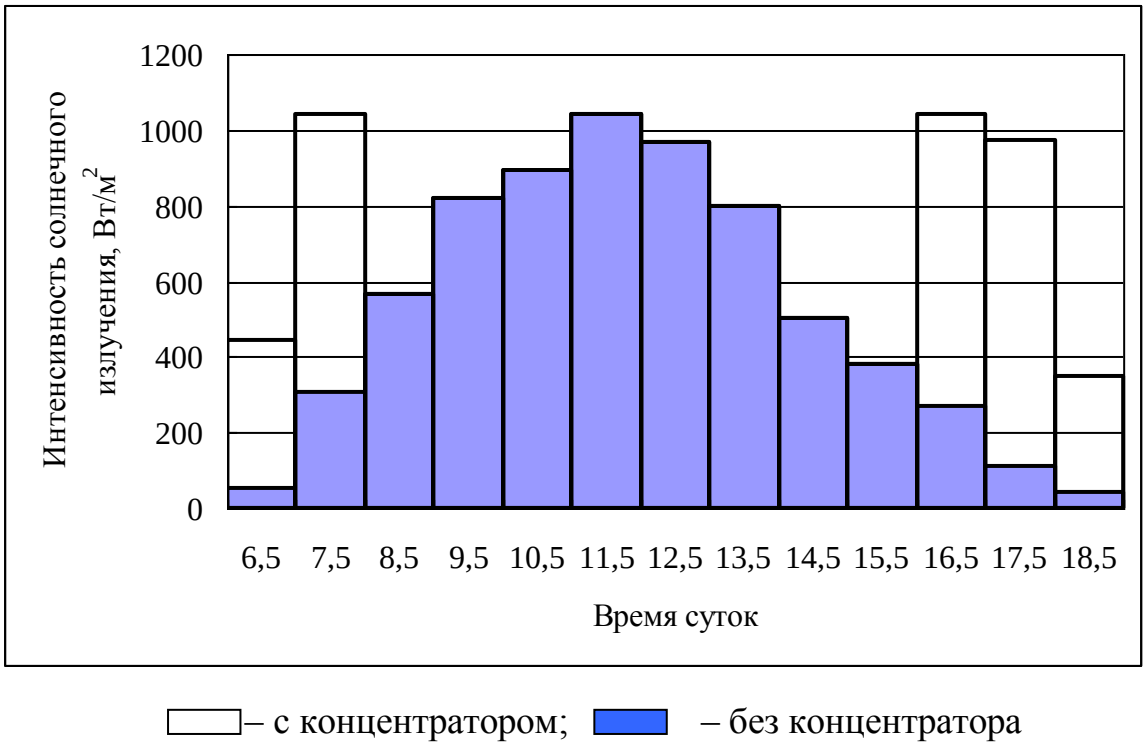


Рисунок 5.16. График интенсивности солнечного излучения на фиксированную батарею ФЭП (сентябрь)

Таким образом, применение концентраторов солнечного излучения позволит уменьшить площадь батареи фотоэлектрических преобразователей более чем на 30%. Кроме того, повышается надежность электроснабжения, так как обеспечивается зарядка аккумулятора и в пасмурную погоду.

Исходя из полученных результатов, для пасечного модуля можно принять следующий состав батареи модулей фотоэлектрических преобразователей (рисунок 5.18). Учитывая линейное расположение батареи фотоэлектрических преобразователей целесообразно использовать параболоцилиндрический фоклин, открытый с торцов. Такой концентратор обеспечивает попадание лучей утреннего и вечернего Солнца без переориентирования.

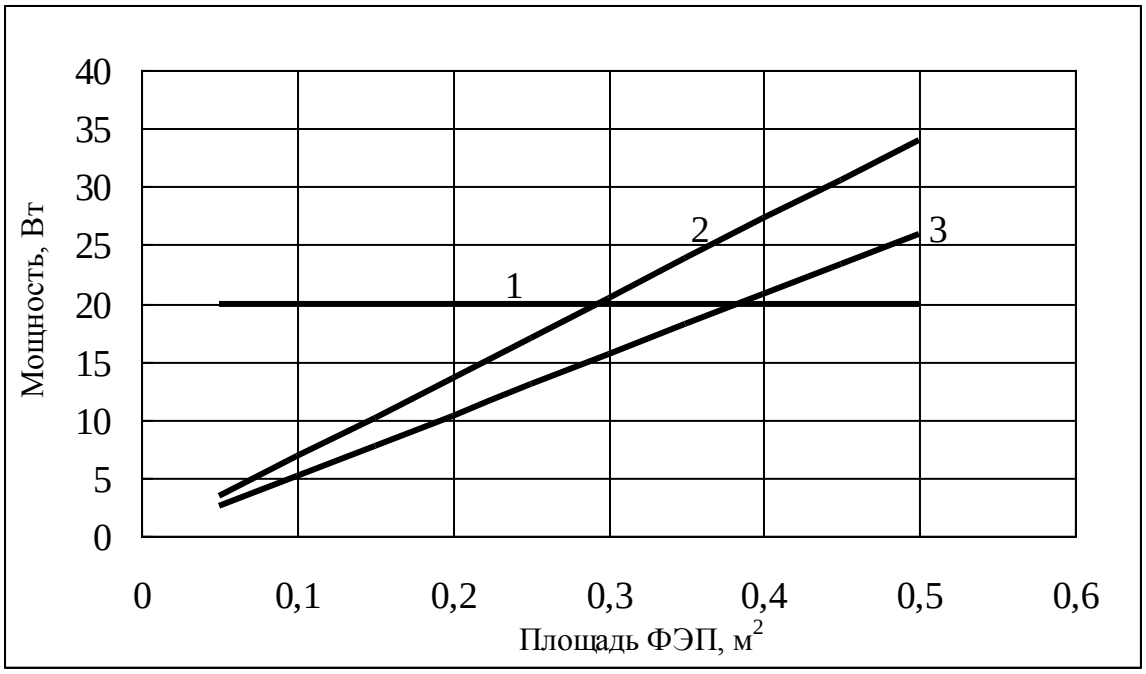


Рисунок 5.17. Зависимость мощности ФЭП от площади солнечных батарей

1 – требуемая среднесуточная мощность ФЭП; 2 – мощность ФЭП с концентратором солнечной энергии; 3 – мощность ФЭП без концентратора солнечной энергии

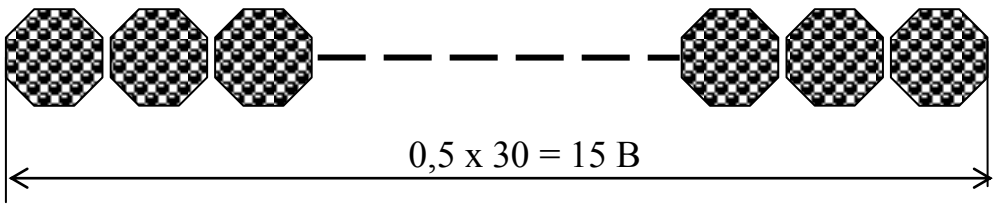


Рисунок 5.18. Состав батареи фотоэлектрических преобразователей

Вопросы для самоконтроля

1. По какому критерию выбираются концентраторы и системы слежения?
2. В чем отличие методик выбора топливной электростанции и солнечной электростанции на фотоэлектрических преобразователях?
3. Чем обусловлен дефицит электроэнергии, вырабатываемой солнечной электростанцией?
4. Почему уравнеие энергетического баланса решается графически?
5. Как будут изменяться левая и правая части уравнения энергетического баланса для солнечной электростанции при увеличении площади батарей фотоэлектрических преобразователей?
6. Как будет изменяться расчетная площадь фотоэлектрических преобразователей при увеличении надежности электроснабжения?
7. Как будет изменяться расчетная емкость аккумуляторных батарей при увеличении надежности электроснабжения?
8. Почему для электроснабжения передвижных пасек солнечные электростанции являются наиболее приемлемыми?
9. Как изменится площадь батарей фотоэлектрических преобразователей при применении концентраторов солнечного излучения?
10. Как изменится емкость аккумуляторов при применении концентраторов солнечного излучения?

Задания
для закрепления материала

1. Определите, какие электроприемники в Вашем доме или квартире могут работать на постоянном токе.
2. Пользуясь приложениями, рассчитайте площадь батарей фотоэлектрических преобразователей для ночной нагрузки 100 Вт.
3. Пользуясь приложениями, рассчитайте площадь батарей фотоэлектрических преобразователей для дневной нагрузки 100 Вт.
4. Пользуясь приложениями, рассчитайте площадь батарей фотоэлектрических преобразователей для круглосуточной нагрузки 100 Вт.
5. Сравните результаты по п.п. 2 – 4.

Лекция 6. **Теория использования энергии ветра**

6.1. Запасы энергии ветра и возможности ее использования. Ветровой кадастр России.

В России, как и в других странах Мира, имеется сеть метеорологических станций, регистрирующих скорость и направление ветра во времени. Работа всех национальных метеослужб координируется Всемирной метеорологической организацией, находящейся в Женеве. Достоинством этих метеоданных является их большая достоверность, так как период имеющихся наблюдений составляет несколько десятков лет, а в некоторых случаях и гораздо больше. На рисунке 6.1 показан ветровой кадастр России, представляющий графическое изображение среднегодовой скорости ветра на территории нашей страны.

Недостатком официальных метеоданных о скорости ветра и его продолжительности является то, что большинство метеостанций расположено вблизи аэропортов и городов, то есть, в местах, возможно наиболее защищенных от ветра. Кроме того, характеристики ветра регистрируются на стандартной высоте 10 м, то есть, не учитывается его вертикальное изменение.

Учитывая, что скорость ветра может быть больше скорости, регистрируемой метеостанциями, для выбора мест размещения и расчета параметров ветроэнергетических установок необходимо проводить местные наблюдения.

В отношении второго недостатка следует отметить, что автономные ветроустановки малой мощности имеют именно такую высоту – 10 метров. Однако более мощные ветроустановки, включающиеся в системную энергетику, имеют гораздо большую высоту. Мало того, считается, что их ветроколеса должны располагаться на высоте 100 метров, где скорость ветра достаточно большая и менее всего подвержена кратковременным порывам.

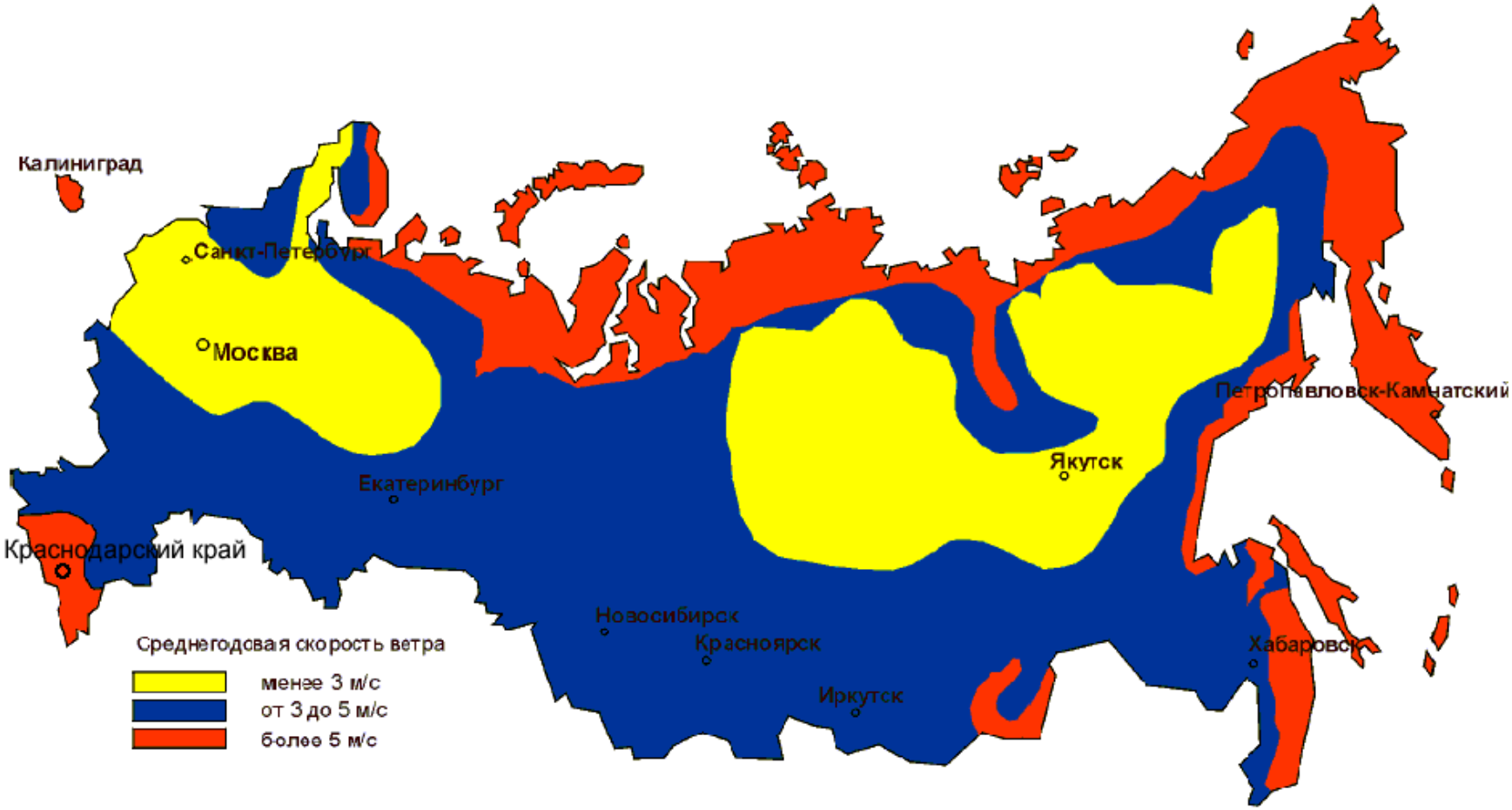


Рисунок 6.1. Ветровой кадастр России

Скорость ветра на поверхности Земли равна нулю, а затем с увеличением высоты до 100 метров растет приблизительно по логарифмической зависимости /9/.

$$v_h = v \ln \frac{h - h_0}{h_{ПР}} \qquad (6.1)$$

где v_h – скорость ветра на высоте h, м/с;

v – характерная для данного времени и места скорость, м/с;

h – высота, м;

h_0 – смещение нулевого уровня скорости ветра, то есть, расстояние над поверхностью Земли, где скорость еще равна нулю, м;

$h_{ПР}$ – высота препятствий, м.

Как правило, оси пропеллерных ветроустановок находятся на высоте 5 – 50 метров. Для такой высоты можно пользоваться упрощенной формулой, аппроксимирующей выражение (6.1) /9/:

$$v_h = v_{10}\left(\frac{h}{10}\right)^b \qquad (6.2)$$

где v_{10} – скорость ветра на высоте 10 м;

b – эмпирический коэффициент.

Чем меньше значение b, тем равномернее нагрузка на лопасть ветроколеса в верхнем и нижнем положениях. Для открытой местности $b \approx 0{,}14$. Для разного времени года значения коэффициента b различны, поэтому формулу (6.2) следует применять осмотрительно и только для высот не более 50 метров.

На рисунке 6.2 показана передаваемая ветроустановкой энергия в зависимости от рабочей скорости для двух регионов России со средними скоростями ветра 2 и 6 м/с /5, 6/.

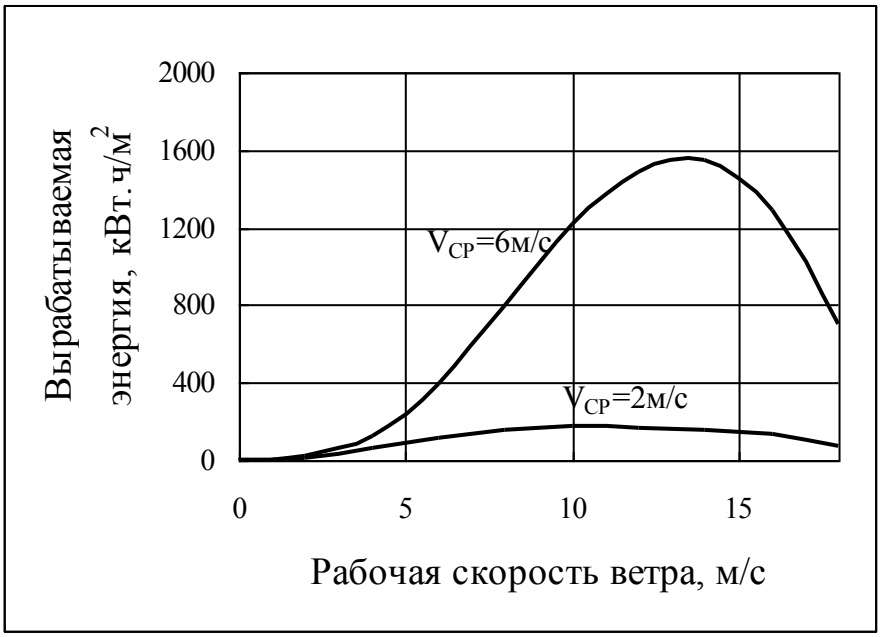


Рисунок 6.2. Передаваемая ветроустановкой энергия

Как видно из приведенного графика, функция вырабатываемой энергии зависит от распределения скоростей ветра и имеет явно выраженный максимум. Это свойство используется для системных ветроэнергетических установок.

Для автономных ветроустановок нельзя делать вывод, что скорость ветра, при которой выработка энергии максимальна, будет наилучшей, так как при этом остаются не выясненными затраты на аккумулирование энергии. В общем случае может оказаться, что при скорости ветра, обеспечивающей максимальную выработку энергии, будут достаточно длительные нерабочие периоды, требующие увеличения мощности ветроустановки и затрат на аккумулирование, и приводящие к увеличению общих затрат на электроснабжение.

В метеорологических справочниках приводятся данные о распределении скорости ветра по месяцам года в течение суток, и о повторяемости (количестве дней в году) скорости ветра. Например, по метеоданным на территории Ростовской области ветер имеет скорость не менее 5 м/с в течение 250 суток. Однако, это не значит, что такой ветер будет дуть подряд 250 суток. Видимо в течение года будут периоды с меньшим и большим ветром, которые будут чередоваться между собой в самых разнообразных (случайных) сочетаниях. Данных о продолжительности непрерывных периодов с той или иной скоростью в метеорологических справочниках не приводится.

Вместе с тем, в метрологических справочниках достаточно данных для получения интересующих нас параметров (продолжительности непрерывных энергетических и штилевых периодов). Причем получить такие параметры можно путем расчетов и машинного моделирования, что значительно сократит трудоемкость их получения.

Энергетические и штилевые периоды являются случайными величинами, поэтому имеет смысл говорить только о вероятности продолжительности этих периодов.

В общем случае вероятности того, что продолжительность энергетического или штилевого периодов будут находиться внутри заданного интервала, зависят от закона распределения этих величин. В частности, если эти продолжительности распределены по нормальному закону, можно записать /5, 6/:

$$P(t_Э < t < T) = \Phi\left(\frac{T - \overline{t_Э}}{\sigma_Э}\right) - \Phi\left(\frac{t_Э - \overline{t_Э}}{\sigma_Э}\right) \qquad (6.3)$$

$$P(0 < t < t_A) = \Phi\left(\frac{t_A - \overline{t_A}}{\sigma_A}\right) - \Phi\left(\frac{0 - \overline{t_A}}{\sigma_A}\right) \qquad (6.4)$$

где: T – количество дней в году со скоростью ветра не ниже рабочей, сут;

$\overline{t_Э}$ – математическое ожидание непрерывно идущих дней со скоростью ветра не меньше рабочей (продолжительность энергетических периодов), сут;

$\overline{t_A}$ – математическое ожидание непрерывно идущих дней со скоростью ветра меньше рабочей (продолжительность штилевых периодов, требующих работы аккумулятора), сут;

$\sigma_Э$, σ_A – стандартное отклонение соответствующего параметра ($t_Э$, t_A) , сут;

Ф(X) – функция Лапласа.

Математические ожидания энергетического и штилевого периодов являются функциями рабочей скорости ветра по определению. Вероятность энергообеспечения на основе ветроэнергетической установки определяется вероятностью того, что в течение периода не меньше $t_Э$ будет иметь место ветер со скоростью не меньше рабочей, а скорость ветра ниже рабочей будет наблюдаться в течении периода не больше t_A. Математически это можно записать следующим образом:

$$P(t) = P(t_Э < t < T)\ P(0 < t < t_A) \qquad (6.5)$$

Здесь P(t) – вероятность электроснабжения на основе ветроэнергетической установки.

Задавшись вероятностью электроснабжения и зная статистические параметры распределения энергетических и штилевых периодов, можно определить граничные значения этих характеристик, удовлетворяющих (6.5).

На рисунке 6.3 показаны графики изменения энергетического и штилевого периодов, наступающие с вероятностью 0,95 (для надежности электроснабжения 0,9), для средних условий Ростовской области /5, 6/.



Рисунок 6.3. Продолжительность энергетических
и штилевых периодов, наступающих с вероятностью 0,95

1 – штилевой период, 2 – энергетический период

Для практического использования полученных функций при оптимизации параметров автономной системы электроснабжения удаленного объекта

удобно иметь их аналитическое выражение. Так как графики гарантированных периодов не связаны функциональной зависимостью со скоростью ветра, то эти зависимости были аппроксимированы уравнениями регрессии, представляющими собой полиномы к-той степени /5, 6/.

$$t_A=0{,}0014v^5–0{,}0622v^4+1{,}0067\ v^3–6{,}759\ v^2+19{,}677\ v–18{,}37 \qquad (6.6)$$

$$t_Э=0{,}003v^4–0{,}1365v^3+2{,}2506\ v^2–16{,}462v + 49{,}623 \qquad (6.7)$$

В заключении отметим, что ветроэнергетические установки не могут передать всю воспринимаемую энергию ветра. Кроме того, при расчете параметров ветроэнергетических установок необходимо учитывать предполагаемое место их использования, а именно, в системной энергетике или в автономных системах электроснабжения. В первом случае необходимо стремиться получить максимум энергии независимо от времени года и суток, во втором случае необходимо стремиться получать энергию в определенное (нужное) время года и суток, причем с минимальными затратами.

6.2. Ветроэнергетические установки. Типы и принципы работы

Энергия ветра преобразуется в другие виды энергии в ветроэнергетических установках (ВУ). Ветроколесо преобразует поступательное движение во вращательное, а непосредственное преобразование энергии происходит в генераторе или другой машине, приводимой ветроустановкой. В принципе преобразование механической энергии ветра в электроэнергию не отличается от преобразования механической энергии других

источников. Однако, некоторые особенности все же существуют и отражаются на работе всей ветроустановки.

Классификация ветроэнергетических установок приведена на рисунке 6.4.

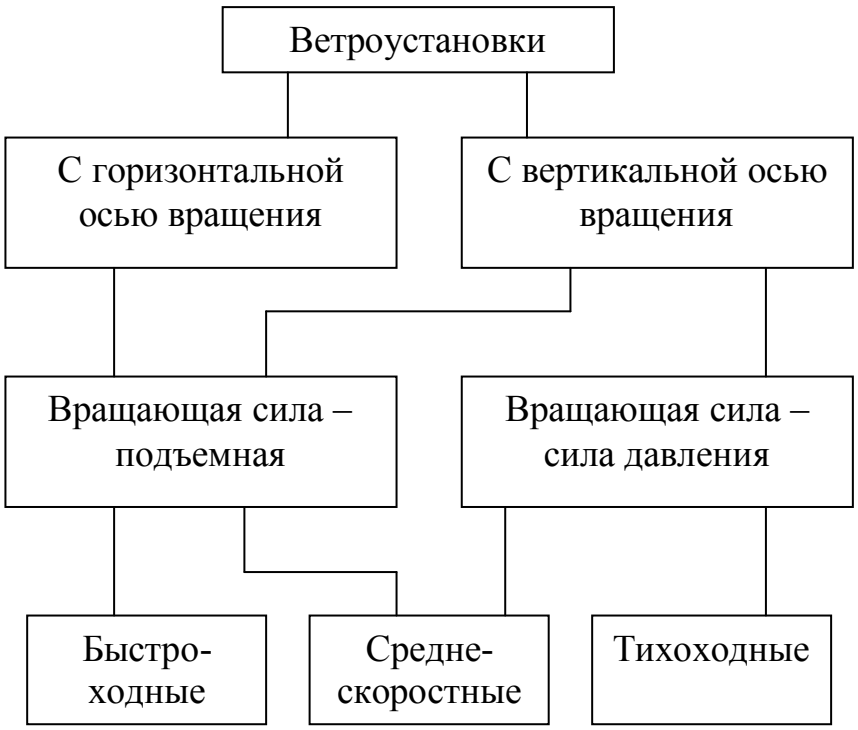


Рисунок 6.4. Классификация ветроэнергетических установок

Типичным примером ветроустановки с горизонтальной осью вращения являются пропеллерная ветроустановка. Пропеллерные ветроустановки с горизонтальной осью вращения приводятся во вращение подъемной силой и называются лифт-машинами. Это быстроходные (число лопастей не превышает четырех) и среднескоростные (большое количество лопастей) установки.

Быстроходные ветроустановки развивают максимальный момент при больших оборотах и, следовательно, при значительном ветре, и дольше вы-

ходят на номинальный режим. Но при этом они более устойчивы к колебаниям скорости ветра.

Среднескоростные ветроустановки развивают значительный момент при относительно слабом ветре и быстрее выходят на номинальный режим. Однако они более чувствительны к колебаниям скорости ветра.

Ветроустановки с вертикальной осью вращения чаще всего приводятся во вращение силой давления ветра и называются драг-машинами. Это тихоходные и среднескоростные установки, скорость движения концов лопасти не превышает скорости ветра. К недостаткам таких установок относят их большую чувствительность к скорости ветра и низкие энергетические характеристики. К достоинствам – простоту конструкции, удобство обслуживания и практически неограниченный диапазон рабочих скоростей ветра, который определяется только лишь прочностью ветроустановки. Ветроустановки с вертикальной осью вращения бывают и пропеллерного типа, например ротор Дарье. Однако они не нашли широкого применения из-за необходимости предварительного разгона ветроустановки.

Наиболее эффективным представителем драг-машины с точки зрения к.п.д. является ротор Савониуса.

Рассмотрим процессы превращения поступательного движения воздуха (ветра) во вращательную энергию ветроколеса.

При движении воздуха он давит на обе поверхности ветроколеса (рисунок 6.5), но, из-за обтекания ветроколеса ветром, давление на вогнутую поверхность больше, чем на выпуклую. Силы давления на ветроколесо создают вращающие моменты, результирующий момент заставляет вращаться ветроколесо. В роторе Савониуса положительный вращающий момент, кроме того, создается и за счет давления на внутреннюю поверхность выпуклого ротора.

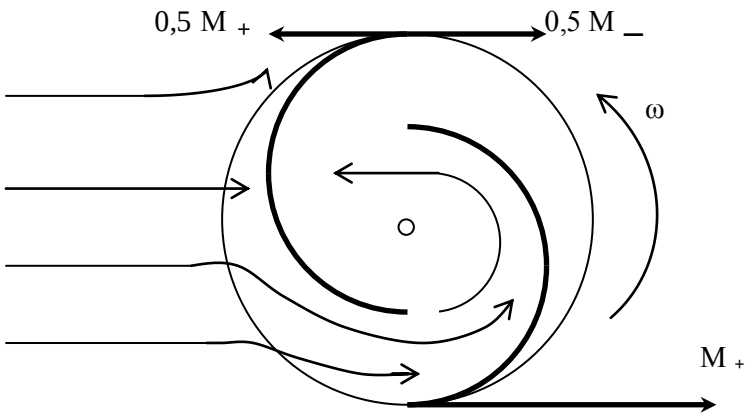


Рисунок 6.5. Схема действия сил
в роторе Савониуса

В лифт-машинах пропеллерного типа в момент трогания вращающий момент создается также силой давления ветра (рисунок 6.6). Однако впоследствии после начала движения лопасть набегает на движущийся воздух, благодаря чему создается дополнительная подъемная сила (рисунок 6.7). Наличие подъемной силы позволяет разогнать конец лопасти до скорости, превышающей скорость ветра.

Как следует из рисунка 6.7, вращающий момент лопасти создается суммой сил $P_{ВР}$ (составляющей силы давления) и $P_{ПВР}$ (составляющей подъемной силы). Это и позволяет разогнать конец лопасти до скорости, превышающей скорость ветра. Угловая частота вращения при этом достигает значения

$$\omega_В = \frac{v_Л}{R_В} \qquad (6.8)$$

где $\omega_В$ – угловая частота вращения ветроколеса, $с^{-1}$;

$v_Л$ – скорость вращения конца лопасти, м/с;

$R_В$ – радиус ветроколеса, м.

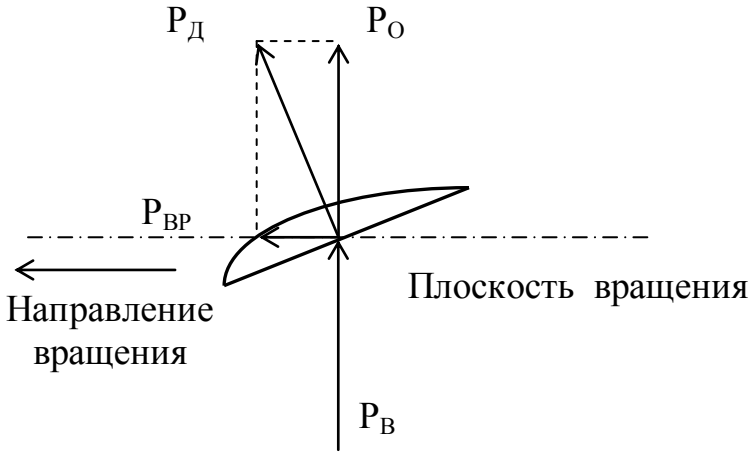


Рисунок 6.6. Силы, действующие на лопасть ветроколеса
в момент трогания

$P_В$ – сила ветра, $P_Д$ – сила давления на лопасть, $P_О$ – осевая сила давления, $P_{ВР}$ – сила, создающая вращающий момент.

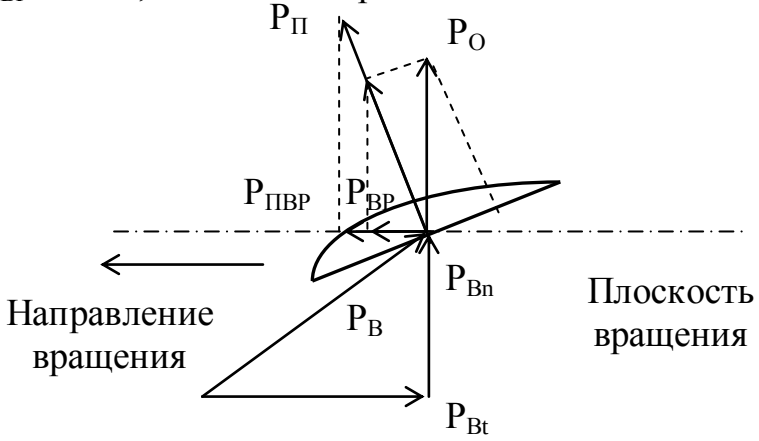


Рисунок 6.7. Силы, действующие на лопасть ветроколеса
в период ее вращения

$P_В$ – сила ветра, $P_{Вt}$ – тангенциальная составляющая силы ветра, $P_{Вn}$ – нормальная составляющая силы ветра, $P_О$ – осевая сила давления, $P_{ВР}$ – сила дав-

ления, создающая вращающий момент, $P_П$ – подъемная сила, $P_{ПВР}$ – составляющая подъемной силы, создающая дополнительный вращающий момент.

6.3. Теория идеального ветроколеса

В данном разделе рассматриваются пропеллерные ветроколеса, как наиболее распространенные в ветроэнергетических установках.

Теория идеального ветроколеса впервые была разработана В.П. Ветчинкиным в 1914 году, а затем, в 1920 году была уточнена Н.Е. Жуковским, который дал вывод максимального значения коэффициента использования энергии ветра и обосновал ряд важных положений. Теория Н.Е. Жуковского считается классической, которая, впрочем, впоследствии была еще раз переработана русским ученым Г.Х. Сабининым в практическом приложении. Г.Х. Сабининым была также разработана и теория реального ветроколеса.

Отметим, что получить основные соотношения энергетических характеристик ветроколеса, отвечающие его классической теории, можно различными способами на основе физических законов. Здесь мы выведем основные положения теории идеального ветроколеса не так, как это сделано Н.Е. Жуковским, а несколько иначе, опираясь на более популярные в настоящее время законы физики.

Существует несколько вариаций определения идеального ветроколеса, которые, тем не менее, приводят к одинаковым результатам. Мы будем понимать под идеальным ветроколесом тонкий прозрачный диск, проходя через который линии тока воздуха не терпят разрыва.

Физические процессы преобразования энергии ветра ветроколесом можно проанализировать на основании уравнения количества движения для потока идеального газа.

Пусть поток идеального газа с плотностью ρ и скоростью v_0 воздействует на ветроколесо с ометаемой площадью F (рисунок 6.8). При подходе к

ветроколесу поток газа встречает сопротивление движению, в результате чего его скорость уменьшается до v_1. При проходе ветроколеса скорость продолжает плавно изменяться до v_2. Давление при прохождении ветроколеса изменяется скачком от p_1 до p_2 /8, 9, 13/.

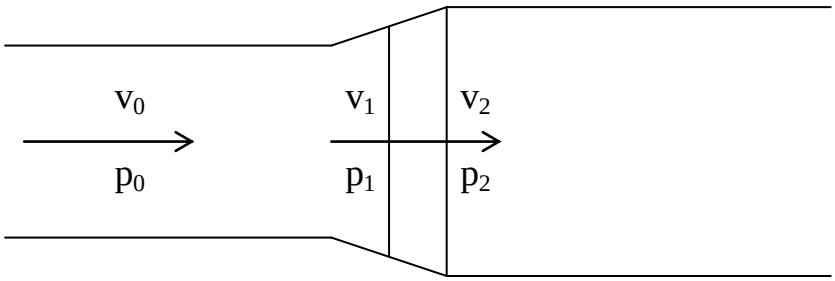


Рисунок 6.8. Взаимодействие ветрового потока с ветроколесом

Воздушный поток, проходя через ветроколесо, отдает часть своей мощности, вследствие чего его скорость после прохождения плоскости ветроколеса уменьшается. Действующая на колесо сила ветра равна изменению количества движения секундной массы проходящего через него воздуха:

$$P_B = m (v_0 - v_2) \qquad (6.9)$$

где P_B – сила, действующая на ветроколесо, Н;

m – масса воздуха проходящего через колесо в единицу времени, кг/с;

v_0 – скорость воздуха в сечении перед ветроколесом, м/с;

v_2 – скорость воздуха после прохождения ветроколеса, м/с.

Рассмотрим, какая часть мощности воздушного потока может быть использована для вращения ветроколеса.

В сечении ветроколеса скорость воздушного потока равна v_1. Тогда мощность воздушного потока равна:

$$N_B = P_B v_1 = m (v_0 - v_2) v_1 \quad (6.10)$$

С другой стороны, мощность воздушного потока, идущая на вращение ветроколеса, равна:

$$N_B = m \frac{v_0^2 - v_2^2}{2} \quad (6.11)$$

Приравняв (6.10) и (6.11), получаем:

$$v_1 = \frac{v_0 + v_2}{2} \quad (6.12)$$

Отсюда следует, что скорость воздушного потока в плоскости ветроколеса не может быть меньше половины скорости набегающего потока.

Учитывая, что масса воздуха, проходящего через ометаемую ветроколесом поверхность, равна $\rho_B F_B v_1$, (6.11) приобретает вид:

$$N_B = \rho_B F_B v_1^2 (v_0 - v_2) \quad (6.13)$$

Здесь ρ_B – плотность воздуха, кг/м^3:

F_B – ометаемая площадь ветроколеса, м^2.

С учетом (6.12) полезная мощность воздушного потока может быть определена по формуле:

$$N_B = 2\rho_B F_B v_1^2 (v_0 - v_1) \quad (6.14)$$

Введем понятие коэффициента торможения $a = (v_0 - v_1)/v_0$ /9/. Тогда:

$$N_B = 2a\rho_B F_B v_0^3 (1 - a)^2 \qquad (6.15)$$

Учитывая, что энергия ветрового потока определяется по формуле (1.1), можно записать:

$$N_B = C_N N_0 \qquad (6.16)$$

где C_N – коэффициент использования мощности ветра;

N_0 – мощность ветрового потока, Вт.

Коэффициент использования мощности ветра выражается через коэффициент торможения следующей зависимостью:

$$C_N = 4a (1 - a)^2 \qquad (6.17)$$

Взяв производную по коэффициенту торможения и приравняв ее к нулю, легко определить максимальное значение коэффициента использования мощности ветра.

$$\frac{dC_N}{da} = 4(1-a)^2 - 8a(1-a) \qquad (6.18)$$

Полученная производная по коэффициенту торможения (3.41) равна нулю при a = 1/3 и 1. При этом коэффициент использования мощности ветра соответственно принимает значения 0,59 и 0. График зависимости коэффициента использования мощности ветра от коэффициента торможения приведен

на рисунке 6.9. Таким образом, теоретически максимально возможный к.п.д. ветроустановки может быть 0,59. В настоящее время к.п.д. ветроустановок пропеллерного типа достигает 0,45, а роторного типа 0,24 /5, 6, 9/.

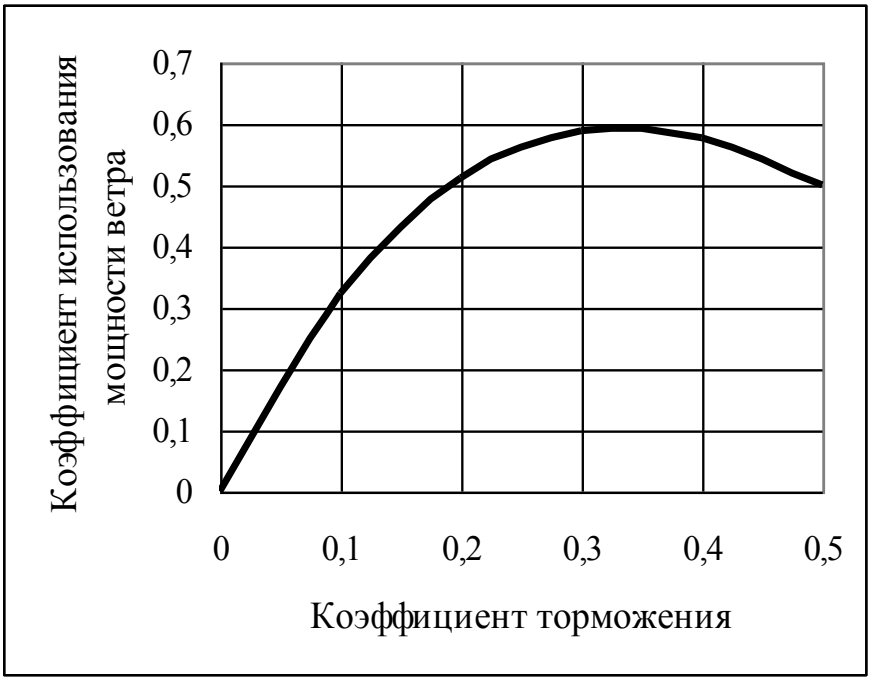


Рисунок 6.9. Функция коэффициента использования мощности ветра

6.4. Теория реального ветроколеса

Теория реального ветроколеса основана на предположении, что разность давлений воздушного потока по обе стороны ветроколеса воспринимается элементарными лопастями (рисунок 6.10). На основании этого были выведены уравнения, связывающие энергетические характеристики и аэродинамические параметры ветроколеса.

Важной энергетической характеристикой ветроколеса является его вращающий момент.

Максимальный вращающий момент не может быть больше произведения максимальной действующей на ветроколесо силы на радиус ветроколеса.

$$M_{max} = \frac{\rho_B F_B v_1^2 R_B}{2} \qquad (6.19)$$

Аналогично мощности ветроколеса его вращающий момент можно представить в виде /9/:

$$M_B = C_M M_{max} \qquad (6.20)$$

Здесь C_M – коэффициент использования момента, создаваемого ветром.

Введем определение быстроходности ветроколеса /6, 9, 13/:

$$z = \frac{v_R}{v_0} = \frac{\omega R_B}{v_0} \qquad (6.21)$$

Здесь v_R – линейная скорость движения конца лопасти, м/с:

ω – угловая частота вращения ветроколеса, $с^{-1}$.

Выразив радиус ветроколеса через его быстроходность, и учитывая, что мощность, развиваемая ветроколесом, связана с его вращающим моментом соотношением $N_B = M_B\omega$, получаем:

$$C_N N_0 = C_M M_{max} \omega \qquad (6.22)$$

$$C_N N_0 = C_M N_0 z \qquad (6.23)$$

$$C_N = zC_M \qquad (6.24)$$

Из полученных выражений следует, что чем меньше быстроходность ветроколеса, тем большую часть момента, создаваемого силой ветра, оно воспринимает.

Заметим, что ветроколесо, воспринимая энергию ветра, само должно вращать генератор или другую рабочую машину. С учетом этого представляет интерес, как мощность и момент ветроколеса зависят от скорости ветра.

Мощность, развиваемая ветроколесом, можно определить по формуле:

$$N_B = 0{,}65v^3F_B\eta_B \qquad (6.25)$$

где η_B – к.п.д. ветроколеса.

На первый взгляд кажется, что мощность, передаваемая ветроколесом, будет неограниченно возрастать с ростом скорости ветра. Однако при этом необходимо поддерживать максимальный к.п.д.

К.п.д. ветроколеса пропеллерного типа пропорционально степени торможения ветрового потока и его график аналогичен графику, приведенному на рисунке 6.9. Таким образом, если ветроколесо рассчитано на какую-то рабочую скорость ветра, то вплоть до достижения такой скорости к.п.д. ветроколеса будет расти, а после превышения значения рабочей скорости ветра, к.п.д. будет снижаться. Это приводит к тому, что при достижении рабочей скорости ветра, ветроколесо передает номинальную мощность, и при дальнейшем увеличении скорости ветра мощность ветроколеса остается практически постоянной.

Момент ветроколеса связан с мощностью зависимостью

$$M_B = \frac{N_B}{\omega} \qquad (6.26)$$

Если ветер увеличит свою скорость, то, при постоянной быстроходности ветроколеса, должна увеличиться и его частота вращения. Однако это приведет к снижению момента ветроколеса. Следовательно, при постоянном моменте сопротивления, ветроколесо будет тормозиться до прежней частоты вращения.

При уменьшении скорости ветра правая часть (6.26) вначале растет, а затем начинает уменьшаться (рисунок 6.10). Это объясняется тем, что вначале передаваемая мощность снижается меньше, чем частота вращения, а затем – быстрее.

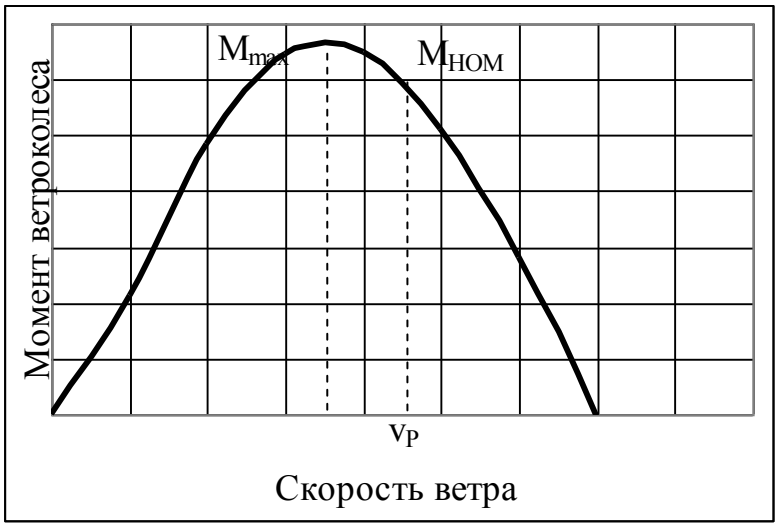


Рисунок 6.10. Зависимость момента ветроколеса
от скорости ветра

Описанная особенность ветроколеса пропеллерного типа позволяет поддерживать частоту вращения практически номинальной. При этом не-

большие отклонения частоты вращения ветроколеса от номинального значения могут быть легко устранены различными способами поворота лопастей.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие бываю ветроустановки?
2. Под действием каких сил вращаются драг-машины и лифт-машины?
3. По какой формуле определяется мощность ветра?
4. Что понимают под идеальным ветроколесом?
5. Как изменяются скорость ветра и его давление, проходя через идеальное ветроколесо?
6. Что такое коэффициент торможения идеального ветроколеса?
7. Чему равно предельно достижимое значение коэффициента использования мощности ветра?
8. Какую форму имеет характеристика момента, развиваемого реальным ветроколесом?
9. Что такое быстроходность реального ветроколеса?
10. В каком диапазоне изменения скорости ветра ветроколесо устойчиво к его колебаниям?

Задания для закрепления материала

1. Опишите достоинства и недостатки ветроустановок различного типа.
2. Выведите формулу (6.14).
3. Выведите формулу (6.15).

4. Докажите, что коэффициент использования мощности ветра принимает максимальное значение при коэффициенте торможения a = 1/3.
5. Докажите устойчивость работы ветроколеса при порывах и провалах ветра в диапазоне от рабочей скорости до предельно допустимой.

Лекция 7. **Ветроэлектростанции**

7.1. Устройство электростанций

Для вырабатывания электроэнергии переменного тока, в основном, используются ветроустановки пропеллерного типа с горизонтальной осью вращения. Это объясняется следующими причинами:

- более высокий коэффициент использования энергии ветра, что позволяет применять ветроустановки с меньшим ветроколесом:
- стабильная частота вращения при скорости ветра равной и выше рабочей;
- высокая скорость вращения, что позволяет применять редукторы с меньшим передаточным числом.

В составе ветроэлектростанций применяются двухлопастные или трехлопастные ветроустановки. Двух лопастные установки менее материалоемкие и более скоростные, что обусловливает некоторую экономичность. Однако они имеют меньший по сравнению с трехлопастными ветроустановками вращающий момент. Кроме того, для выбора той или иной пропеллерной ветроустановки для электростанции необходимо учитывать, что ветроколеса устанавливаются на башне. Это связано с обеспечением свободы вращения и, главным образом, что скорость ветра с высотой увеличивается, а ее колебания уменьшаются.

Пропеллерные ветроустановки ветроэлектростанций требуют ориентации ветроколеса перпендикулярно скорости ветра. Существуют три способа такой ориентации (рисунок 7.1):

- при помощи флюгера;
- установкой ветроколеса за башней;
- при помощи виндрозы.

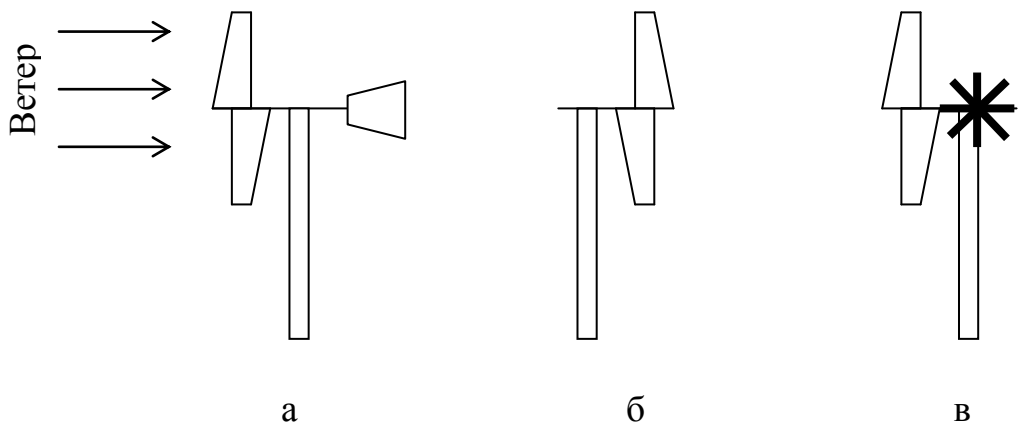


Рисунок 7.1. Способы установки ветроколеса на ветер
а – флюгерная установка, б – самоустановка,
в – установка при помощи виндрозы

При флюгерной установке ветроколесо ориентируется перпендикулярно направлению ветра за счет бокового давления ветра на флюгер. Недостатком такой установки является возникновение значительных гироскопических моментов при резкой смене направления ветра, что может привести к отрыву лопастей. Для устранения этого недостатка флюгер соединяется с поворотным механизмом посредством пружинного амортизатора. В этом случае при резком изменении направления ветра флюгер резко поворачивается, натягивая пружину, которая затем плавно подтягивает ветроколесо в новое положение.

Самоустановка достигается путем установки ветроколеса за башней. В этом случае ветроколесо стремиться занять положение устойчивого равновесия перпендикулярно направлению ветра. Недостатком этого способа ориентации является то, что башня является препятствием движению ветра. Это приводит к незначительному уменьшению мощности и к появлению переменных усилий на лопасти, что усиливает шум и биения ветроколеса. Самоустановка применяется преимущественно для многолопастных ветроколес.

Виндроза представляет собой дополнительное ветроколесо, установленное перпендикулярно основному ветроколесу. При изменении направления ветра виндроза начинает вращаться и посредством конусного редуктора перемещает основное колесо и саму себя до тех пор, пока основное колесо не займет положение перпендикулярно нового направления ветра. После достижения такого нового положения виндроза оказывается расположенной в плоскости направления ветра и перестает вращаться. Для увеличения момента виндрозу выполняют многолопастной. Недостатком является усложнение конструкции ветроустановки, что, однако, компенсируется высокой надежностью работы.

Механическую энергию ветроколеса преобразуют в электроэнергию при помощи генератора переменного или постоянного тока. Учитывая, что потребители электроэнергии в подавляющем большинстве являются электроприемниками переменного тока, то наиболее целесообразно использовать синхронный генератор. Именно такими генераторами и оснащены промышленно выпускаемые ветроэнергетические установки пропеллерного типа.

Схема синхронного генератора типа СГВ (синхронный генератор для ветроустановки), которые применяются в современных ветроэнергетических установках, приведена на рисунке 7.2. В синхронном генераторе происходит преобразование кинетической энергии вращающего тела в электроэнергию. Устройство синхронного генератора и его работа подробно описаны в учебниках по электрическим машинам. Здесь мы напомним лишь некоторые положения, которые нам будут необходимы при изучении режимов работы ветроэнергетических установок.

Частота э.д.с. синхронного генератора переменного тока определяется по известной формуле:

$$f = \frac{pn}{60} \qquad (7.1)$$

где f – частота э.д.с. генератора, Гц;

p – число пар полюсов;

n – число оборотов ротора генератора, об / мин.

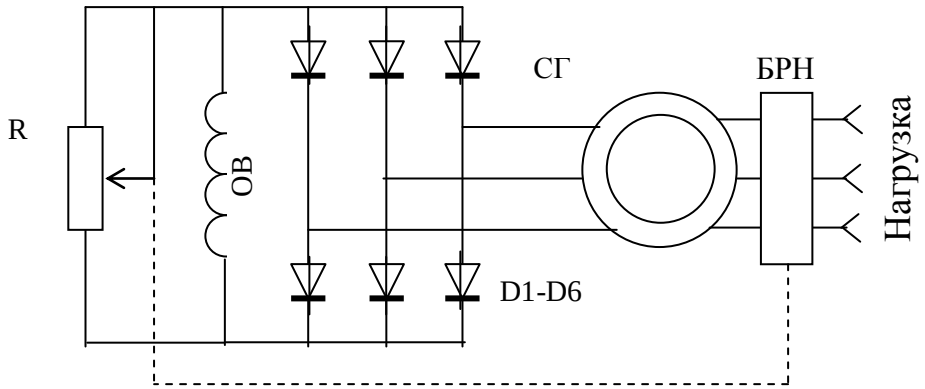


Рисунок 7.2. Принципиальная схема синхронного генератора типа СГВ

R – реостат, ОВ – обмотка возбуждения, D1 – D6 – диодный мостик, СГ – синхронный генератор, БР – блок автоматического регулирования напряжения.

Как следует из приведенной формулы (7.1) для поддержания частоты э.д.с. генератора необходимо поддерживать постоянными обороты ротора.

Вращающий момент на валу генератора, создаваемый ветроколесом, связан с противодействующими моментами соотношением /5, 6/:

$$M_B = M_C + J\frac{d\omega}{dt} \qquad (7.2)$$

где M_B – вращающий момент, Н;

M_C – момент сопротивления генератора, приведенный к валу ветроколеса, Н;

J – момент инерции всех вращающихся частей ветроэнергетической установки, кГ. $м^2$;

ω – частота вращения ветроколеса, $с^{-1}$;

t – время, с.

Второе слагаемое в правой части (7.2) представляет собой динамический момент, который действует только при $\frac{d\omega}{dt} \neq 0$, то есть, только при изменении частоты вращения. Это свойство оказывает полезное действие в процессе поддержания частоты вращения при порывах и провалах ветра. Если повышенный вращающий момент будет действовать в течение непродолжительного периода, а момент инерции ветроэнергетической установки будет достаточно значительным, то процесс окончательного изменения электромагнитного момента потребует достаточно большого промежутка времени (предположительно большего, чем время порыва ветра) и генератор будет работать с допустимой частотой вращения.

Провалы скорости ветра вызывают аналогичный процесс изменения скорости генератора, но в сторону уменьшения.

Исследуем зависимость времени, необходимого на увеличение скорости вращения ротора генератора до допустимой величины, от вращающего момента, вызванного порывом ветра.

Порыв ветра вызывает приращение вращающего момента на величину ΔМ, который стремится увеличить частоту вращения ротора генератора на величину $\Delta\omega = \omega_Д - \omega_Н$ ($\omega_Д$ – допустимая частота вращения, $\omega_Н$ – номинальная частота вращения). Момент инерции ветроэнергетической установки препятствует такому изменению скорости вращения, поэтому этот процесс требует определенного времени. Таким образом, избыточный вращающий момент от порыва ветра совершает работу по изменению частоты вращения,

преодолевая момент инерции. Этому соответствует следующее уравнение /5, 6/:

$$\Delta M = J\frac{0{,}04\,\omega_H}{t} \qquad (7.3)$$

где t – время, необходимое на увеличение скорости до допустимого значения.

Выразив избыточный момент через соответствующие мощности ветрового потока, передаваемые ветроколесом, получаем:

$$\frac{N_П}{\omega_П} - \frac{N}{\omega} = J\frac{d\omega}{dt} \qquad (7.4)$$

где $N_П$ – мощность ветрового потока, передаваемая ветроколесом при порыве ветра;

$\omega_П$ – частота вращения при порыве.

Учитывая, что частота вращения синхронного генератора ветроэнергетической установки не должна превышать номинальную частоту более, чем на 4%, получаем следующее уравнение движения /5, 6/:

$$\frac{N_П}{1{,}04\,\omega} - \frac{N_П}{\omega} = J\frac{d\omega}{dt} \qquad (7.5)$$

Или, с учетом зависимости мощности ветра от скорости, получаем:

$$0{,}65\eta_B\left(\frac{v_П^{\,3}}{1{,}04}-v^3\right)dt=J\omega\,d\,\omega \qquad (7.6)$$

С учетом связи линейной скорости ветра с угловой частотой вращения ветроколеса, можно записать /5, 6/:

$$0{,}7\frac{\eta_B R^3}{z^3}dt=\frac{J}{\omega^2}d\omega \qquad (7.7)$$

Для решения полученного уравнения (7.7) проинтегрируем левую часть от 0 до $t_{ПР}$ (где $t_{ПР}$ – предельное время до разгона ветроэнергетической установки до предельно допустимой частоты вращения), и правую часть от $\omega_Н$ до $1{,}04\omega_Н$).

$$0{,}7\frac{\eta_B R^3}{z^3}\int_0^{t_{ПР}}dt=J\int_{\omega_Н}^{1{,}04\omega_Н}\frac{d\omega}{\omega^2} \qquad (7.8)$$

После интегрирования, получаем:

$$0{,}7\frac{\eta_B R^3}{z^3}t_{ПР}=J\left(\frac{1}{\omega_Н}-\frac{1}{1{,}04\omega_Н}\right) \qquad (7.9)$$

Откуда определяем предельно допустимое время разгона

$$t_{ПР}=0{,}055\frac{Jz^3}{\omega_Н\eta_B R^3} \qquad (7.10)$$

Данное уравнение решено для ветроэнергетической установки с обметаемой площадью ветроколеса 1 м^2. Для ветроколес, имеющих другую площадь, уравнение принимает следующий общий вид:

$$t_{ПР} = 0{,}055 \frac{Jz^3}{\pi \omega_Н \eta_В R^5} \qquad (7.11)$$

Подставив вместо быстроходности ветроколеса его выражение, окончательно получаем /5, 6/:

$$t_{ПР} = 0{,}055 \frac{J\omega_Н^2}{\pi R^2 \eta_В \alpha^3 v^3} \qquad (7.12)$$

где α – коэффициент увеличения скорости ветра при порыве.

Анализируя полученное решение (7.12), можно сделать следующий вывод. Для увеличения времени возмущения частоты вращения при порывах (провалах) ветра до предельно допустимого значения необходимо не только увеличивать момент инерции ветроэнергетической установки и увеличивать номинальную частоту его вращения (что тривиально), но и уменьшать радиус ветроколеса и рабочую скорость ветра.

На рисунке 7.3 представлен график зависимости времени разгона ветроэнергетической установки от величины порыва ветра.

Как следует из приведенного графика, время разгона ветроколеса ветроэнергетической установки до предельно допустимой частоты вращения для ветроустановок мощностью до 10 кВт, рассчитанных на рабочую скорость ветра 5,5 м/с, не меньше 10 секунд. Этого времени достаточно для поворота

лопастей ветрустановки и уменьшения мощности воздействующего на нее ветрового потока.

Как уже отмечалось, ветроэнергетические установки способны вырабатывать электроэнергию с требуемой частотой тока только при скорости ветра не меньше рабочей. В связи с этим в автономных ветроэлектростанциях используется либо резервный источник напряжения, либо запасенная заранее (в энергетические периоды) энергия.

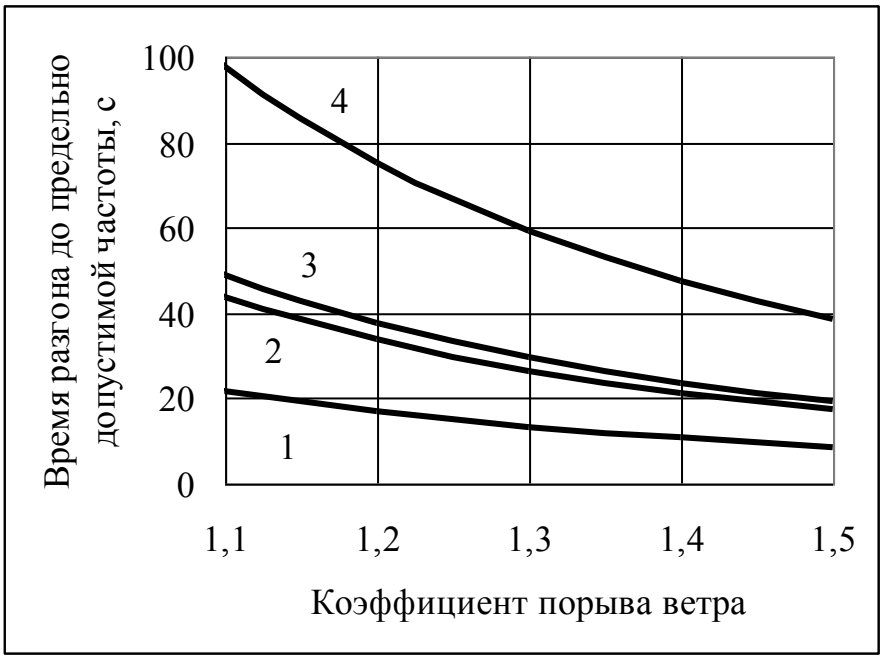


Рисунок 7.3. Зависимость времени разгона ветроколеса от порыва ветра при рабочей скорости ветра 5,5 м/с

1 – J = 10 кг.м^2, $\omega_Н$ = 105 с$^{-1}$; 2 – J = 20 кг.м^2, $\omega_Н$ = 105 с$^{-1}$;
3 – J = 10 кг.м^2, $\omega_Н$ = 157 с$^{-1}$; 1 – J = 20 кг.м^2, $\omega_Н$ = 157 с$^{-1}$;

Один из вариантов использования запасенной в аккумуляторах энергии приведен на рисунке 7.4. Такое исполнение ветроэнергетической установки не увеличивает стоимости автономной системы электроснабжения. При этом

повышается качество напряжения (так как электроэнергия и в штилевые периоды вырабатывается синхронным генератором, более приспособленным к этой функции, чем электронный или другой инвертор), увеличивается устойчивость работы при колебаниях нагрузки (так как увеличивается момент инерции системы) и упрощается процесс поддержания частоты вращения синхронного генератора.

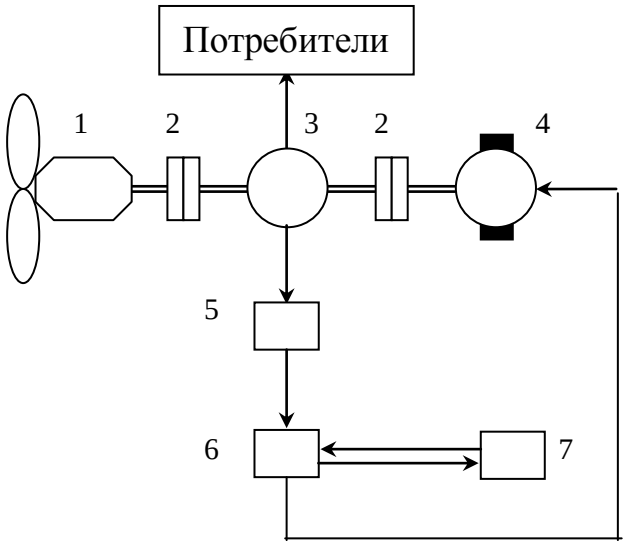


Рисунок 7.4. Функциональная схема ветроэлектростанции
с пропеллерной ветроустановкой

1 – ветроколесо, 2 – обгонная муфта, 3 – синхронный генератор, 4 – двигатель постоянного тока, 5 – выпрямитель, 6 – коммутатор, 7 – аккумуляторы.

Автономная система электроснабжения работает следующим образом. При наличии ветра достаточной мощности (скорость ветра равна или больше рабочей скорости) ветроколесо через обгонную муфту приводит во вращение синхронный генератор, который питает потребители электроэнергии и заряжает аккумуляторы. При недостаточной мощности ветра (скорость ветра меньше рабочей скорости) обгонная муфта отсоединяет синхронный генератор от ветроколеса и подсоединяет к двигателю постоянного тока. Дальней-

шее вращение синхронного генератора в штилевой период производится от двигателя постоянного тока, получаемого электроэнергию от аккумуляторов.

Ветровые установки роторного типа (ротор Савониуса) не обладают способностью сохранения частоты вращения при изменении ветра, их частота вращения увеличивается пропорционально его скорости. Это создает определенные трудности при применении синхронного генератора в ветроустановках роторного типа. Однако простота ветроустановок роторного типа (нет необходимости в установке на ветер, не требуется расчета и изготовления лопастей сложного профиля) и более лучшие эксплуатационные условия использования электросилового оборудования (возможность его установки на поверхности Земли на продолжении оси вращения) заставляют искать пути их использования для электроснабжения не взирая на более низкий коэффициент использования энергии ветра.

На рисунке 7.5 показана функциональная схема разработанной в ФГОУ ВПО АЧГАА ветроэнергетической установки, которая позволяет поддерживать частоту вращения генератора стабильной.

Установка работает следующим образом. При скорости ветра, более рабочей скорости, статор машины постоянного тока (МПТ) вращается с частотой вращения большей, чем номинальная частота вращения синхронного генератора. Но так как синхронный генератор приводится во вращение от якоря машины постоянного тока, то путем регулирования тока возбуждения МПТ устанавливается такой тормозной момент, при котором она работает в режиме генератора с частотой вращения якоря равной номинальной частоте вращения синхронного генератора.

При уменьшении скорости ветра вплоть до рабочей скорости уменьшается и частота вращения якоря машины постоянного тока относительно статора с таким расчетом, чтобы частота вращения синхронного генератора оставалась номинальной. При этом процесс регулирования качественно сохраняется.

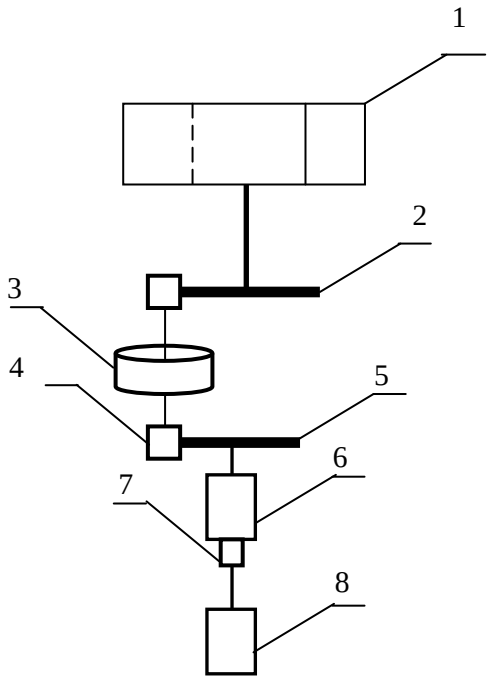


Рисунок 7.5. Функциональная схема ветроэнергетической установки роторного типа

1 – ветроколесо, 2 – повышающий редуктор, 3 – инерционный аккумулятор, 4 – обгонная муфта, 5 – понижающий редуктор, 6 – статор машины постоянного тока, 7 – якорь машины постоянного тока, 8 – синхронный генератор.

При уменьшении скорости ветра ниже рабочей скорости, происходит реверсирование полюсов якорной обмотки, и машина постоянного тока переводится в двигательный режим. При этом поддержание частоты вращения якоря машины постоянного тока и ротора синхронного генератора производится за счет регулирования тока обмотки возбуждения МПТ.

Такая схема позволяет работать ветроустановке не только на рабочих скоростях ветра, но и на низших скоростях и, что особенно важно, на высших скоростях ветра при обеспечении требуемых значений частоты и напряжения генератора. Время качественного использования ветроэнергетической установки увеличивается с 10 – 35% до 60 – 70%.

7.2. Расчет системных ветроэлектростанций

Системные ветроэлектростанции являются разгрузочными источниками энергии в централизованной сети электроснабжения. В соответствии с назначением, системные электростанции не нуждаются в аккумуляторах энергии, так как работают (разгружают традиционные электростанции) только когда имеется ветер достаточной мощности. В связи с этим системные электростанции рассчитываются по максимальной выработке электроэнергии за год в конкретном климатическом регионе.

Исходным расчетным параметром, определяющим мощность системной ветроэлектростанции, является рабочая скорость ветра. Заметим, что конкретная ветроустановка не может иметь один и тот же коэффициент использования энергии ветра при разных скоростях, так как ее аэродинамические параметры рассчитываются на определенную рабочую скорость ветра, являющейся номинальной. При увеличении скорости ветра больше рабочей, мощность, снимаемая с ветроколеса, остается постоянной. Таким образом, не смотря на увеличение мощности ветрового потока при увеличении его скорости, мощность ветроэлектростанции не увеличивается.

В любой климатической зоне имеются ветра с различной скоростью, включая и штиль. Каждая климатическая зона имеет характерный для нее ветровой кадастр, определяющий вероятность скорости ветра. Время действия ветра с определенной скоростью на основании данных ветрового кадастра можно определить следующим образом.

$$t_V = v \cdot T \cdot p(v) \qquad (7.13)$$

где t_V – время действия ветра со скоростью v, час;

T – число часов в году, час. T = 8760 часов;

p(v) – вероятность ветра со скоростью v.

Если принять, что текущее значение скорости ветра является значением рабочей скорости, то энергия, передаваемая ветроколесом, равна:

$$E_{ВК} = \frac{\rho}{2} v_Р{}^3 F_{ВК} T C_{ВК} P(v \geq v_Р) \qquad (7.14)$$

где ρ – плотность воздуха в ветровом потоке, кг/м^3. Принимают ρ = 0,65 кг/м^3;

$v_Р$ – текущее значение рабочей скорости ветра, м/с;

$P(v \geq v_Р)$ – вероятность того, что скорость ветра будет не меньше рабочей;

$F_{ВК}$ – ометаемая площадь ветроколеса, м^2;

$C_{ВК}$ – коэффициент использования энергии ветра ветроколесом в номинальном режиме.

Вероятность того, что скорость ветра будет не меньше текущего значения рабочей скорости, равна сумме вероятностей скоростей ветра равных и больше рабочей:

$$\begin{aligned} P(v \geq v_Р) &= \sum_j p(v_j) \quad \text{при } v_j \geq v_Р \\ P(v \geq v_Р) &= 0 \qquad\quad \text{при } v_j < v_Р \end{aligned} \qquad (7.15)$$

Расчет по формуле (7.14) с учетом (7.15) показывает, что максимальное значение передаваемой энергии будет у ветроколеса, рассчитанного на скорость ветра $v_P = 1{,}5v_{CP}$, где v_{CP} – среднее значение скорости ветра для данной климатической зоны. При этом ветроустановка в течение примерно 3000 часов в году будет выдавать номинальную мощность, и в течение 150 часов 50% номинальной мощности.

Зная рабочую скорость ветра, мощность системной ветроэлектростанции можно определить по формуле:

$$N_{ВЭС} = 0{,}65\, v_P^3\, F_{ВК}\, C_{ВК}\, \eta_{ВК}\, \eta_{СГ} \qquad (7.16)$$

где $\eta_{ВК}$ – к.п.д. ветроколеса;

$\eta_{СГ}$ – к.п.д. синхронного генератора.

Практически задаются желаемой мощностью ветроэлектростанции и рассчитывают ометаемую площадь ветроколеса и его диаметр. В заключении отметим, что ветроустановки мощностью более 100 кВт экономически эффективнее выполнять многоагрегатными, в которой мощность отдельной ветроустановки (агрегата) составляет 30 – 50 кВт.

7.3. Расчет автономных ветроэлектростанций

Автономное использование ветроустановки пропеллерного типа

Для удаленных объектов наиболее приемлемы системы автономного электроснабжения, в том числе и автономные ветроэлектростанции. Практически выбор того или иного варианта электроснабжения на основе ветроэнергетической установки происходит следующим образом. По-

требитель при равной надежности электроснабжения выбирает более дешевый вариант, а при равной стоимости электроэнергии – более надежный вариант.

Учитывая, что реальная надежность традиционного электроснабжения достаточно высокая (около единицы), то решающим фактором при выборе варианта электроснабжения будет стоимость электроэнергии. Так как вырабатываемая электроэнергия определяется потребителем и не зависит от варианта системы электроснабжения, автономная ветроэлектростанция будет иметь тем большую конкурентоспособность, чем ниже будет ее стоимость.

На основании изложенного, в качестве критерия оптимальности параметров автономной ветроэлектростанции целесообразно принять ее стоимость.

Автономная ветроэлектростанция на основе пропеллерной ветроустановки будет определена, если будут известны следующие параметры:

- рабочая скорость ветра, на которую рассчитана ветроустановка;
- мощность ветроэнергетической установки;
- емкость или мощность аккумуляторов.

В этой связи, целевая функция должна иметь вид /5, 6/:

$$S = f(v_P, N_B, N_A) \rightarrow \min \qquad (7.17)$$

где: N_B - мощность ветроэнергетической установки;

N_A - мощность аккумуляторов.

Особенностью автономного электроснабжения на основе использования энергии ветра является неуправляемость потоками поступающей энергии. В силу этого ветроэлектростанция, работающая в изолированном режи-

ме, не всегда может выдавать энергию в соответствии с графиком потребления, то есть, в соответствии со спросом на электроэнергию. При этом в любой интервал времени возможны следующие ситуации:

- поступающая энергия ветра (с учетом потерь на преобразование) превышает потребность в ней;
- поступающая энергия ветра равна потребности в ней;
- поступающей энергии ветра недостаточно для удовлетворения потребности в ней.

Для приведения в соответствие графиков поступления и потребления энергии применяется аккумулирование энергии или резервирование.

Очевидно, для достижения поставленной цели, поступающей от ветроэнергетической установки энергии должно быть достаточно для полного удовлетворения потребностей в ней. В этом случае, должно выполняться граничное условие (рисунок 7.6):

$$E_B = E_P + E_A, \qquad (7.18)$$

где: E_P - потребляемая энергия, кВт.ч;

E_A - энергия, запасаемая в аккумуляторе, кВт.

E_B - энергия, вырабатываемая ВУ, кВт.ч.

В этом случае баланс мощности должен быть следующим:

$$N_B = N_P + N_A \qquad (7.19)$$

Учитывая, что мощность аккумулятора должна удовлетворять условию $N_A = N_P\, t_A / t_B\, \eta_A$, получаем:

$$N_B = N_P\left(1+\eta_A\frac{t_A}{t_Э}\right) \qquad (7.20)$$

где: $t_Э$, t_A – время работы ветроэнергетической установки и аккумулятора соответственно, ч.

η_A – к.п.д. аккумулятора, о.е.

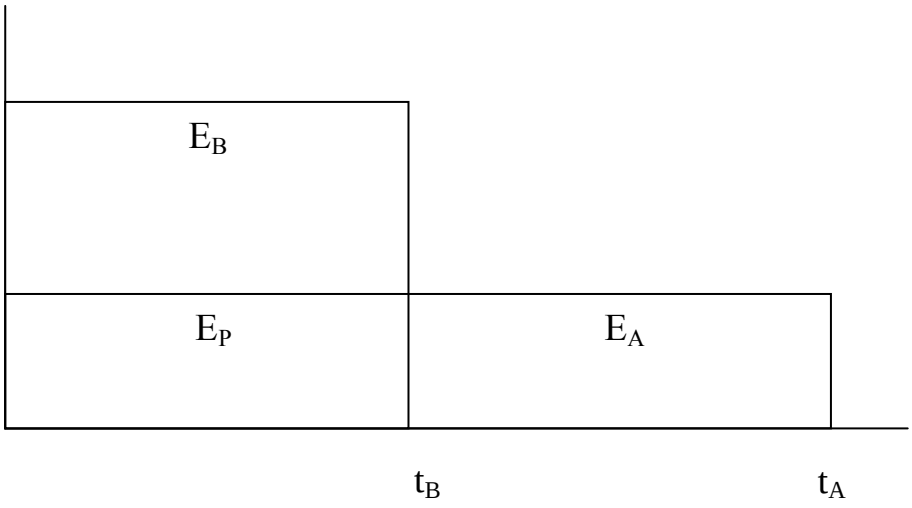


Рисунок 7.6. Энергетическая диаграмма

Мощность втероустановки функционально зависит от рабочей скорости ветра. Следовательно, с учетом (7.20), будет иметь место следующее равенство:

$$F = N_P\frac{1+\dfrac{t_A}{t_Э\eta_A}}{0{,}65v_P{}^3\eta_{ВЭС}} \qquad (7.21)$$

Здесь $\eta_{ВЭС}$ – к.п.д. ветроэлектростанции, учитывающий и коэффициент использования энергии ветра.

В уравнении (7.21) случайными величинами являются $t_А$ и $t_Э$, которые зависят от скорости ветра по определению и могут наступать с различными вероятностями. Графики изменения этих величин и уравнения, описывающие их зависимость от скорости ветра, приведены в главе 6.

Стоимость автономной системы электроснабжения с аккумуляторами можно определить по формуле:

$$S = S_В + S_А \qquad (7.22)$$

Приняв реальное допущение, что стоимость ветроэнергетической установки (включая инвертор) пропорциональна площади, ометаемой ветроколесом, а стоимость аккумуляторов пропорциональна их емкости, можно записать:

$$S = k_В F_В + k_А \frac{E_А}{U_Н} \qquad (7.23)$$

где: $k_В$ - удельная стоимость ВУ, руб/м^2;

$k_А$ - удельная стоимость аккумулятора, руб/А.ч;

$E_А$ - энергия, которая требуется для зарядки аккумулятора, Вт.ч;

$U_Н$ - номинальное для потребителя напряжение, В.

Учитывая выше приведенные зависимости, стоимость энергоустановки в функции рабочей скорости ветра определится следующим образом /5, 6/:

$$S = N_P \left(\frac{1 + \frac{t_A}{t_Э \eta_A}}{0{,}65 v_P{}^3 \eta_{ВЭЭ}} + 24 k_A \frac{t_A}{U_H \eta_A} \right) \rightarrow \min \qquad (7.24)$$

Функция (7.24) определяет стоимость системы автономного электроснабжения на основе ветроустановки в зависимости от ее параметров и от мощности электроприемников, и представляет собой развернутое выражение целевой функции (7.17).

После подстановки в целевую функцию (7.24) уравнений регрессии $t_Э$ и t_A можно рассчитать оптимальное значение рабочей скорости ветра, а затем и мощность или ометаемую площадь.

Анализируя формулу целевой функции (4.20), можно заметить, что стоимость автономной системы электроснабжения на базе ветроэнергетической установки пропорциональна среднесуточной мощности электрической нагрузки, но при этом оптимальная рабочая скорость ветроэнергетической установки не зависит от мощности нагрузки.

Используя описанную методику определения рабочей скорости ветра, были рассчитаны технико-экономические параметры автономных систем электроснабжения на базе выпускаемых отечественной промышленностью ветроустановок (таблица 7.1).

Автономное использование ветроустановки роторного типа

Особенностью оптимизации параметров автономной системы электроснабжения на основе роторной ветроустановки (при сохранении выбранного критерия оптимальности) является то, что ветроэнергетическая установка работает практически при любой скорости ветра, достаточной

для ее вращения. Отсюда оптимизация проводится исходя из следующих соображений.

Таблица 7.1

Технико-экономические параметры
системы автономного электроснабжения
(мощность 1,5 кВт)

Ветроэнергетическая установка			Нерабочий период, сут	Емкость аккумуляторов, А.ч (при напряжении потребителя 220 В)	Стоимость энергоустановки (вероятность энергообеспечения 0,9) тыс. руб
Производитель	N_B, кВт	Рабочая скорость м/с			
МКБ “Радуга”	1,5	6	4	125	75
НПО Ветроэн”	4	9	9	350	110
АО “Энкорис”	3	8	5,4	210	100
Тульский комбайновый завод	1	5	3,4	100	90
АО “Долина”	2	4	2	0,8	120
ООО "ЛМВ Ветроэнергетика"	0,5 1,0	10 7	9 – 10 4	400 125	90 80

При увеличении ометаемой площади ветроколеса растет мощность ветроустановки. Следовательно, ветроустановка больших размеров будет обеспечивать избыточную мощность при меньших скоростях ветра, то есть, возможность зарядки аккумуляторов появится при меньшей скорости ветра. А так как продолжительность периодов со скоростью ветра меньше заданной

сокращается с уменьшением скорости, то время работы аккумуляторов будет уменьшаться при увеличении ометаемой площади ветроколеса.

Таким образом, увеличение размеров ветроустановки приводит к увеличению ее стоимости, но при этом снижается требуемая емкость аккумуляторов и соответственно их стоимость. При этом можно ожидать, что при определенном сочетании этих параметров (ометаемой площади ветроколеса и емкости аккумуляторов), стоимость автономной ветроэлектростанции будет минимально возможной для электроснабжения потребителя заданной мощности.

Граничным условием зарядки аккумуляторов будет:

$$F_B = \frac{2N_H}{\rho_B v^3 \eta_{ВЭС}} \qquad (7.25)$$

где: N_H – средняя мощность нагрузки, Вт;

ρ_B – плотность воздуха на высоте ветроколеса. Принимаем $\rho \approx 1{,}3$ кг/м^3;

v – расчетная скорость ветра, при превышении которой появляется избыточная мощность, достаточная для зарядки аккумуляторов, м/с.

Емкость аккумуляторов определяется из выражения:

$$C_A = 24 \frac{N_H t_A}{U_H} \qquad (7.26)$$

где: C_A – емкость аккумуляторной батареи при номинальном напряжении потребителя, А.час.

Так как нагрузкой аккумуляторов является машина постоянного тока, то принимается $U_Н = 120$ В.

Стоимость автономной ветроэлектростанции с учетом уравнения продолжительности штилевого периода определяется следующим образом /5, 6/:

$$S = N_Н\left[\frac{2k_1}{\rho_В v^3 \eta_{ВЭЭ}} + \frac{24k_2(0{,}001v^5 - 0{,}06v^4 + 1{,}007v^3 - 6{,}8v^2 + 19{,}7v - 18{,}4}{U_Н}\right] \quad (7.27)$$

Эта зависимость также представляет собой развернутое выражение целевой функции, но с учетом особенностей работы ветроустановки роторного типа.

Пример реализация полученной целевой функции для условий Ростовской области показан на рисунке 7.7. При этом приняты следующие исходные данные:

- среднесуточная нагрузка – 0,5 кВт;
- удельная стоимость ветроэнергетической установки – 300 руб/м^2;
- удельная стоимость электрохимических аккумуляторов – 20 руб/А.ч.

Как следует из представленного рисунка, стоимость ветроустановки уменьшается с увеличением скорости ветра нелинейно, а стоимость аккумуляторов нелинейно увеличивается. Стоимость всей системы автономного электроснабжения имеет ярко выраженный минимум, определяющий оптимальную скорость ветра, при которой начинается зарядка аккумуляторов, то есть, расчетную рабочую скорость.

Оптимальные параметры автономной электростанции при этом легко определяются через эту скорость ветра.



Рисунок 7.7. Оптимизация рабочей скорости роторной ветроустановки

1 – стоимость аккумуляторной батареи, 2 – стоимость роторной ветроустановки, 3 – стоимость автономного энергетического комплекса.

Совместное использование ветроустановки пропеллерного типа и топливной электростанции

При совместном использовании ветроэнергетической установки с автономной топливной электростанцией первая используется как разгрузочный источник энергии. Вероятность энергообеспечения при этом очень высокая (приблизительно равна вероятности энергообеспечения при сетевом электроснабжении) и ограничивается только техническим состоянием преобразователей энергии.

Целесообразность применения ветроэнергетической установки для разгрузки топливной электростанции определяется экономией топлива. Однако, при этом неизбежны дополнительные затраты на сооружение ветроэнергетической установки. Общие затраты на создание автономной системы электро-

снабжения (которые являются критерием оптимальности) при этом будут иметь следующие составляющие:

$$S = S_{ВУ} + S_{ЭС} + S_{Т} \qquad (7.28)$$

где: $S_{ВУ}$ – стоимость ветроэнергетической установки, руб;

$S_{ЭС}$ – стоимость топливной электростанции, руб;

$S_{Т}$ – стоимость топлива, руб.

Так как стоимость топлива пропорциональна сроку эксплуатации автономной системы электроснабжения, то затраты необходимо учитывать за весь срок ее службы (10 лет).

В формуле (7.28) стоимость топливной электростанции зависит только от нагрузки и не изменяется в зависимости от стоимости ветроэнергетической установки и топлива. Это позволяет исключить последнее слагаемое из дальнейшего анализа. В этом случае целевую функцию можно представить в следующем виде:

$$S = S_{ВУ} + S_{Т} \rightarrow \min \qquad (7.29)$$

Стоимость топлива определяется через среднюю нагрузку по формуле:

$$S_{Т} = k_{Т} \frac{(N_{Н} - N_{ВУ})t}{m\eta_{ЭС}} \qquad (7.30)$$

где: $k_{Т}$ – цена топлива, руб/кг;

t – время работы электростанции, час;

m – теплотворная способность топлива, кВт.ч/кг;

$\eta_{ЭС}$ – к.п.д. электростанции.

С учетом этого, целевая функция при принятом критерии оптимальности приобретает следующий вид:

$$S = k_B F - k_T \frac{[N_H - 0{,}65 F \eta_{ВУ} \Sigma v_j^3 p(v \geq v_j)]t}{m \eta_{ЭС}} \rightarrow \min \qquad (7.31)$$

При ограничении

$$0.65 F \eta_{ВУ} v_j^3 \leq N_H$$

Следует отметить, что цена топлива и удельная стоимость ветроэнергетической установки увеличиваются с течением времени, то есть, необходимо учитывать возможную инфляцию. При десятилетнем расчетном периоде эксплуатации автономной системы электроснабжения цена топлива уточняется следующим образом:

$$k_{Tt} = k_T (1 + a)^t \qquad (7.32)$$

На рисунке 7.8 в качестве примера показан график изменения целевой функции для климатических условий Ростовской области. При этом принято: $k_{ВУ}$ = 1,0 тыс. руб/м^2, k_T = 15 руб/кг.

Как видно из приведенного рисунка, рабочая скорость ветра имеет оптимальные значения, которые определяют оптимальные размеры ветроколеса (ометаемую площадь). На рисунке 7.9 показан график целевой функции в зависимости от рабочей скорости ветра для среднесуточной нагрузки 500 Вт. Расчет рабочей скорости ветра для других значений среднесуточной нагрузки показал, что она остается низменной.

Как следует из приведенных графиков, наиболее эффективно применять для дублирования и разгрузки топливной автономной электростанции ветроэнергетическую установку, рассчитанную на рабочую скорость 11 – 12 м/с. Этот результат несколько превышает известные рекомендации по выбору рабочей скорости ветроустановки системной электростанции. Это можно объяснить тем, что при работе ветроустановок параллельно с централизованной системой электроснабжения они располагаются в разных климатических зонах и взаимно компенсируют недостаток энергии ветра.

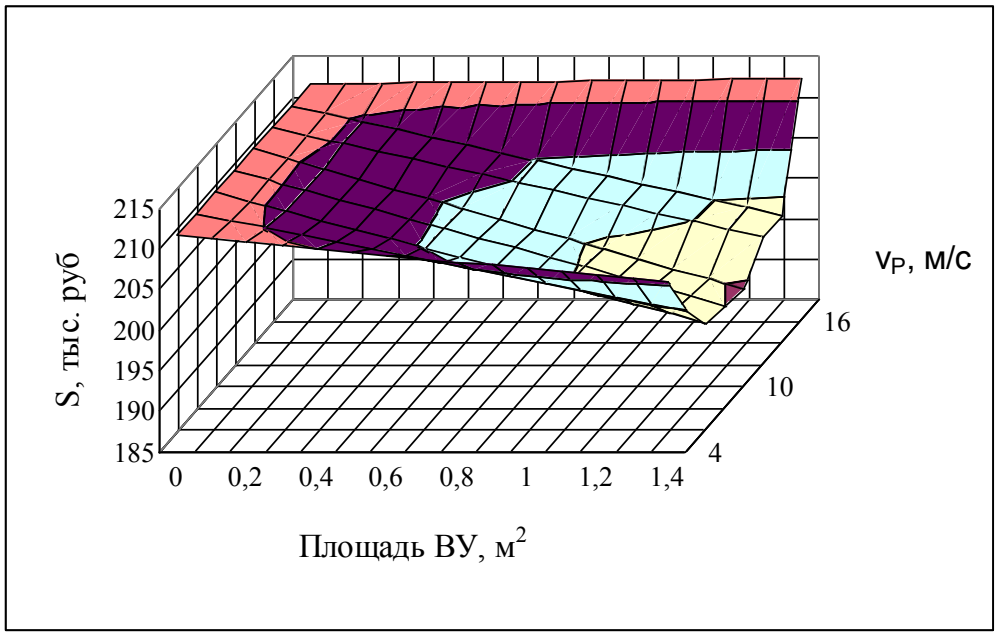


Рисунок 7.8. Реализация целевой функции
оптимизации параметров автономного энергетического комплекса
на основе ВУ и топливной электростанции

Размеры ветроэнергетической установки при этом определяются по известным формулам.



Рисунок 7.9. Сечение поверхности,
отображающей целевую функцию при ометаемой площади 1,5 м^2

7.4. Методы массовых расчетов автономных ветроэлектростанций

В процессе инженерных расчетов определяются оптимальные параметры автономных ветроэлектростанций, приводящие к их наиболее высокой конкурентоспособности. В предыдущих пунктах разработана теория и получены основные методические положения автономных ветроэлектростанций Однако для конкретных условий (для конкретного заказчика) применение полученных методических положений затруднительно ввиду необходимости оптимизации параметров автономных ветроэлектростанций для каждого конкретного случая.

Для проведения расчетов для массовых заказчиков желательно иметь инженерные методы, позволяющие получать искомые оптимальные параметры более простыми способами без поиска экстремумов целевых функций. В основе таких расчетов могут быть различные эмпирические функции (например, функции уравнений линейной регрессии), графики и таблицы,

описывающие зависимости оптимальных параметров от влияющих факторов. Получить такие зависимости можно путем описания движения оптимального параметра в области изменения влияющих на него факторов.

Автономные ветроэлектростанции с пропеллерными ветроустановками.

Ранее нами было установлено, что рабочая скорость ветра для ветроэнергетических установок пропеллерного типа на территории Ростовской области должна быть 6 м/с не зависимо от эквивалентной мощности потребителя. При этом для удовлетворения нагрузки N = 1,5 кВт необходима ветроэнергетическая установка с ометаемой площадью 55 м^2. Такая площадь соответствует ветроколесу диаметром D = 8 м. Такие значительные размеры ветроустановки обусловлены требованиями высокой надежности электроснабжения, не менее 0,9.

При изменении эквивалентной мощности потребителя при сохранении требуемой надежности мощность ветроустановки изменяется пропорционально

$$\frac{N_{ВУ}}{N_{ВУР}} = \frac{N}{N_{Р}} \qquad (7.33)$$

где $N_{ВУ}$ – мощность ветроустановки при исходной нагрузке, кВт; $N_{ВУ}$=3кВт;

N – исходная среднесуточная эквивалентная мощность нагрузки, кВт. N = 1,5 кВт.

$N_{ВУР}$ – расчетная мощность ветроустановки при другой нагрузке, кВт;

$N_{Р}$ – расчетная среднесуточная эквивалентная мощность нагрузки, кВт.

Из пропорции (7.33) следует:

$$N_{ВУР} = 2N_Р \qquad (7.34)$$

Размеры ветроколеса при этом можно определить следующим образом

$$D_{ВУ} = \sqrt{\frac{4N_{ВУР}}{\pi v_Р{}^3 \eta_{ВУ}}} \qquad (7.35)$$

где $D_{ВУ}$ – расчетный диаметр ветроустановки для другой эквивалентной мощности потребителя при надежности электроснабжения 0,9, м.

С учетом (7.34), получаем

$$D_{ВУ} = 0{,}18\sqrt{N_Р} \qquad (7.36)$$

При изменении требований к надежности электроснабжения в сторону уменьшения, уменьшатся и размеры ветроустановки, так как потребуется аккумулировать меньше энергии. Как следует из расчетов п. 7.3, для покрытия эквивалентной мощности 1,5 кВт при надежности 0,9 требуется ветроустановка мощностью 3 кВт. При удовлетворении той же мощности с вероятностью 0,5 потребуется ветроустановка мощностью 2 кВт, то есть, размеры ветроколеса можно уменьшить в 1,5 раза. Однако составить простую пропорцию, аналогичную (7.33) по теории подобия нельзя, так как изменение энергетических и штилевых периодов подчиняются нормальному закону, график которого нелинейный.

В этом случае для массовых расчетов можно пользоваться следующей эмпирической зависимостью /6/:

$$N_{ВУ} = 28{,}5\ X^3 - 54{,}9\ X^2 + 35{,}8\ X - 5{,}7 \qquad (7.37)$$

Здесь X – вероятность энергообеспечения.

Диаметр ветроколеса при этом определяется следующим образом:

$$D = 0{,}095\sqrt{N_{ВУ}} \qquad (7.38)$$

Здесь $N_{ВУ}$ – требуемая мощность ветроустановки, Вт.

При изменении эквивалентной нагрузки потребителя электрической энергии и при сохранении требований к вероятности энергообеспечения 0,9 емкость аккумуляторной батареи рассчитывается по формуле:

$$C_A = 24\frac{N_{ВУ} - N_{ЭКВ}}{U_H t_Э \eta_A} \qquad (7.39)$$

Энергетический период при этом принимается 7 суток. При изменении требований к вероятности энергообеспечения, можно пользоваться той же зависимостью, рассчитав гарантированный энергетический период для заданной вероятности энергообеспечения. Однако пользоваться функциями Лапласа при массовых вычислениях затруднительно. В этой связи можно пользоваться эмпирическим уравнением (7.40), обеспечивающим расчет гарантированных энергетических периодов в диапазоне вероятности энергообеспечения 0,5 . . . 0,9 /6/.

$$t_Э = 58\ X - 55{,}7\ X^2 \qquad (7.40)$$

С учетом уравнения (7.40) емкость аккумуляторных батарей можно рассчитать по выражению

$$C_A = 1323 - 300\ X_1 - 3940X_2 + 2814X_1^2 + 650X_1X_2 \qquad (7.41)$$

Здесь X_1 – эквивалентная среднесуточная мощность потребителя электрической энергии, кВт;

X_2 – требуемая надежность электроснабжения.

Автономные ветроэлектростанции с роторными ветроустановками.

Расчет автономных энергетических комплексов на основе роторных ветроустановок можно упростить по аналогичной методике. С учетом взаимозависимостей для роторной ветроустановки, были получены следующие эмпирические уравнения

$$N_{ВУР} = 1{,}45N_Р \qquad (7.42)$$

По той же аналогии с пропеллерной установкой, но с учетом расчетных параметров роторной ветроустановки получаем, что ометаемую площадь ротора Савониуса в зависимости от среднесуточной нагрузки потребителя можно вычислить следующим образом.

$$F_{ВУР} = 0{,}03N_Р \qquad (7.43)$$

Зависимость штилевых периодов от значения надежности энергообеспечения можно, по аналогии с рассуждениями для пропеллерной ветроустановки, можно описать уравнением:

$$t_A = 8{,}786X^2 - 7{,}45X + 3{,}6 \qquad (7.44)$$

Отметим, что данная методика инженерных расчетов основана на эмпирических уравнениях, полученных для климатических условий Ростовской области. Для других регионов России необходимо пользоваться методическими положениями п.7.3.

Вопросы
для самоконтроля

1. Почему для получения электроэнергии переменного тока в основном используются ветроустановки пропеллерного типа?
2. Какие Вы знаете способы установки ветроколеса пропеллерного типа на ветер?
3. В чем проблема применения ветроустановки роторного типа для выработки электроэнергии переменного тока?
4. Каким образом можно использовать ветроустановку роторного типа для получения электроэнергии переменного тока?
5. На какую рабочую скорость ветра рассчитываются системные ветроэлектростанции?
6. На какую рабочую скорость ветра должны быть рассчитаны автономные ветроэлектростанции с аккумуляторным резервом, работающие на территории Ростовской области?

7. На какую рабочую скорость ветра должны быть рассчитаны автономные ветроэлектростанции с резервной топливной электростанцией, работающие на территории Ростовской области?

Задания
для закрепления материала

1. Объясните выражение (7.23).
2. Выведите формулу (7.24).
3. Объясните выражение (7.26).
4. Выведите формулу (7.27).
5. Сопоставьте (7.28) и (7.29) и объясните исключения.
6. Выведите формулу (7.31).
7. Пользуясь расчетами ветроэлектростанции для средней нагрузки 1,5 кВт при вероятности энергообеспечения 0,9 пересчитайте ее параметры для другой мощности и другой вероятности энергообеспечения.

Радел 4. Энергия геосферы и гидросферы Земли

Лекция 8. **Использование геотермальной энергии**

8.1.Тепловой режим земной коры

Что бы понять, что собой представляет геотермальная энергия, вспомним о строении Земли. По современным представлениям твердая часть планеты Земля состоит из трех сфер (рисунок 8.1): земная кора, мантия и ядро.

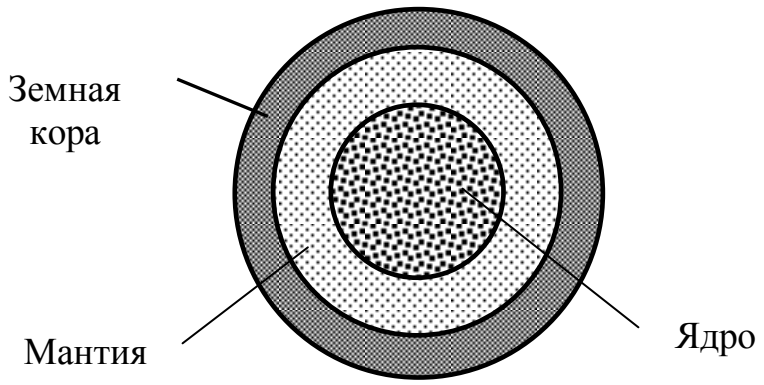


Рисунок 8.1. Строение Земли

Естественно, эти сферы не являются сферами в геометрическом смысле слова. Так толщина земной коры под океанами достигает 7 км, а под атмосферой доходит до 130 км. То же самое можно сказать и о других сферах Земли.

Мантия имеет среднюю толщину около 2900 км, верхняя поверхность которой называется поверхностью Мохоровичича в честь югославского геофизика Андрея Мохоровичича. Ядро разделяется на внешнее, находящееся в жидком состоянии, и внутреннее, или субъядро.

Современные представления о происхождении Земли изменились. Ранее считалось, что планета Земля образовалась в виде сильно разогретого шара, который постепенно остывает. Сейчас известно, что Земля образовалась из скопления метеоритных тел около 4,7 млрд. лет назад и имела первоначальную температуру 700 – 2000ºС /8, 9, 10/. Затем ядро Земли не только не охлаждалось, а наоборот нагревалось за счет распада радиоактивных элементов. За счет протекания этих процессов из ядра Земли образовался тепловой поток к земной коре и ее поверхности. В современной теории земных процессов предполагается, что глубинные слои Земли продолжают медленно нагреваться на несколько градусов за 10 млн. лет, в то время как поверхность Земли еще медленнее охлаждается /8, 9, 10/.

Таким образом, по направлению к ядру Земли температура ее слоев повышается. На глубине 50 км она составляет 700 – 800ºС, на глубине 500 км около 1500 - 2000ºС, на глубине 1000 км приблизительно 1700 - 2500ºС, на границе раздела мантии и ядра (глубина 2900 – 3000 км) температура самая высокая, и достигает порядка 2000 - 4700ºС, в центре Земли на глубине 6371 км (средний радиус Земли) 2200 – 2500ºС. От более нагретого ядра на границе с мантией тепловой поток поступает к менее нагретой поверхности. Отметим, что хотя тепло, находящееся в центре Земли, огромно, плотность теплового потока на поверхности Земли составляет в среднем 0,05 Вт/м^2, то есть в 4000 раз меньше интенсивности солнечного излучения.

Из-за различной структуры и состава земной коры в ней имеются места способствующие проникновению глубинного тепла к поверхности. В этих местах температура вещества на глубине 5 – 10 км может составлять 100 - 300ºС. Чаще всего это вещество находится в виде нагретой воды или перегретого пара, и такие геотермальные источники называются соответственно гидро- и паротермальными.

Гидротермальные и паротермальные источники тепла образовались за счет прохождения нагретой воды или пара под давлением к поверхности

Земли. Естественно, что при прохождении температура их падает за счет отдачи тепла окружающим твердым породам, вследствие чего они и имеют такую, сравнительно низкую, температуру.

Гораздо более высокую температуру имеют твердые породы. Такие геотермальные источники называются петротермальными. К сожалению, петротермальные источники тепла располагаются гораздо глубже и менее доступны.

8.2. Использования геотермального тепла в системах теплоснабжения и производства электроэнергии

В настоящее время геотермальная энергия достается человечеству очень дорого и ее использование ограничено малым числом гидро- и паротермальных источников. В России имеется Паужетская геотермальная электростанция мощностью 23 МВт, построенная в 1967 году на Камчатке. Геотермальные электростанции Мира представлены в таблице 8.1 /8, 9, 10/.

Таблица 8.1

Использование геотермальных источников в Мире

Страна	Место расположения	Используемая мощность, МВт	
		достигнутая	потенциальная
Исландия	Неймефьял	40	500
Италия	Лардерелло	420	420
Мексика	Сьерро Прието	150	500
Новая Зеландия	Уайракей	250	350
Россия	Паужетская долина	23	60
Сальвадор	–	100	100
США	Долина гейзеров	700	10 000
Филиппины	–	250	1 000
Япония	Мацукава	250	10 000

Как следует из приведенных данных, в нашей стране запасы геотермальной энергии весьма ограничены и рассчитывать на развитие относитель-

но дешевых геотермальных энергостанций, использующих гидротермальную и паротермальную энергию, не приходится.

Для обогрева зданий и горячего водоснабжения горячая вода или пар подаются через систему очистки и фильтрации в соответствующие системы (теплоснабжения или горячего водоснабжения). Таким образом, система теплоснабжения на гидротермальных и паротермальных источниках устроена достаточно просто. Тем более, что в большинстве таких источников теплоносители (вода или пар) находятся под давлением и их извлечение не создает особых затруднений.

Гораздо сложнее извлечение тепла из петротермальных источников. Нагретые твердые породы находятся под землей, причем, наиболее доступные на глубине 10 – 20 км. Такая глубина залегания при современной технике бурения не является непреодолимой. В Мире, в том числе и в России, существует богатый опыт бурения таких скважин. Трудности состоят в подаче тепла от этих источников к потребителям и преобразователям.

Существует несколько проектов отбора тепла петротермальных источников, среди которых наиболее реальным представляется следующий.

В зоне близко расположенного петротермального источника бурится две скважины на некотором расстоянии друг от друга или на разную глубину (рисунок 8.2).

В скважины опускаются трубы, имеющие отверстия в нижней части. В одну из труб закачивается вода. Предполагается, что вода под давлением пробьет себе путь к другой трубе, по которой она будет откачиваться на поверхность и подваться к преобразователю или потребителю тепла. Проходя между трубами через нагретую твердую породу петротермального источника, вода нагреется и будет откачиваться уже в горячем состоянии.

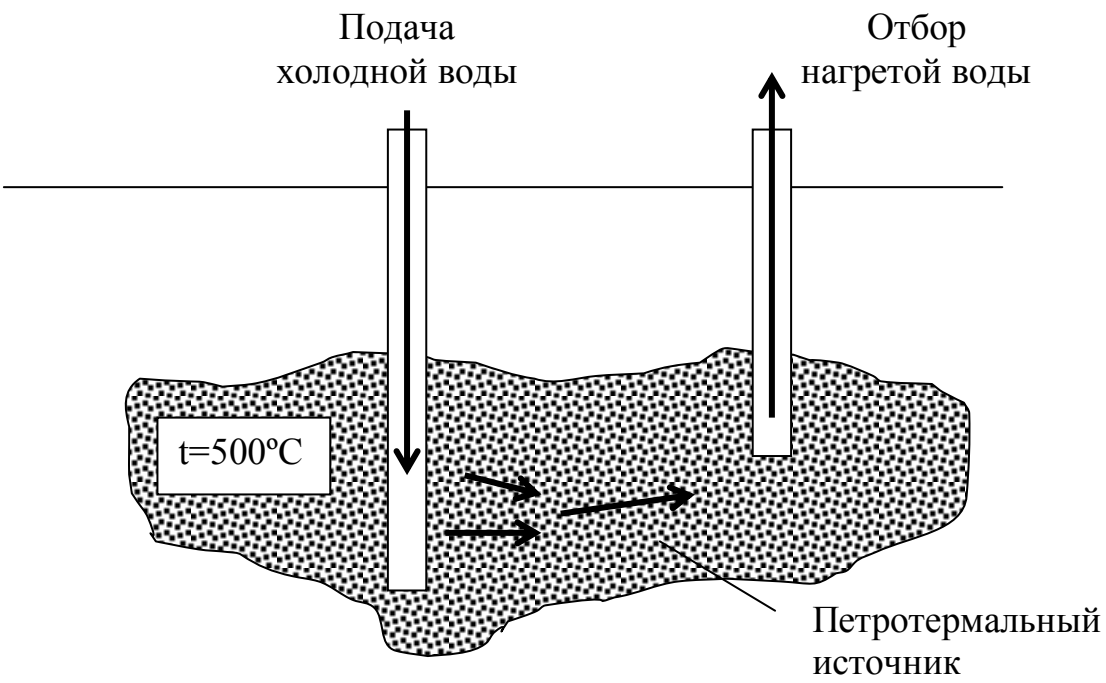


Рисунок 8.2. Добыча теплоты из петротермальных источников (проект)

Недостатки такого проекта можно выявить умозрительным путем.

Первое, нет оснований предполагать, что нагнетаемая вода пробьет себе путь именно к заборной трубе. Вероятность такого исхода можно значительно увеличить, пробурив множество нагнетательных и заборных скважин, расположенных вперемежку, однако при этом стоимость увеличится пропорционально числу скважин.

Второе, даже если нагнетаемая вода пробет себе путь в нужном направлении, то по истечении времени русло бдет размываться, увеличивая пропускную способность, и вода будет нагреваться медленнее и до более низких температур. Методами моделирования установлено, что реальный срок службы таких источников не превышает 20 лет, что очень мало даже для традиционных источников энергии.

Использование геотермальных источников энергии для получения электроэнергии имеет некоторые особенности и не может быть осуществлено по аналогии, например, с солнечными тепловыми электростанциями. Дело в том, что для работы паровой машины с приемлемыми энергетическими показателями требуется пар с температурой не менее 130ºС. Учитывая, что температура гидро- и паротермальных источников практически такая же, то их использование для работы паровой машины становится проблематичным из-за неизбежных потерь тепла между источником и машиной.

Для устранения этого недостатка применяют другие рабочие тела, например, аммиак, фреон или изобутан. На рисунке 8.3 приведена схема паротурбинной установки на изобутане /8/.

Электростанция работает следующим образом. Теплоноситель от геотермального источника с низкой температурой нагревает и доводит до кипения изобутан. Пар изобутана под давлением поступает на газовую основную турбину, которая вращает генератор. Отработанный пар изобутана поступает в конденсатор и конденсируется до жидкого состояния. Жидкий изобутан подается в изобутановый котел для повторного использования и цикл повторяется. Отработанная геотермальная вода или пар возвращаются в геотермальный источник. Необходимость этого будет показана в следующем пункте.

8.3. Экологические показатели геотермальных ТЭС

Геотермальное тепло является нетрадиционным источником энергии, но не возобновляемым. То есть, его принудительное освобождение может иметь существенное негативное влияние на экологию. Рассмотрим экологическую сторону процесса использования геотермальных источников энергии.

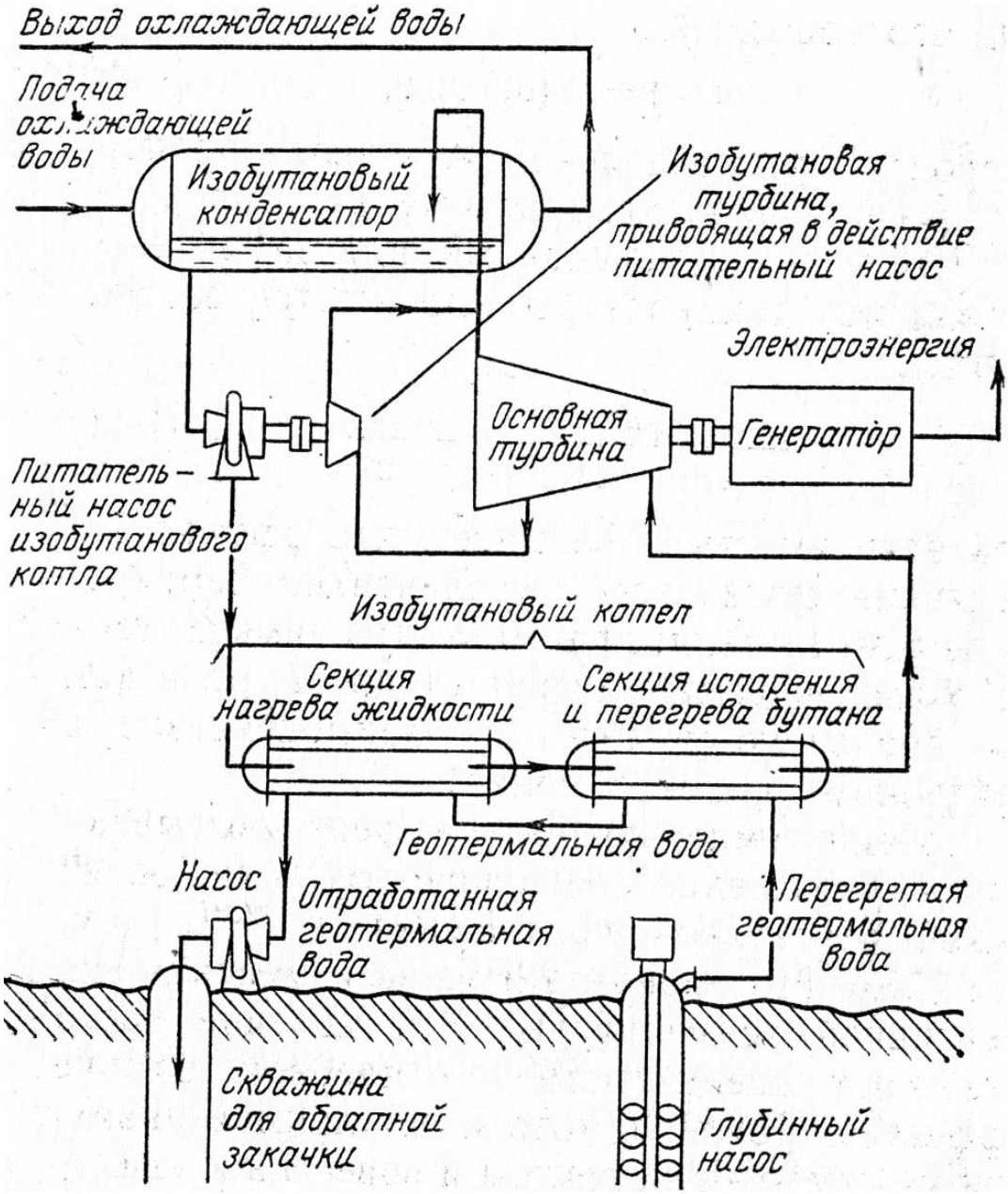


Рисунок 8.3. Схема электростанции на геотермальном источнике с низкой температурой

Наиболее явным отрицательным показателем работы геотермальных теплоэлектростанций является очень высокий шум. Дело в том, что для их работы используются не открытые источники, а близколежащие источники

геотермальной энергии. Теплоносители этих источников (пар или вода) находятся под высоким давлением и имеют достаточно высокую температуру. Вырываясь под давлением из пробуренных скважин, они создают очень высокий шум, часто перерастающий в оглушительный рев, что, несомненно, вредно для здоровья окружающих людей и животных.

Второй экологически негативный фактор это состав теплоносителей. Фактически геотермальная вода является раствором многих соединений, среди которых много агрессивных и ядовитых. Так в геотермальных водах присутствует сероводород H_2S. Это соединение обладает неприятным запахом, и, кроме того, токсично при сравнительно малых концентрациях в воздухе. Запах сероводорода /8, 9/ обнаруживается при концентрации частиц 0,002 млн. $^{-1}$, начинают слезиться глаза при концентрации 10 млн. $^{-1}$, при концентрации 20 млн. $^{-1}$ наступает раздражение легких, то есть, такая концентрация вызывает приступы кашля. Если дышать воздухом с концентрацией сероводорода 600 млн. $^{-1}$ в течение получаса, то наступает летальный исход. При нормальных атмосферных условиях сероводород вблизи ГеоТЭС разбавлен двуокисью углерода и кислородом воздуха до 5 млн. $^{-1}$, однако во время туманов и в безветрие его концентрация может повышаться до вредных и опасных значений.

Известны и другие побочные экологические эффекты выброса сероводорода. Так в Новой Зеландии выбросы H_2S и CO_2 спровоцировали быстрое размножение микроскопических водорослей в ближайшем озере. Скорость их роста настолько высока, что озеро приходится очищать раз в две недели.

Как уже отмечалось, для работы геотермальных теплоэлектростанций приходится бурить достаточно глубокие скважины и освобождать теплоноситель, находящийся под высоким давлением. Теоретически это может привести к повышению сейсмоактивности, то есть, стать причиной землетрясений. Следует отметить, что такого явления, как землетрясение по причине извлечения геотермального носителя пока не наблюдалось нигде на Земле.

Однако при расширении геотермальной энергетики эту возможность следует учитывать.

Если при использовании геотермального носителя он после отработки не будет возвращаться назад в подземный бассейн, то это может вызвать просадку грунта, особенно мягких и рыхлых пород. Так в районе Уайракей смещение грунта в вертикальном и горизонтальном направлениях с начала эксплуатации геотермальной электростанции (1956 год) составила 4 метра. Видимо это явление можно замедлить или прекратить, если отработанную геотермальную воду закачивать под давлением обратно в зону ее забора.

Таким образом, использование геотермальных энергоресурсов не является экологически безвредным, что объясняется неизбежным вмешательством в естественный процесс их освобождения. Аналогичная причина экологической опасности существует и при широкомасштабном использовании гидроресурсов.

Вопросы для самоконтроля

1. На какие геосферы можно разделить земной шар по диаметральному сечению?
2. Какой возраст Земли?
3. Какую первоначальную температуру имело ядро Земли?
4. Какие источники называются паротермальными?
5. Какие источники называются гидротермальными?
6. Какие источники называются петротермальными?
7. Какая геотермальная электростанция имеется в России? Какова ее мощность?
8. В какой стране наибольшая мощность геотермальных энергостанций.

9. Какие проекты добычи теплоты из петротермальных источников Вам известны? Каковы недостатки этих проектов?
10. Какие негативные экологические факторы присущи геотермальным энергостанциям?

Задания
для закрепления материала

1. Назовите перспективные места на планете, в которых можно использовать геотермальную энергию.
2. Объясните работу электростанции на геотермальном источнике с низкой температурой (рисунок 8.3).
3. Назовите состав газа, вырывающегося с паром геотермального источника.
4. Назовите факты негативного влияния геотермальных источников на экологию.

Лекция 9. **Использование энергии гидросферы**

9.1. Энергетические ресурсы океана

Океанические массы обладают двумя видами энергии: механической, обусловленной колебательными движениями волн и приливами, и тепловой, обусловленной разностью температур на поверхности и в глубине океана. Существует еще и энергия океанических течений. Однако эти течения играют очень важную роль в формировании земного климата и нарушать их естественное состояние чревато глобальными негативными последствиями.

Учитывая, что гидросфера занимает более 3/4 поверхности планеты, океаническая энергии априорно достаточно большая, но сильно рассеяна, то есть, имеет малую плотность. Оценка ресурсов и запасов энергии мирового океана дана в главе 1. Здесь мы рассмотрим некоторые аналитические выражения расчета энергии волн и приливов.

Энергия на единицу длины фронта волны на глубокой воде (когда дно не оказывает влияния на ее форму) пропорциональна квадрату амплитуды и периоду /8, 9/:

$$w_B = \frac{\rho \cdot a^2 g^2 T^2}{4\pi} \qquad (9.1)$$

где w_B – энергия волны на единицу длины фронта волны, Дж/м;

ρ – плотность жидкости в волне, кг/м^3;

a – амплитуда волны, м;

g – ускорение свободного падения, м/с^2;

T – период волны, с.

В силу этого, энергетическую ценность представляют волны с амплитудой не менее 2 метров и периодом не менее 10 секунд. Энергия одного

метра фронта такой волны составляет более 3 кДж/м. Такие волны имеют место в открытом океане (рисунок 9.1), что усложняет процесс использования их энергии. Вблизи берегов волны имеют гораздо меньший период (3 – 4 с) и меньшую амплитуду (0,5 – 0,6 м), и их энергия на единицу фронта составляет 20 – 50 Дж/м, что пренебрежимо мало по сравнению с волнами в открытом океане.

Удаленность "энергетических" волн от берегов снижает их практическую ценность для получения и использования энергии.

Энергия приливов обусловлена притяжением водной массы системами Земля – Луна (основная причина) и Земля – Солнце (возмущающая причина). В результате взаимодействия с этими телами вода в мировом океане меняет свой уровень. Средняя разность верхнего и нижнего уровня (высота прилива) составляет приблизительно 1 метр, однако, как отмечалось в главе 1, на Земле существую места с гораздо большей разностью, 10 и более метров. В России это Белое и Баренцево моря (прилив до 10 метров) и Охотское море (прилив до 13 метров).

Повышение высоты приливов объясняется следующим образом. Вода удерживается на Земле (как и все тела) за счет ее гравитационной силы. Луна оказывает возмущающее воздействие на гравитационную силу Земли, ослабляя ее. В результате уровень воды со стороны Луны повышается, а с противоположной стороны понижается. Так как Луна вращается вокруг Земли с периодом $T_Л$ = 24 часа 50 минут 28 секунд, то в мировом океане образуется приливная волна, двигающаяся вслед за Луной с таким же периодом. Волна – это колебания точек с определенной частотой, связанной с периодом соотношением $f_Л = 1/T_Л$. Если эта волна попадает в пространство, где частота собственных колебаний волн кратна частоте приливной волне, то наступает резонанс, который, как известно, увеличивает амплитуду волны.

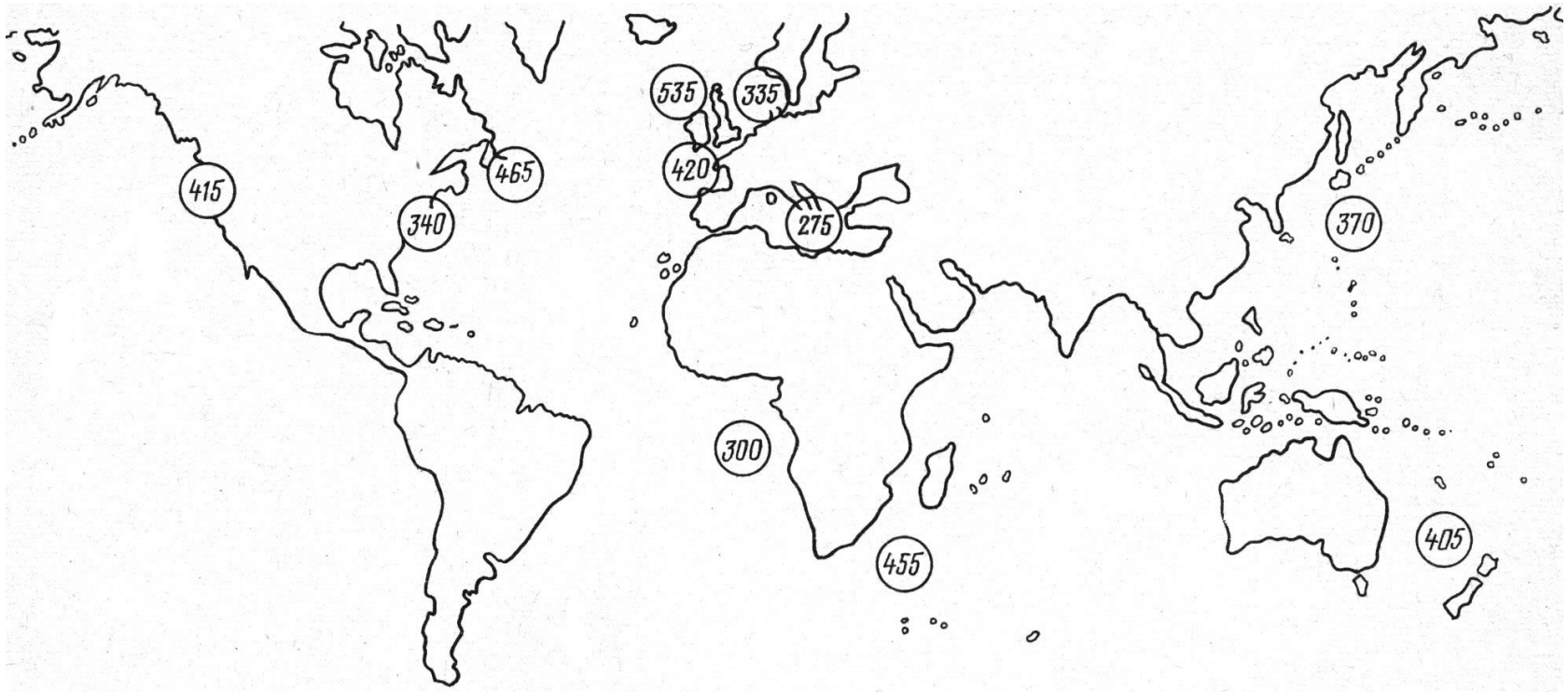


Рисунок 9.1. Среднегодовая энергия океанических волн

(наиболее эффективные районы)

(300) – 300 МВт.час/м

Расчетами установлено, что полный резонанс возникает при условии /9/:

$$\frac{L}{\sqrt{h}} \approx 36000 \text{м}^{0,5} \qquad (9.2)$$

где L – длина резонирующего пространства, м;

h – глубина резонирующего пространства, м.

Приблизительно такие условия и имеются в Белом, Баренцевом и Охотском морях. В Белом море это Мезенская губа, в Баренцевом море – пролив Карские ворота, в Охотском море – Пенжинская губа и Тугурский залив.

Энергия прилива, это энергия поднятой воды, то есть:

$$E_{ПР} = \frac{\rho \cdot F_Б \cdot g \cdot h^2}{2} \qquad (9.3)$$

где $F_Б$ – площадь поверхности бассейна прилива, $м^2$.

Если энергия расходуется за все время прилива и отлива, то средняя мощность прилива равна:

$$N_{ПР} = \frac{\rho \cdot F_Б \cdot g \cdot h^2}{2 \cdot T_{ПР}} \qquad (9.4)$$

Здесь $T_{ПР}$ – период прилива, с.

Высота приливов в течение лунного месяца изменяется по синусоидальному закону с периодом, равным половине лунного месяца. То есть, высота прилива в момент времени t после достижения средней высоты определяет по формуле /9/:

$$h_t = \left(\frac{h_{max} + h_{min}}{2}\right) + \left(\frac{h_{max} - h_{min}}{2}\right) \sin \frac{4\pi t}{T_{ЛМ}} \qquad (9.5)$$

где h_{max}, h_{min} – максимальная и минимальная за лунный месяц высота прилива, м;

$T_{ЛМ}$ – продолжительность лунного месяца, $T_{ЛМ}$ = 29,53 суток.

Средняя мощность перспективных приливных бассейнов в России составляет около 115 ГВт.

Тепловая энергия океана обусловлена разностью температур поверхностного слоя, поглощающего солнечное излучение, и глубинных (холодных) слоев. Мощность, отдаваемая теплой водой в идеальной тепловой машине равна:

$$P_0 = \rho \, c \, Q \, (T_Г - T_X) \qquad (9.6)$$

где ρ – плотность теплоносителя, кг/м;

c – теплоемкость теплоносителя, Дж/кг·град.;

Q – расход теплоносителя, $м^3/с$.

Согласно второму закону термодинамики максимальная механическая

мощность, которую можно получить в идеальной тепловой машине, равна:

$$P_M = P_0 \frac{T_Г - T_Х}{T_Г} \qquad (9.7)$$

Таким образом, при максимальном перепаде температур в океане 20 К, удельный расход воды составляет 650 кг/кВт.час. Для реальных энергетических установок, естественно, требуемый расход будет больше. То есть, тепловая энергия океана оказывается достаточно дорогой. Кроме того, учитывая низкое качество тепла (качество тепла тем выше, чем выше температура теплоносителя по отношению к температуре охладителя) в качестве рабочего тела придется использовать жидкости с низкой температурой кипения (см. проблемы использования геотермальной энергии).

Учитывая этот вывод, энергетические установки, преобразующие тепловую энергию океана, возможны только в тех местах, где перепад температур не менее 15 градусов. К таким местам в мировом океане относятся его экваториальные районы, русло течения Гольфстрим и других теплых океанических течений. Учитывая, что все океанические течения имеют начало в экваториальных водах и участвуют в тепловом балансе Земли, отбор тепла в этих районах океана должен быть тщательно обоснован с экологической точки зрения.

9.2. Энергетические установки преобразующие энергию океана

Электростанции, используемые энергию океанических волн, существуют пока только в стадии научно-исследовательских разработок и научных идей. Рассмотрим принципиальные идеи и перспективы использования

некоторых из них.

Наиболее простым и достаточно эффективным является устройство профессора Эдинбургского университета С. Солтера (рисунок 9.2) /9/. Это устройство преобразовывает колебательное движение жидкости во вращательно-колебательное движение поплавка, называемого "уткой".

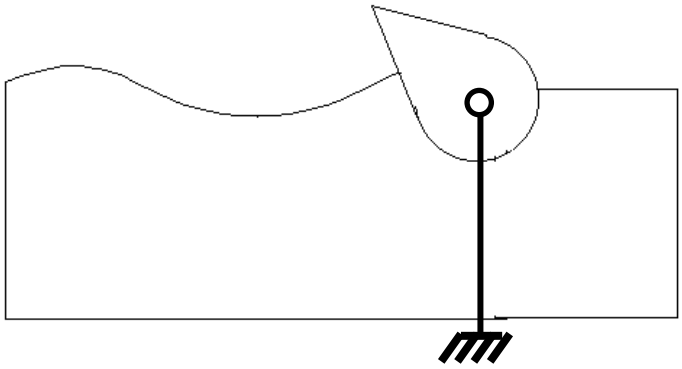


Рисунок 9.2. Поплавок Солтера

Волны слева от поплавка заставляют его колебаться вокруг заякоренной оси, а цилиндрическая противоположная поверхность препятствует перемещению волны вправо, то есть, прерывает движение волны, отбирая ее энергию. Полезная мощность снимается с оси вращательно-колебательной системы.

Данное устройство пропускает не более 5% энергии волны вправо, то есть, является достаточно эффективным. На рисунке 9.3 показана зависимость к.п.д. устройства Солтера от периода колебаний волны при диаметре 15 метров /9/.

Устройство Солтера работает независимо от направления волны, что позволяет использовать его в открытом океане на глубокой воде. Предлагается нить таких поплавков протяженностью несколько километров установить

в районе западнее Гебридских островов (Атлантический океан). Предполагаемая мощность такой станции 100 МВт.

Другой тип преобразователя энергии волны в электроэнергию использует колебания давления газа, защемляемого столбом воды (рисунок 9.4).



Рисунок 9.3. Энергетическая эффективность поплавка Солтера

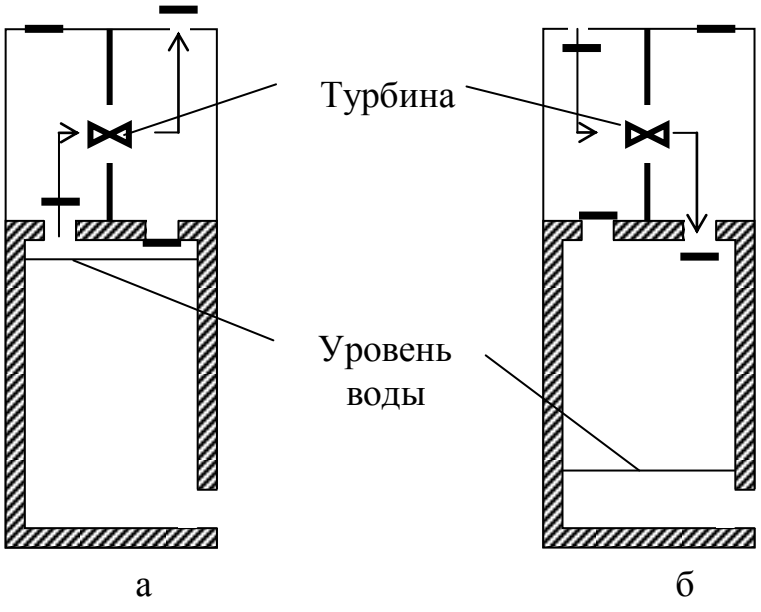


Рисунок 9.4. Установка для преобразования энергия волны

а – подъем волны, б – спад волны

Установка работает следующим образом.

При подъеме волны нижняя полость заполняется водой, которая вытесняет газ через левый нижний клапан в верхнюю полость и через правый верхний клапан в атмосферу. Газ, проходя через турбину, вращает ее, которая в свою очередь вращает генератор.

При спаде волны уровень в нижней полости падает, создавая разрежение. Воздух из атмосферы засасывается через верхний левый клапан в верхнюю полость, проходит через турбину, вращая ее, и далее поступает через правый нижний клапан в нижнюю полость.

Таким образом турбина вращается в одну сторону и при подъеме и при спаде волны, а не совершаются вращательно-колебательные движения, как в поплавке Солтера.

Уже имеются коммерческие установки такого типа, работающие по принципу изменения давления газа, правда, небольшой мощности. Такие установки используются для электроосвещения аварийных буйков.

Схема действия приливной энергоустановки приведена на рисунке 9.5 /9/.

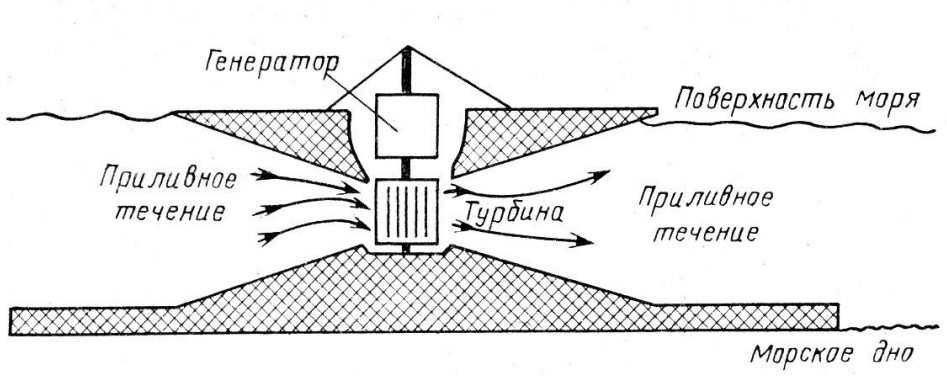


Рисунок 9.5. Схема приливной электростанции

Приливные электростанции устанавливаются на входе в бассейн высокого прилива на высоте, несколько меньшей нижнего уровня воды при отливе. Это дает возможность использовать оба направления движения воды (и при приливе, и при отливе). Естественно необходима система реверсирования, подобная представленной на рисунке 9.4, или реверсивная турбина. Принцип действия приливной электростанции /9/ понятен из рисунка 9.5 и не требует дополнительных пояснений.

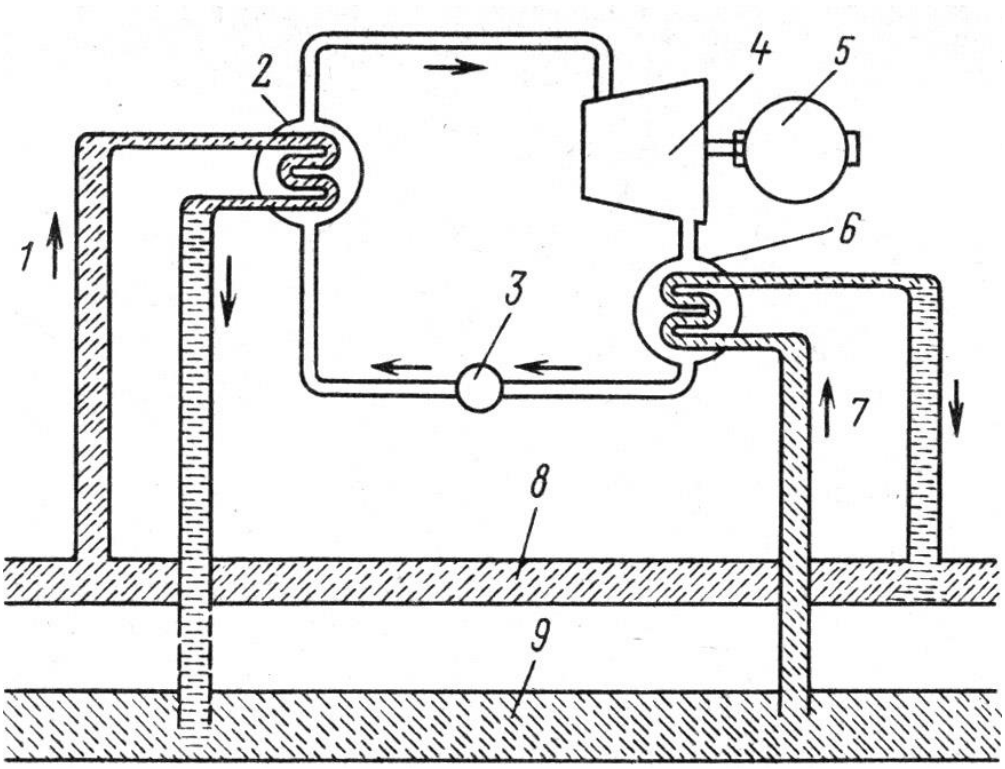


Рисунок 9.6. Схема электростанции на тепловой энергии океана

1 – подача теплой воды, 2 – испаритель, 3 – насос подачи рабочей жидкости, 4 – турбина, 5 – генератор, 6 – конденсатор, 7 – подача холодной воды, 8 –

поверхность океана, 9 – океанические глубины.

Приливные электростанции в отличие от волновых имеют практическое применение. Этому способствовали более низкие затраты на транспортировку электроэнергии, и высокая регулярность и предсказуемость энергии приливов.

Схема электростанции, использующая тепловую энергию океана, показана на рисунке 9.6.

Приведенная на рисунке 9.6 электростанция по сути является тепловой машиной, приводимой в действие разностью температур холодного и горячего тела, и вращающей генератор. Рабочее тело (легко испаряемая жидкость) циркулирует по замкнутой схеме: отбирает тепло горячей воды в теплообменнике испарителя, в паровой фазе приводит в действие турбину, соединенную с генератором, конденсируется в конденсаторе, охлаждаемом холодной водой. Затем цикл повторяется. Электростанции, работающие за счет разности температур слоев океана, находятся в стадии научно-исследовательских разработок, коммерческих проектов пока нет.

Вопросы для самоконтроля

1. Какими основными видами энергии обладают океанические массы?
2. Каковы параметры энергетически ценной волны?
3. Действие каких тел вызывает приливы и отливы?
4. Что такое "высота прилива"?
5. По какому закону изменяется высота приливов?
6. В каких местах в России приливы обладают энергетической

ценностью?

7. Какова средняя мощность приливных бассейнов в России?
8. При каком перепаде температуры воды океана есть смысл использовать его тепловую энергию?
9. Какую энергию океана может преобразовывать поплавок Солтера?

Задания
для закрепления материала

1. Назовите перспективные места на планете, в которых можно использовать энергию приливов.
2. Назовите перспективные места на планете, в которых можно использовать тепловую энергию океана.
3. Изготовьте из пенопласта поплавок Солтера и испытайте его в домашних условиях или в открытом водоеме.
4. Объясните работу установки, представленной на рисунке 9.4.
5. Объясните работу приливной электростанции (рисунок 9.5).
6. Объясните работу электростанции на тепловой энергии океана.

Радел 5. Вторичные энергоресурсы

Лекция 10. **Энергетический потенциал вторичных энергоресурсов**

10.1. Понятие и анализ вторичных энергоресурсов

Для проведения анализа вторичных ресурсов, определим, что подразумевать под вторичными энергетическими ресурсами.

При производстве любых продуктов потребления затрачивается энергия, которая и идет на производство работы по созданию продукта. Учитывая обратимость работы и энергии, часть энергии можно вернуть, "испортив" продукт, например, путем сжигания. Если продукт исчерпал свой срок службы или выполнил возлагаемые на него функции, то желательно вернуть хотя бы часть затраченной на его производство энергии. Если это удастся, то полученную энергию можно использовать для производства другой работы или для получения тепла. То есть, часть энергии, затраченной на производство продукции, можно использовать **вторично**. В соответствии с этим, те материальные объекты, которые могут вернуть часть энергии, называются **вторичными энергоресурсами.**

Отметим, что теоретически можно освободить энергию, заключенную в любом веществе. Например, расплавив металл, можно затем получать тепловую энергию при его охлаждении и возвращения в исходное твердое состояние. В крайнем случае, не отвергается возможность освобождения энергии атомарных связей. Однако на этих примерах уже можно увидеть, что для освобождения энергии, заключенной в каком-то материальном объекте, необходимо то же приложить энергию для производства работы по освобождению заключенной энергии. Для многих материальных объектов соотношение подведенной и полученной энергии оказывается невыгодным.

С учетом этого, **вторичными энергоресурсами** можно считать только те, которые позволяют высвободить энергии больше, чем требуется для ее высвобождения.

Теперь, когда мы окончательно установили, что называть вторичными энергоресурсами, приступим к их анализу и классификации.

Очевидно, вторичные энергоресурсы могут содержать и впоследствии высвобождать только ту часть энергии, которую использовали рукотворно для производства работы по их созданию. А могут содержать и затем высвобождать и часть энергии, полученной ими естественным путем, например, в процессе фотосинтеза. Таким образом, мы можем разделить **эффективные** вторичные энергоресурсы на два вида:

- вторичные энергоресурсы, содержащие и способные высвободить только искусственно подведенную энергию;
- вторичные ресурсы, содержащие и способные высвободить возобновляемую энергию.

Вторичные энергоресурсы первого вида не могут добавить энергии, а способны только экономить энергию, используя часть ее вторично. Вторичные ресурсы второго вида могут быть источниками дополнительной энергии, полученной ими естественным путем от ВИЭ. Очевидно, вторичные энергоресурсы второго вида более ценны в энергетическом отношении.

Далее заметим, что подведенная энергия (возобновляемая и невозобновляемая) тратиться не только на получение целевого продукта, но и на отделение отходов. Отходы представляют ту часть объекта, которую нельзя использовать по целевому назначению. Заметим, что в отходы может превращаться и отработавшая свой срок службы продукция. Кроме того, отходы могут скапливаться в месте производства продукции, а могут рассредоточиваться вместе с распространением целевого продукта. Например, при производстве деревянных изделий, неизбежны отходы в виде стружек, опилок и обрезков, которые сосредоточены в **месте производства** целевых деревян-

ных изделий. А если товар требует упаковки (бумажный коробок или деревянный ящик), то упаковка перейдет в разряд отходов только после приобретения товара, следовательно, в **месте использования** его по назначению, то есть, вдали от места производства. В отходы пойдет и целевой продукт по истечению срока его службы, причем, тоже по **месту использования**. Если эти отходы могут быть вторичными ресурсами, то их по этому признаку можно разделить на **сосредоточенные** и **рассредоточенные**. Очевидно рассредоточенные отходы, представляющие вторичные энергоресурсы, могут быть смешаны с другими отходами, не представляющими энергетической ценности, что потребует затрат не только на их сбор, но сортировку. Заметим, что отходы растительного и животного происхождения (биомасса) могут быть сосредоточенные и условно сосредоточенные. К условно сосредоточенным отходам относятся пожнивные остатки, оставленные на полях. Условно рассредоточенные отходы биомассы не требуют сортировки перед использованием в качестве вторичных энергоресурсов.

Таким образом, биомасса является наиболее эффективным видом вторичных ресурсов, которые, кроме того, относятся к возобновляемым источникам энергии. Это объясняется тем, что растительная биомасса образуется не только в результате потребления питательных веществ, но и в процессе фотосинтеза, при котором энергия фотонов идет на образования хлорофилла, следовательно, на наращивание биомассы. Так как растительная биомасса идет, в том числе, и на корм животных, то отходы животной биомассы также возобновляемы. При освобождении энергии биомассы, например, путем ее сжигания, продукты сгорания возвращаются в окружающую среду и восстанавливаются в новой волне биомассы. Так как процесс воспроизводства биомассы требует определенного времени, то ее расход должен быть регулируемым, то есть, обеспечивающим воспроизводство. К сожалению, в Мире известны случаи интенсивного уничтожения биомассы без обеспечения условий ее воспроизводства, например, вырубка лесных массивов.

10.2. Использование биомассы для получения тепловой и электрической энергии

Так как биомасса содержит горючие вещества (углеводороды и их соединения), то наиболее очевидно ее использование в качестве биотоплива для получения тепла. Хотя биомасса уже первоначально способна гореть, все же требуется некоторая ее подготовка. Так биомасса и ее отходы содержат большое количество воды, и перед сжиганием требует сушки.

Характеристикой любого топлива является его калорийность или теплотворная способность, то есть, удельное количество теплоты, которое можно получить при сжигании единицы массы или объема топлива. Чем выше калорийность топлива, тем меньше его требуется для получения одного и того же количества теплоты. Как упоминалось в главе 1, теплотворная способность биотоплива различна, и зависит от того, в каком виде оно используется. Вспомним, что из биомассы можно получать твердое, газообразное и жидкое биотопливо.

Наиболее просто получать твердое биотопливо, для чего биомассу высушивают. Таким образом, в качестве твердого биотоплива может использоваться сухая древесина или высушенные экскременты животных. Если используются отходы древесины, то для повышения технологичности биотоплива их брикетируют.

Биогаз получают в процессе брожения, и его производство наоборот требует увлажнения биомассы, а затем подогрева и перемешивания.

Эти примеры здесь приведены для понимания, что использование биомассы в качестве биотоплива требует подвода какого-то количества энергии, которое должно потом компенсироваться получением тепловой энергии.

Так как биомассу можно преобразовывать в твердое, газообразное или жидкое биотопливо, то ее можно использовать практически во всех процесса,

требующих тепла, включая и паровые и тепловые машины. На рисунке 10.1 показана схема возможного применения биотоплива.

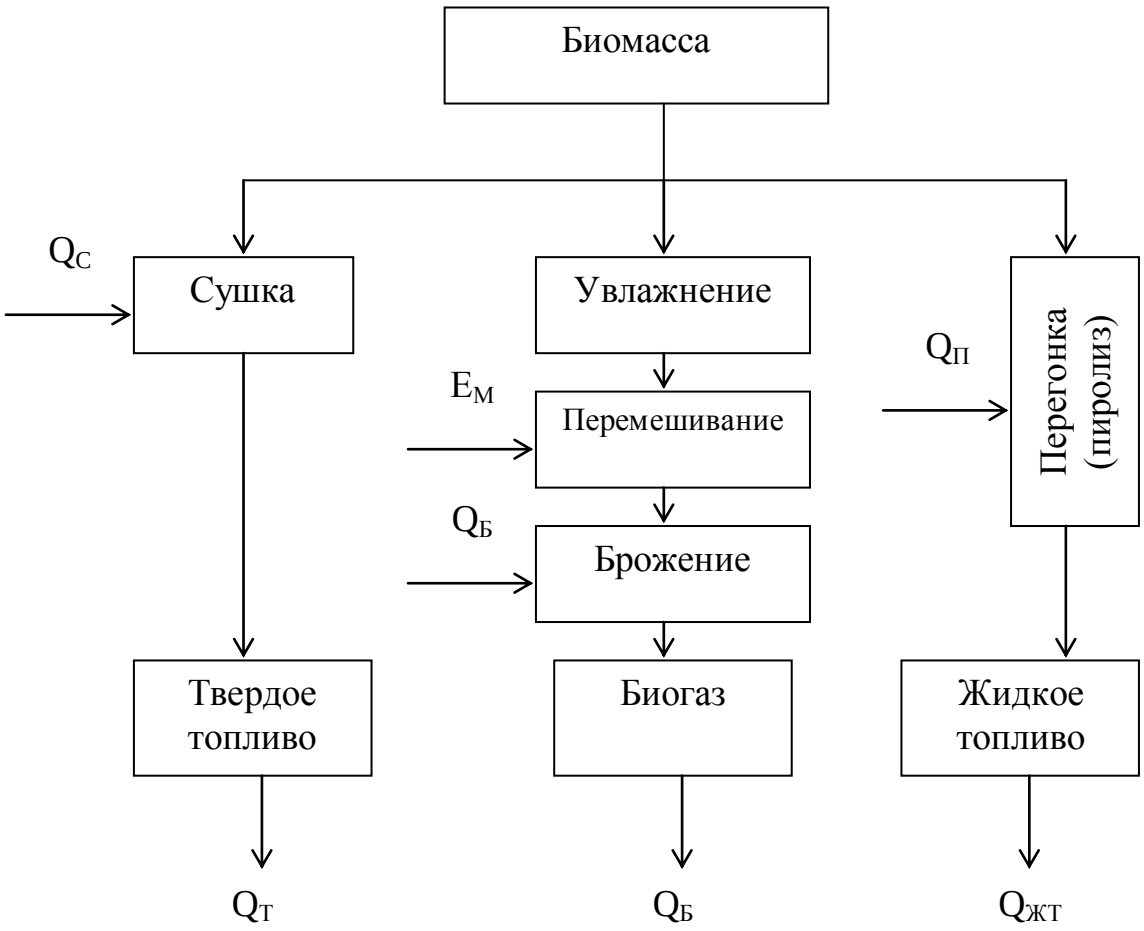


Рисунок 10.1. Структура использования биотоплива

$Q_С$ – тепло на сушку, подогрев, $E_М$ – механическая энергия на перемешивание, $Q_Т$ – теплота твердого топлива, $Q_Б$ – теплота биогаза, $Q_Ж$ – теплота жидкого топлива

Возможность получения качественного тепла путем сжигания биотоплива обусловливает и возможность получения электроэнергии в тепловых электростанциях, в которых приводом генератора является тепловая машина.

Достоинствами применения биотоплива для работы в тепловых электростанциях являются:

- полная управляемость процессом, так как поступление биотоплива абсолютно прогнозируемо;
- возможность использования существующих тепловых электростанций, особенно автономных, так как теплотворная способность жидкого и газообразного биотоплива эквивалентна теплотворной способности традиционного углеводородного топлива;
- неисчерпаемость запасов биотоплива при правильном его воспроизводстве.

10.3. Получение газообразного и жидкого биотоплива

Как уже отмечалось, наиболее ценным является газообразное и жидкое биотопливо. Преобразование энергии биотоплива практически не отличается от преобразования энергии любого углеводородного топлива, поэтому практический интерес представляют только вопросы его получения.

Биотопливо может использоваться для прямого получения тепла (в этом случае сжигают высушенную биомассу или получаемый из нее древесный уголь) или для производства электроэнергии (в этом случае из биотоплива получают метан, который используют в автономных топливных электростанциях в качестве газообразного топлива приводных двигателей).

Процесс получения метана (CH_4) из биомассы называется анаэробной переработкой. Как следует из названия процесса (*анаэробная*) он протекает в отсутствии кислорода воздуха. На рисунке 10.2 показана функциональная схема анаэробной установки, а на рисунке 10.3 – ее схематическое устройство.

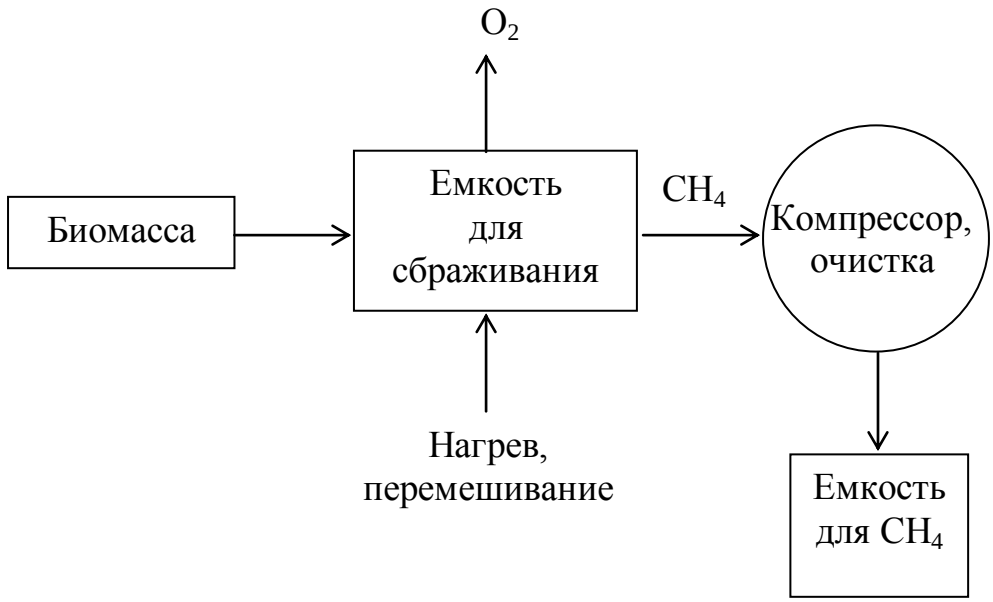


Рисунок 10.2. Функциональная схема анаэробной установки производства биогаза

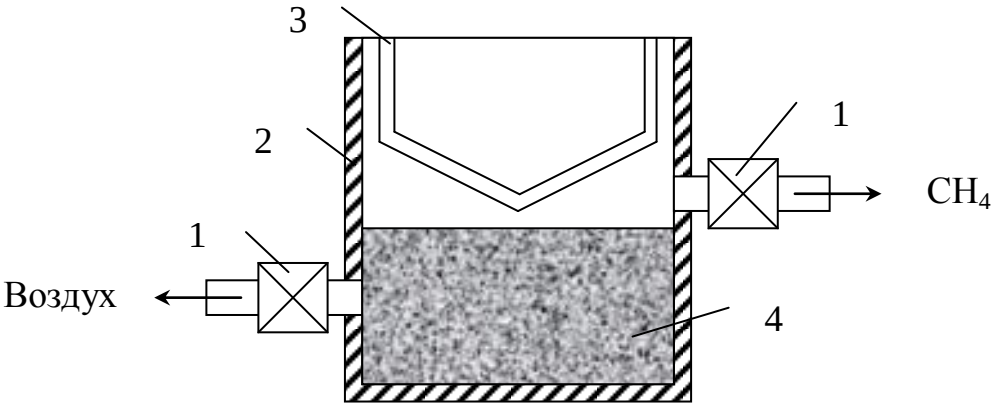


Рисунок 10.3. Установка для получения биогаза

1 – вентиль, 2 – корпус, 3 – поршень, 4 – биомасса

Получение биогаза происходит следующим образом.

Поршнем 3 выдавливается воздух из биомассы. Затем вентиль закрывается и производится подогрев биомассы без доступа воздуха. Подогретая биомасса интенсивно перемешивается поршнем, имеющим лопатки. В перемешиваемой нагретой биомассе протекают процессы анаэробного брожения и начинает выделяться биогаз, в котором большинство составляет метан CH_4. Под давлением биогаза поршень приподнимается, и газ выпускается в промежуточную емкость. Метан из промежуточной емкости после очистки компрессором закачивается в резервуар для хранения и последующего использования.

Применение установок для получения биогаза в настоящее время становится все более перспективным.

Кроме получения газообразного топлива из биомассы можно получать твердое (брикетированное или гранулированное) топливо и жидкое топливо (метанол).

Функциональная схема установки для получения жидкого топлива приведена на рисунке 10.4. Полученное топливо представляет собой метиловый спирт и может использоваться совместно с бензином в определенных пропорциях.

Обобщающим способом получения твердого (древесный уголь), газообразного (биогаз) и жидкого (смолы и масла) биотоплива является пиролиз. Схема пиролиза приведена на рисунке 10.5.

К.п.д. пиролиза определяется отношением теплоты сгорания произведенного биотоплива к теплоте сгорания исходной биомассы, и достигает довольно высоких значений. Например, газогенератор на древесине, производящий водород и CO, имеет к.п.д. 90% /9/. Некоторая потеря энергии компенсируется получением биотоплива, пригодного для использования в обычных тепловых двигателях. Это позволяет уменьшить потери энергии по сравнению с простым сжиганием биомассы. Так, используя продукты пиролиза

при производстве электроэнергии можно достигать более высоких значений к.п.д., чем при использовании паровых котлов.

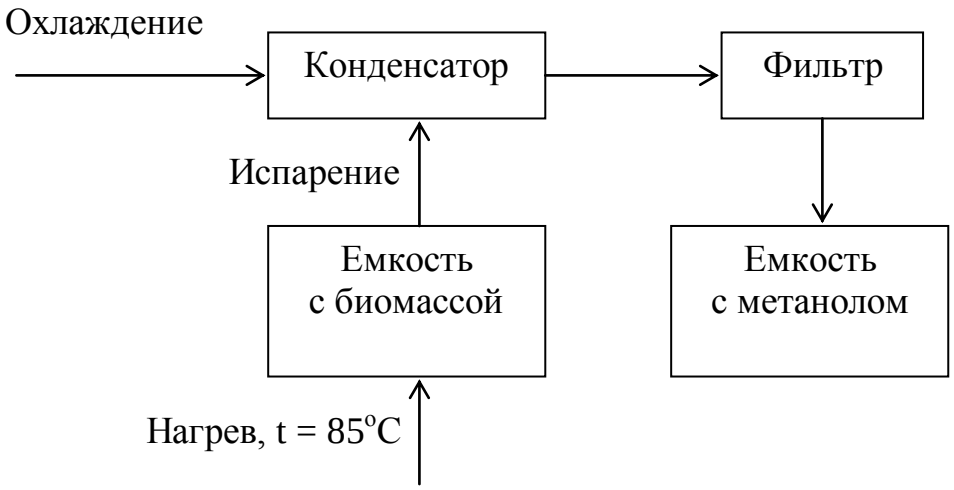


Рисунок 10.4. Функциональная схема установки
для производства метанола

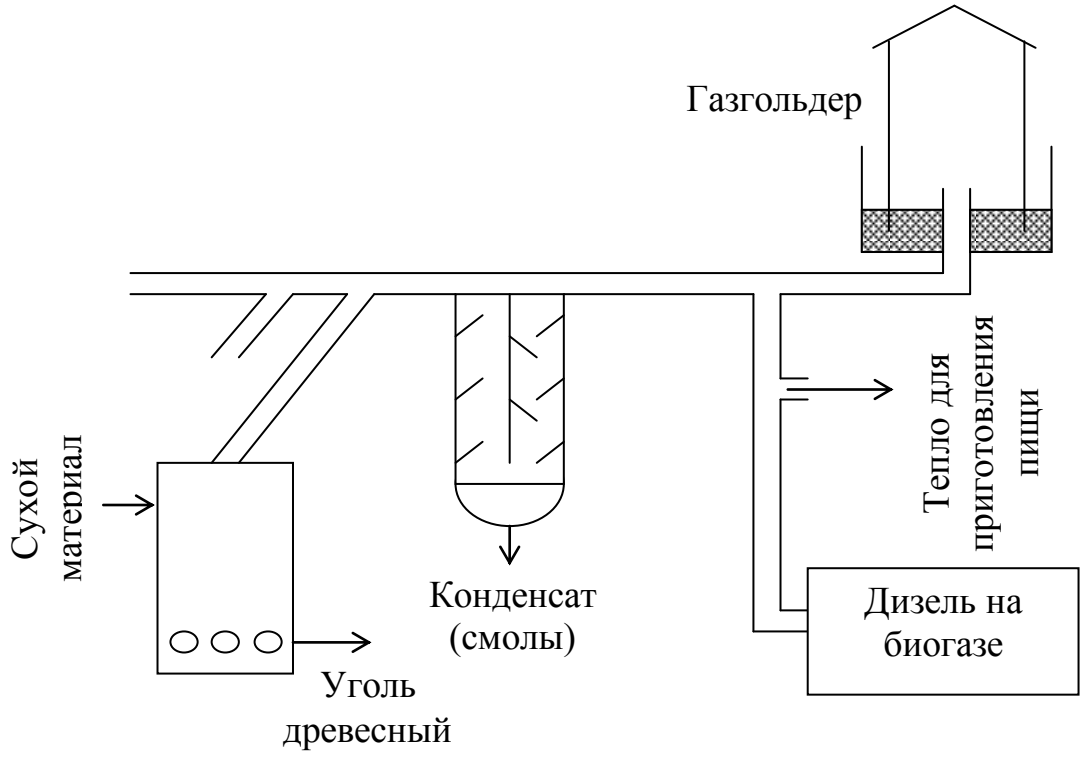


Рисунок 10.5. Функциональная схема пиролизной установки

Пиролиз протекает в четыре стадии, отличающиеся температурой процесса /9/:

- 100 – 120^{o}C – подаваемый в газогенератор материал, опускаясь вниз, освобождается от влаги;
- 275^{o}C – отходящие газы состоят из N_2, CO, CO_2; в виде конденсата выделяются смолы и масла, которые могут быть переработаны в метанол или метан;
- 280 – 350^{o}C – протекают экзотермические реакции, в процессе которых выделяются летучие вещества.;
- 350 – 600^{o}C – образуется водород, метан и CO, часть углерода переходит в форму древесного угля.

Во Всероссийском институте электрификации сельского хозяйства создана промышленная пиролизная установка, производительностью 1 литр метанола за час или 1,5 м^3 метана за час, перерабатывающая растительные сельскохозяйственные отходы, например, подсолнечную лузгу. Такие установки могут с успехом применяться в небольших фермерских хозяйствах. Естественно, установка по производству биотоплива не сможет решить всех энергетических проблем фермера, но способна значительно уменьшить его зависимость от рынка традиционного углеводородного топлива. В будущем применение установок по производству жидкого или газообразного топлива станет еще более эффективным.

10.4. Расчет параметров биогазовых установок

К параметрам биогазовой установки относятся:

- температура брожения;
- продолжительность процесса брожения;

- режим заполнения метантанка (периодический или непрерывный).

Методика расчета состоит в следующем /12/:

1. Определяется суточное поступление биомассы.

$$m_{БМ} = \Sigma N_{Жj}\, m_{УДj} \qquad (10.1)$$

где $m_{БМ}$ – суточное поступление биомассы, кг;

$N_{Ж}$ – количество животных j-того вида, гол.;

$m_{УДj}$ – суточный выход экскрементов от j-того животного, кг/гол.

2. Определяется доля сухого вещества в биомассе.

$$m_{СВ} = m_{БМ}\left(1 - \frac{\varphi_{БМ}}{100}\right) \qquad (10.2)$$

где $\varphi_{БМ}$ – влажность биомассы, %.

3. Определяется доля сухого органического вещества.

$$m_{СОВ} = m_{СВ}\, \rho_{СОВ} \qquad (10.3)$$

где $\rho_{СОВ}$ – доля органического вещества в сухом веществе, о.е.

4.Определяется выход биогаза

$$V_{БГ} = v_{БГ}\, m_{СОВ}\, n_t \qquad (10.4)$$

где $v_{БГ}$ – удельный выход биогаза при полном разложении сухого органического вещества, $м^3$/кг;

n_t – доля выхода биогаза при выбранной продолжительности брожения, о.е.

5. Определяется объем метантанка

$$V_{МТ} = (0{,}7 \ldots 0{,}9)\, m_{БМ}\, t_Б\, \rho_{БМ}^{-1} \qquad (10.5)$$

где $t_Б$ – продолжительность брожения, сут.;

$\rho_{БМ}$ – плотность сбраживаемой биомассы, кг/м^3.

6. Определяется количество теплоты для подогрева биомассы.

$$Q = m_{БМ} c_{БМ} (T_{ПР} - T_{БМ}) + Q_{ПОТ} - \frac{q_{БМ} m_{БМ} t_{БР}}{24 \times 3600} \qquad (10.6)$$

где $c_{БМ}$ – средняя теплоемкость биомассы, Дж/кг. К;

$T_{ПР}$ – температура процесса брожения, К;

$T_{БМ}$ – температура загружаемой биомассы, К;

$Q_{ПОТ}$ – суммарные потери тепла через стенки и крышку метантанка, Дж;

$q_{БМ}$ – мощность теплового потока от биомассы во время брожения, Вт/кг;

$t_{БР}$ – время брожения, сут.

Ниже приведены справочные данные, необходимые для расчета метантанка /12/.

Суточный выход навоза
сельскохозяйственных животных
и помета птицы

Быки-производители . . . . . .40 кг
Коровы . . . . . 35 – 55 кг
Молодняк КРС:
до 6 мес. . . . . 7,5 – 15 кг
6 – 12 мес. . . . . 14 – 26 кг
12 – 18 мес. . . . . 27 кг
старше 18 мес. . . . . .35 кг
Хряки . . . . . 9 – 11 кг
Свиноматки:
холостые . . . . . .8,5 – 9 кг
супоросные . . . . . .10 – 11 кг
Подсосные поросята-отъемыши . . . . . .12,5 – 15,3 кг
Свиньи на откорме массой, кг:
до 40 . . . . . .3 – 3,5 кг
40 – 80 . . . . . 4,5 – 5 кг
более 80 . . . . . .6 – 6,5 кг
Куры:
яичного направления . . . . . 170 – 200 г
мясного направления . . . . . 270 – 300 г
Индейки . . . . . .450 г
Утки . . . . . .420 г
Гуси . . . . . .580 г

Средняя влажность

Навоз КРС . . . . . .85 – 90 %

Навоз свиней . . . . . .88 – 92%

Помет птицы . . . . . .73 – 76%

Состав биомассы

животного происхождения в % к сухому веществу

Компоненты	КРС	Дойные коровы	Свиньи	Птица
Органическая масса	77,0 – 85,0	77,0 – 85,0	77,0 – 84,0	76,0 77,0
Азот	2,3 – 4,0	1,9 – 6,5	4,0 –10,3	2,3 – 5,7
Фосфор	0,4 – 1,1	0,2 – 0,7	1,9 –2,5	1,0 – 2,7
Калий	1,0 – 2,0	2,4	1,4 – 3,1	1,0 – 2,9
Кальций	0,6 – 1,4	2,3 – 4,9	–	5,6 – 11,9
Клетчатка	27,6 –50,6	27,6 – 50,6	19,5 – 21,4	13,0 – 17,8
Лигнин	13, 0 – 30,0	16,0 – 30,0	–	9,6 – 14,3
Отношение углерода к азоту	9,0 – 15,0	9,0 – 15,0	9,0 – 15,0	9,0 – 15,0

Состав биомассы

растительного происхождения в % к сухому веществу

Компоненты	Солома			Ботва	
	Ячменная	Пшеничная	Кукурузная	Свекольная	Картофельная
Органическая масса	93,8	94,4	91,7	98,5	78,9
Азот	0,6	0,5	1,2	2,0	2,3
Фосфор	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2
Калий	1,4	0,8	2,3	3,6	1,7
Кальций	0,3	0,1	0,8	1,4	2,6
Клетчатка	43,5	45,5	33,3	11,5	23,8
Лигнин	15,0 – 20,0	15,0 – 20,0	5,5	–	–
Отношение углерода к азоту	84	90 - 165	30 - 65	18	17

Вопросы для самоконтроля

1. Что называется вторичными энергоресурсами?
2. На какие виды можно разделить вторичные энергоресурсы?
3. В каком процессе получают биогаз?
4. Для чего биомассу подогревают в процессе производства биогаза?
5. Как классифицируются установки по получению биогаза в зависимости от способа подачи биомассы?
6. Почему биотопливо не имеет негативного экологического воздействия?
7. Какой способ является универсальным для получения твердого, газообразного и жидкого биотоплива?
8. Сколько стадий имеет процесс пиролиза?
9. Какие параметры установки по производству биогаза подлежат расчету в процессе ее проектирования?

Задания для закрепления материала

1. Определите, какие отходы в регионе Вашего проживания могут использоваться в качестве вторичных энергоресурсов.
2. Назовите достоинства биотоплива.
3. Объясните процесс получения биогаза путем анаэробного сбраживания.
4. Объясните процесс пиролиза.
5. Задайтесь исходными данными (вид и количество животных) и рассчитайте установку для производства биогаза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблемы, обострившиеся в глобальной энергетике, привели к реальному пониманию, что, без поиска новых источников, преобразователей и аккумуляторов энергии, мировое человечество не сможет развиваться столь же динамично, как в настоящее время. К счастью, уже сейчас автономные системы электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии оказываются вполне конкурентоспособными и практически являются альтернативой централизованному электроснабжению. При этом, однако, не следует упускать, что реальным местом для таких систем пока остаются небольшие объекты электрификации, типа фермерских усадеб, загородных домиков, пасек, домиков рыбака и т.п. Кроме того, приходиться мирится с несколько меньшей надежностью электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии.

Изучение возобновляемых источников энергии показало их неравнозначность, как в потенциальном отношении, так и отношении технических возможностей их использования. Так наиболее применимыми (но практически исчерпавшими возможность дальнейшего наращивания) являются гидроресурсы. Но даже после практического и весьма широкого освоения энергии рек и водопадов, электроэнергия, получаемая на гидроэлектростанциях, остается самой дорогой в традиционной энергетике. Для автономного электроснабжения энергия малых рек имеет очень большие ограничения из-за необходимости ее транспортировки к потребителю.

Можно сказать, что, по мнению подавляющего числа специалистов, наиболее перспективными для автономного электроснабжения являются энергия солнечного излучения, энергия ветра и энергия биотоплива. Эти виды энергии присутствуют практически во всех заселенных районах нашей страны, принципы преобразования в электроэнергию и в другие удобные виды энергии известны и хорошо изучены. Сдерживающими факторами явля-

ются неуправляемость процессами поступления (кроме энергии биотоплива) и более высокая стоимость получаемой энергии по сравнению с сетевым электроснабжением. Однако, как следует из изложенного материала, возможности борьбы с этими факторами использованы не полностью. Так оптимизация параметров автономных систем электроснабжения на основе энергии ветра или биотоплива позволяет уменьшить стоимость электроэнергии в 1,5 – 2 раза и обеспечить за счет разумного резерва достаточно высокую надежность (на уровне 0,9 и выше).

Что касается автономных солнечных электростанций на основе фотоэлектрических преобразователей, то их применение в настоящее время экономически весьма ограничено. Обусловлено это низким к.п.д. батарей ФЭП. Однако по своей сути это наиболее устойчивые в энергетическом отношении системы, а удельная мощность солнечного излучения настолько велика, что во всем Мире продолжаются интенсивные исследования по повышению эффективности гелиоэнергетических установок. Реальными путями повышения эффективности солнечных электростанций являются применение концентраторов солнечного излучения и систем слежения. Вместе с тем, многовариантность таких решений требует разработки методов расчета и оптимизации параметров соответствующих устройств, что и было показано в данной книге.

Кроме возобновляемых источников энергии существуют и другие способы получения энергии, которые, на наш взгляд, способны при решении отмеченных проблем занять заметное место в будущей энергетике. Это топливные элементы и основанные на них электрохимические электростанции, фотосинтез, обратимые химические реакции, МГД-генераторы. В будущем без учета этих компонентов не удастся решать задачи использования возобновляемых источников энергии.

Хочется надеяться, что данная книга окажется полезной той категории читателей, для которых она предназначена.

1. Амерханов Р.А. Оптимизация сельскохозяйственных энергетических установок с использованием возобновляемых видов энергии. – М.: Колос-Пресс, 2003, 532 с.
2. Андреев В.М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. / Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. – Л.: Наука, 1989, 310 с.
3. Андрианов В. Н. Электрические машины и аппараты: Учеб. пособие для студентов высш. с.-х. учеб. заведений / В.Н. Андрианов. – М.: Колос, 1971. – 448 с.
4. Воронин С.М. Возобновляемые источники энергии в автономных системах энергоснабжения сельских объектов. – Зерноград: 2005, 118с.
5. Воронин С.М. Возобновляемые источники энергии и энергосбережение. / Воронин С.М., Оськин С.В., Головко А.Н. – Краснодар, КубГАУ, 2006, 267 с.
6. Г. Раушенбах. Справочник по проектированию солнечных батарей. Перевод с англ. М.М.Колтуна. – М.: Энергоатомиздат, 1983, 360 с.
7. Д. Дэвинс. Энергия. – М.: Энергоатомиздат, 1985, 360 с.
8. Дж. Твайделл, А. Уэйр. Возобновляемые источники энергии. – М.: Энергоатомиздат, 1990, 392 с.
9. Кирилин В.А. Энергетика. Главные проблемы. – М.: Знание, 1990, 128 с.
10. Преобразование солнечной энергии. Под ред. Б. Серафина. – М.: Энергоиздат, 1982, 320 с.
11. Саплин Л.А. Энергоснабжение сельскохозяйственных потребителей с использованием возобновляемых источников. / Саплин Л.А., Шерьязов С.К., Пташкина-Гирина О.С., Ильин Ю.П. – Челябинск, 2000. – 194 с.

12.Шефтер Я.И. Ветроэнергетические агрегаты. – М.: Машиностроение, 1972, 288 с.