

31.6
Д.21



Издательский Дом
ИНТЕЛЛЕКТ

ДЖ. ДАФФИ, У. БЕКМАН

ОСНОВЫ СОЛНЕЧНОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

А-343829

ОГЛАВЛЕНИЕ

ДЖ. ДАФФИ, У. БЕКМАН

1

ОСНОВЫ СОЛНЕЧНОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Перевод с английского

*О.С. Попеля, С.Е. Фрида, Г.А. Гухман, С.В. Киселёвой, А.В. Мальцевой
под редакцией О.С. Попеля*

15



Издательский Дом
ИНТЕЛЛЕКТ

ДОЛГОПРУДНЫЙ
2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие научного редактора перевода	14
---	----

Часть I

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Глава 1

СОЛНЕЧНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ	21
1.1. Солнце	21
1.2. Солнечная постоянная	23
1.3. Спектральное распределение заатмосферного излучения	25
1.4. Изменчивость потока заатмосферного излучения	28
1.5. Определения	29
1.6. Направление распространения прямого солнечного излучения	32
1.7. Углы для следящих поверхностей	40
1.8. Отношение потоков прямого солнечного излучения, поступающих на наклонную и горизонтальную поверхности	43
1.9. Затенение	50
1.10. Заатмосферное излучение, поступающее на горизонтальную поверхность	57
1.11. Выводы	62
<i>Литература</i>	63

Глава 2

СОЛНЕЧНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ	64
2.1. Определения	64
2.2. Пиргелиометры и пиргелиометрические шкалы	65
2.3. Пиранометры	69
2.4. Измерение продолжительности солнечного сияния	75
2.5. Данные о солнечном излучении	76
2.6. Ослабление солнечного излучения в атмосфере	84
2.7. Оценка средних значений солнечного излучения	88
2.8. Оценки потоков солнечного излучения при ясном небе	93
2.9. Распределение ясных и облачных дней и часов	97



2.10. Прямая и рассеянная составляющие часовой суммы солнечного излучения	101
2.11. Прямая и рассеянная составляющие дневного солнечного излучения	103
2.12. Прямая и рассеянная составляющие среднемесячной дневной суммы солнечного излучения	105
2.13. Определение часовых сумм солнечного излучения на основе суточных данных	107
2.14. Солнечное излучение, падающее на наклонную поверхность	112
2.15. Излучение на наклонных поверхностях: изотропный небосвод	117
2.16. Излучение на наклонных поверхностях: анизотропный небосвод	118
2.17. Увеличение потока солнечного излучения	124
2.18. Прямое излучение на движущихся поверхностях	129
2.19. Среднее излучение на наклонных поверхностях: изотропный небосвод	130
2.20. Среднее излучение на наклонных поверхностях: КТ-метод	135
2.21. Влияние ориентации приемной поверхности на \bar{H}_T	141
2.22. Используемость	144
2.23. Обобщенная используемость	148
2.24. Дневная используемость	156
2.25. Заключение	162
<i>Литература</i>	163

Глава 3

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ТЕПЛООБМЕНА	168
3.1. Спектр электромагнитного излучения	168
3.2. Фотонное излучение	169
3.3. Черное тело — идеальный поглотитель и излучатель	170
3.4. Закон Планка и закон смещения Вина	170
3.5. Уравнение Стефана—Больцмана	172
3.6. Таблицы энергии излучения черного тела	172
3.7. Интенсивность и плотность потока излучения	175
3.8. Радиационный теплообмен между серыми поверхностями	178
3.9. Излучение небосвода	179
3.10. Коэффициент теплопередачи излучением	180
3.11. Свободная конвекция между плоскими параллельными пластинами и между концентрическими цилиндрами	182
3.12. Подавление конвекции	187
3.13. V-образная гофрированная поглощающая панель	190
3.14. Формулы теплообмена для течения в трубах и каналах	191
3.15. Конвективный коэффициент теплоотдачи за счет ветра	196
3.16. Теплообмен и потери давления в насадках и перфорированных пластинах	198
3.17. Метод эффективности-NTU для расчета теплообменников	201
<i>Литература</i>	204



Глава 4

РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ	206
4.1. Поглощательная способность и степень черноты	207
4.2. Закон Кирхгофа	209
4.3. Отражательная способность поверхностей	211
4.4. Соотношения между поглощательной способностью, степенью черноты и отражательной способностью	215
4.5. Интегральная степень черноты и поглощательная способность	216
4.6. Расчет степени черноты и поглощательной способности	218
4.7. Измерение радиационных свойств поверхности	221
4.8. Селективные поверхности	223
4.9. Методы достижения селективности	227
4.10. Оптимальные свойства селективной поверхности	232
4.11. Угловая зависимость поглощательной способности в области солнечного спектра	232
4.12. Поглощательная способность полостных приемников	233
4.13. Зеркально отражающие поверхности	234
<i>Литература</i>	236

Глава 5

ПРОХОЖДЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ОСТЕКЛЕНИЕ: ПОГЛОЩЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ	239
5.1. Отражение излучения	239
5.2. Поглощение излучения остеклением	243
5.3. Оптические свойства прозрачных покрытий	243
5.4. Пропускание рассеянного излучения	249
5.5. Приведенная поглощательная способность	251
5.6. Угловая зависимость ($\tau\alpha$)	253
5.7. Спектральная зависимость пропускательной способности	253
5.8. Влияние поверхностных слоев на пропускательную способность	256
5.9. Поглощенное солнечное излучение	258
5.10. Среднемесячное поглощенное солнечное излучение	261
5.11. Поглощательная способность помещений	267
5.12. Поглощательная способность фотоэлементов	269
5.13. Заключение	273
<i>Литература</i>	273

Глава 6

ПЛОСКИЕ СОЛНЕЧНЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ	275
6.1. Описание плоских коллекторов	276
6.2. Основное уравнение энергетического баланса	276
6.3. Распределения температуры в плоских коллекторах	278



6.4. Полный коэффициент тепловых потерь коллектора	279
6.5. Распределение температуры между трубами и коэффициент эффективности коллектора	293
6.6. Распределение температуры в направлении течения жидкости	301
6.7. Коэффициент отвода тепла от коллектора и коэффициент расхода	302
6.8. Критический уровень солнечного излучения	306
6.9. Средние температуры жидкости и панели	307
6.10. Эффективная приведенная поглощательная способность	308
6.11. Влияние пыли и затенения	311
6.12. Влияние теплоемкости в плоских коллекторах	313
6.13. Геометрические формы поглощающей панели жидкостного коллектора	316
6.14. Воздухонагреватели	322
6.15. Измерение характеристик коллектора	329
6.16. Параметры, характеризующие коллектор	330
6.17. Испытания коллектора: КПД, модификатор угла падения и постоянная времени	332
6.18. Результаты испытаний	342
6.19. Преобразование результатов тепловых испытаний	345
6.20. Поправки на расход в $F_R(\tau\alpha)_n$ и $F_R U_L$	349
6.21. Распределение расхода в солнечных коллекторах	352
6.22. Характеристики коллектора в условиях эксплуатации	353
6.23. Практические рекомендации по плоским коллекторам	354
6.24. Примеры	358
6.25. Заключение	364
<i>Литература</i>	364

Глава 7

КОНЦЕНТРИРУЮЩИЕ СОЛНЕЧНЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ	368
7.1. Конфигурации концентрирующих солнечных коллекторов	369
7.2. Коэффициент концентрации	372
7.3. Тепловые параметры коллекторов с концентраторами	375
7.4. Оптические характеристики концентрирующих солнечных коллекторов	382
7.5. Массивы цилиндрических приемников	383
7.6. Оптические свойства неизображающих концентраторов	386
7.7. Ориентация коллекторов с СРС и поглощенная ими энергия	393
7.8. Параметры коллекторов с СРС	398
7.9. Линейные изображающие концентраторы: геометрия	400
7.10. Изображения, создаваемые идеальными линейными концентраторами	403



7.11. Изображения, создаваемые неидеальными линейными концентраторами	409
7.12. Использование метода построения хода лучей для определения параметров концентраторов	411
7.13. Модификаторы угла падения излучения и энергетические балансы	412
7.14. Параболические концентраторы	418
7.15. Системы с центральным приемником	419
7.16. Практические соображения	420
<i>Литература</i>	422
 Глава 8	
АККУМУЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГИИ	424
8.1. Графики нагрузки и выработки солнечного коллектора	425
8.2. Аккумуляция энергии в солнечных энергоустановках	426
8.3. Водяной аккумулятор	428
8.4. Стратификация в водяном аккумуляторе	431
8.5. Аккумуляторы с твердой насадкой	437
8.6. Теплоаккумулирующие стены	445
8.7. Сезонное аккумуляция	447
8.8. Аккумуляция тепла на основе фазовых переходов	450
8.9. Химические аккумуляторы энергии	455
8.10. Электрохимические аккумуляторы	457
<i>Литература</i>	459
 Глава 9	
НАГРУЗКИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ	462
9.1. Примеры нагрузок зависящих от времени	463
9.2. Нагрузки горячего водоснабжения	464
9.3. Отопительные нагрузки, градусо-дни и температура равновесия	465
9.4. Коэффициент тепловых потерь здания	469
9.5. Теплоаккумулирующая способность здания	471
9.6. Нагрузки охлаждения	472
9.7. Тепловые нагрузки плавательных бассейнов	472
<i>Литература</i>	475
 Глава 10	
ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ СИСТЕМЫ	477
10.1. Модели основных компонент системы	478
10.2. Коэффициент эффективности теплообменника коллекторного контура	479
10.3. Коэффициенты учета потерь в трубопроводах и воздуховодах	481



10.4. Регуляторы	484
10.5. Массивы коллекторов: последовательное соединение	486
10.6. Характеристики частично затененных коллекторов	488
10.7. Массив последовательно соединенных по-разному ориентированных коллекторов	491
10.8. Использование модифицированных уравнений коллектора	493
10.9. Модели систем	497
10.10. Доля покрытия и доля экономии	500
10.11. Заключение	502
<i>Литература</i>	502

Глава 11

ЭКОНОМИКА СОЛНЕЧНЫХ УСТАНОВОК	503
11.1. Затраты на солнечные энергоустановки	504
11.2. Модельные переменные	505
11.3. Показатели экономической эффективности	506
11.4. Дисконтирование и инфляция	508
11.5. Выводы	510
<i>Литература</i>	510

Часть II ПРИМЕНЕНИЯ

Глава 12

СОЛНЕЧНЫЙ НАГРЕВ ВОДЫ: АКТИВНЫЙ И ПАССИВНЫЙ	513
12.1. Системы нагрева воды	513
12.2. Замерзание и кипение	517
12.3. Дополнительный нагрев	519
12.4. Системы с принудительной циркуляцией	521
12.5. Установки с малым расходом теплоносителя	523
12.6. Установки с естественной циркуляцией	524
12.7. Солнечные водонагреватели аккумуляционного типа	526
12.8. Реконструкция водонагревательных систем	529
12.9. Водонагреватели в системах отопления и охлаждения	529
12.10. Испытание и нормирование солнечных водонагревателей	530
12.11. Экономика солнечного нагрева воды	530
12.12. Подогрев воды в плавательных бассейнах	530
12.13. Выводы	532
<i>Литература</i>	532



Глава 13

ОТОПЛЕНИЕ ЗДАНИЙ: АКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ	534
13.1. Исторические заметки	535
13.2. Системы солнечного отопления	536
13.3. Жидкостная система теплоснабжения дома CSU-III с плоскими солнечными коллекторами	542
13.4. Воздушная система теплоснабжения дома CSU-II	546
13.5. Параметрическое исследование системы отопления	548
13.6. Системы солнечного отопления с тепловыми насосами	554
13.7. Системы аккумулирования тепла на основе фазовых переходов	559
13.8. Системы межсезонного аккумулирования энергии	563
13.9. Системы использования солнечной энергии и провальной электроэнергии	567
13.10. Перегрев системы солнечного отопления	569
13.11. Экономика солнечного отопления	570
13.12. Некоторые соображения об архитектуре зданий	572
<i>Литература</i>	575

Глава 14

ОТОПЛЕНИЕ ЗДАНИЙ: ПАССИВНОЕ И АКТИВНОЕ	577
14.1. Концепции пассивного обогрева	578
14.2. Критерии комфорта и отопительные нагрузки	579
14.3. Подвижная теплоизоляция и управление ею	579
14.4. Затенение: навесы и козырьки	580
14.5. Системы с прямым облучением	584
14.6. Стены и крыши типа солнечный коллектор-аккумулятор	589
14.7. Теплицы	593
14.8. Гибридные системы с активными солнечными коллекторами и пассивным аккумулированием тепла	595
14.9. Другие гибридные системы	596
14.10. Применения пассивных систем	597
14.11. Перераспределение тепла в пассивных зданиях	600
14.12. Экономика пассивных систем солнечного отопления	601
<i>Литература</i>	601

Глава 15

СОЛНЕЧНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ	603
15.1. Солнечное абсорбционное охлаждение	604
15.2. Теория абсорбционного охлаждения	606
15.3. Комбинированный солнечный нагрев и охлаждение	612
15.4. Моделирование солнечного кондиционера воздуха	613



15.5. Опыт эксплуатации солнечных холодильных установок	617
15.6. Применение солнечного абсорбционного охлаждения для кондиционирования воздуха	620
15.7. Солнечное испарительное охлаждение	621
15.8. Вентиляционные и рециркуляционные испарительные циклы	623
15.9. Солнечно-механическое охлаждение	625
15.10. Другие возможности «солнечного» кондиционирования воздуха	627
15.11. Пассивное охлаждение	629
<i>Литература</i>	629

Глава 16

СОЛНЕЧНОЕ ТЕПЛО В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВКАХ	631
16.1. Интеграция с промышленными установками	632
16.2. Особенности проектирования систем	632
16.3. Экономика промышленных тепловых установок	633
16.4. Открытые системы подогрева воздуха	634
16.5. Системы подогрева воздуха с рециркуляцией	638
16.6. Открытые системы нагрева воды в промышленности	640
16.7. Системы промышленного подогрева воды с рециркуляцией	642
16.8. Нагрев воды с помощью мелких солнечных прудов	644
16.9. Выводы	646
<i>Литература</i>	646

Глава 17

СОЛНЕЧНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ И ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ	648
17.1. Системы теплового преобразования энергии	649
17.2. Солнечная насосная установка	650
17.3. Системы LUZ	651
17.4. Электростанции с центральным приемником	656
17.5. Солнечные электростанции «SOLAR ONE» и «SOLAR TWO»	659
<i>Литература</i>	660

Глава 18

СОЛНЕЧНЫЕ ПРУДЫ: ИСПАРИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ	662
18.1. Солнечные пруды с градиентом концентрации соли	662
18.2. Теория солнечных прудов	664
18.3. Практическое применение солнечных прудов	666
18.4. Солнечная дистилляция	668
18.5. Испарители	673
18.6. Прямая солнечная сушка	675
18.7. Заключение	675
<i>Литература</i>	675



Часть III

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

Глава 19

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК	679
19.1. Программы моделирования	679
19.2. Полезность моделирования	680
19.3. Результаты моделирования	681
19.4. TRNSYS: программа моделирования тепловых процессов	684
19.5. Моделирование и эксперимент	690
19.6. Метеорологические данные	692
19.7. Ограничения моделирования	694
<i>Литература</i>	<i>695</i>

Глава 20

ИНЖЕНЕРНЫЙ РАСЧЕТ АКТИВНЫХ СИСТЕМ:

МЕТОД f-ДИАГРАММ	697
20.1. Обзор инженерных методов расчета	697
20.2. Метод f -диаграмм	698
20.3. Метод f -диаграмм для жидкостных систем	703
20.4. Метод f -диаграмм для воздушных систем	708
20.5. Системы горячего водоснабжения	713
20.6. Допущения и погрешности метода f -диаграмм	715
20.7. Расчет параллельной солнечно-теплонасосной системы	717
20.8. Заключение	720
<i>Литература</i>	<i>721</i>

Глава 21

ИНЖЕНЕРНЫЙ РАСЧЕТ АКТИВНЫХ СИСТЕМ

МЕТОДОМ ИСПОЛЬЗУЕМОСТИ	723
21.1. Часовая используемость	724
21.2. Дневная используемость	727
21.3. Метод $\bar{\varphi}$ -, f -диаграмм	732
21.4. Заключение	743
<i>Литература</i>	<i>743</i>

Глава 22

ИНЖЕНЕРНЫЙ РАСЧЕТ ПАССИВНЫХ И ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ

22.1. Подходы к расчету пассивных систем	744
22.2. Метод соотношения солнечного излучения и нагрузки	745



22.3. Метод неиспользуемости: системы прямого нагрева	754
22.4. Метод неиспользуемости: теплоаккумулирующая стена-коллектор	761
22.5. Гибридные системы: активный сбор тепла с пассивным аккумулятиванием	769
22.6. Другие гибридные системы	776
<i>Литература</i>	776
Глава 23	
ИНЖЕНЕРНЫЙ РАСЧЕТ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ	778
23.1. Фотоэлектрические преобразователи	779
23.2. Характеристики и модели фотопреобразователей	781
23.3. Температура фотоэлемента	791
23.4. Характеристики нагрузки. Системы с прямым подключением нагрузки к ФЭП	794
23.5. Регуляторы и устройства слежения за максимальной мощностью	798
23.6. Практические приложения	799
23.7. Инженерные методы расчета	800
23.8. Фотоэлектрические генераторы с концентраторами	807
23.9. Заключение	808
<i>Литература</i>	808
Глава 24	
ЭНЕРГИЯ ВЕТРА	810
24.1. Введение	810
24.2. Ресурсы энергии ветра	814
24.3. Одномерная модель ветроколеса	823
24.4. Оценка средней мощности и выработки электроэнергии ветроэлектрической установкой	828
24.5. Заключение	834
<i>Литература</i>	834
Приложение 1	
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	835
П1.1. Обозначения	835
П1.2. Обозначения, касающиеся излучения	839
Приложение 2	
МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ (SI)	840
Приложение 3	
СРЕДНЕМЕСЯЧНЫЕ \bar{R}_h В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ϕ И $\phi - \beta$	841



Приложение 4 СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ МАТЕРИАЛОВ	849
Приложение 5 КЛИМАТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ	854
Приложение 6 ДИАГРАММЫ ПОЛОЖЕНИЯ СОЛНЦА	862
Приложение 7 СРЕДНИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ЗАТЕНЕНИЯ СВЕСОВ КРЫШИ	868
Список дополнительной литературы	884

Солнечный коллектор — особый тип теплообменника, который преобразует энергию солнечного излучения в тепло. В некотором отношении солнечный коллектор отличается от традиционных теплообменников, в которых обычно реализуется теплообмен между жидкостями с большими плотностями тепловых потоков и с незначительной ролью излучения. В солнечном коллекторе перенос энергии к жидкости осуществляется от удаленного источника лучистой энергии. Плотность потока падающего излучения обычно не превышает 1100 Вт/м^2 (без оптической концентрации) и является величиной переменной. Диапазон длин волн солнечного излучения — от 0,3 до 3 мкм, оно существенно более коротковолновое, чем тепловое излучение, испускаемое большинством поверхностей, поглощающих солнечное излучение. Таким образом, анализ солнечных коллекторов представляет собой уникальную задачу теплообмена при низких и переменных плотностях энергетических потоков и относительно большой роли излучения.

Плоские солнечные коллекторы предназначены для потребителей, которым нужна энергия при средних температурах, обычно не превышающих температуру окружающей среды более чем на 100°C . Они используют как прямое, так и рассеянное солнечное излучение, не требуют слежения за солнцем, нуждаются в минимальном обслуживании. Они конструктивно проще концентрирующих коллекторов. Основными применениями плоских солнечных коллекторов являются подогрев воды, отопление зданий, кондиционирование воздуха и получение промышленного технологического тепла. Пассивно отапливаемые здания могут рассматриваться как особые случаи плоских солнечных коллекторов с комнатами или аккумулялирующими стенами в роли поглощающего элемента. Пассивные системы рассматриваются в гл. 14.

Тепловые характеристики плоских коллекторов довольно детально исследованы и получены уравнения для производительности коллектора, необходимые для проектных расчетов, в относительно простом виде.

В последних разделах этой главы обсуждаются вопросы испытаний коллекторов, использования результатов испытаний и некоторые практические аспекты производства и использования таких теплообменников. Стоимостные показатели будут рассмотрены в других разделах книги.



6.1. ОПИСАНИЕ ПЛОСКИХ КОЛЛЕКТОРОВ

Основными компонентами типичного жидкостного плоского солнечного коллектора (рис. 6.1) являются: «черная» поглощающая солнечную энергию поверхность со средствами передачи поглощенной энергии к жидкости, прозрачные для солнечного излучения ограждающие конструкции над поглощающей солнечное излучение панелью, которые уменьшают конвективные и радиационные потери в атмосферу, и задняя теплоизоляция, применяемая для снижения кондуктивных потерь в окружающую среду. На рис. 6.1 изображен водонагреватель, большая часть анализа в этой главе имеет отношение именно к такой геометрии коллектора. Воздухонагреватели по существу устроены так же, за исключением того, что трубы с жидкостью заменяются воздуховодами. Плоские коллекторы почти всегда устанавливаются неподвижно (например, как часть стены или элемент конструкции крыши), ориентация коллектора оптимизируется для конкретного места его расположения и для времени года, в течение которого планируется работа солнечной установки.

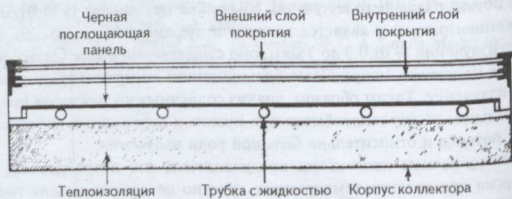


Рис. 6.1. Схематический поперечный разрез плоского солнечного коллектора

6.2. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА

В стационарном состоянии характеристики солнечного коллектора описываются уравнением энергетического баланса, которое показывает, как энергия падающего солнечного излучения распределяется между полезной энергией, тепловыми потерями и оптическими потерями. Солнечное излучение, поглощенное коллектором в расчете на единицу площади поглощающей панели S равно разности между падающим солнечным излучением и оптическими потерями в соответствии с уравнением (5.28). Тепловые потери от коллектора в окружающую среду пропорциональны произведению коэффициента теплопередачи U_L на разность между средней температурой поглощающей панели T_{pm} и температурой окружающей среды T_a . В стационарном состоянии вырабатываемая коллектором площадью A_c полезная энергия есть разность между поглощенным солнечным излучением и тепловыми потерями:

$$Q_u = A_c [S - U_L(T_{pm} - T_a)]. \quad (6.1)$$

Трудность использования этого уравнения состоит в том, что среднюю температуру поглощающей панели определить или измерить сложно, поскольку она зависит от конструкции коллектора, потока падающего солнечного излучения и параметров жидкости на входе в коллектор. Часть этой главы посвящена переформулированию уравнения (6.1) так, чтобы вырабатываемая коллектором полезная энергия могла быть выражена через входную температуру жидкости и параметр, называемый коэффициентом отвода тепла от коллектора (который может быть оценен аналитически из основных принципов или измерен экспериментально).

Уравнение (6.1) — это уравнение мощности, и в единицах системы СИ оно дает вырабатываемую полезную энергию в ваттах (Дж/с), в то время, как S выражается в Вт/м², а U_L — в Вт/(м² · К). Наиболее удобная единица времени для солнечного излучения — скорее час, чем секунда, поскольку это принятый период представления метеорологических данных (например, в табл. 2.1 приведено солнечное излучение в кДж/м² для часовых периодов времени). Это единица времени для S в уравнении (5.28), поскольку I — часовая сумма в Дж/м². Мы можем рассматривать S как выработку энергии за часовой период, измеряемую в Дж/(м² · ч), в этом случае тепловые потери $U_L (T_{pm} - T_a)$ необходимо умножить на 3600 с/ч, чтобы получить численные значения вырабатываемой полезной энергии в Дж/ч. Часовой масштаб не соответствует системе СИ, но такая интерпретация нам далее будет более удобна. С другой стороны, мы можем проинтегрировать уравнение (6.1) за период в 1 ч. Поскольку мы редко располагаем данными за периоды менее одного часа, это интегрирование может быть выполнено только в предположении, что S , T_{pm} и T_a в течение часа остаются постоянными. Получающийся вид уравнения (6.1) не изменяется, исключая то, что обе стороны умножаются на 3600 с/ч. Чтобы избежать включения этой константы в выражения для вырабатываемой полезной энергии на часовой основе, мы могли бы использовать различные символы для интенсивностей и проинтегрированных за час величин (например, Q_u и Q_u). Однако то, какая величина имеется в виду, всегда ясно из использования G или I при оценке S , и применять различные символы для вырабатываемой коллектором полезной энергии на мгновенной и на проинтегрированной за час основе мы нашли излишним. С вычислительной точки зрения коэффициент 3600, тем не менее, необходимо включить, поскольку S обычно известно для часовых интервалов времени, а коэффициент потерь будет в единицах системы СИ.

Мерой эффективности коллектора является КПД процесса преобразования энергии, определяемый как отношение полезной выработки тепла за некоторый заданный период времени к поступившей солнечной энергии за тот же период:

$$\eta = \frac{\int Q_u dt}{A_c \int G_T dt} \quad (6.2)$$

При проектировании солнечных энергоустановок заботятся о минимальной стоимости получаемой энергии. Следовательно, возможны случаи, когда целесообразно спроектировать коллектор с КПД ниже, чем это технологически возможно, если при этом существенно снижается его стоимость. В любом случае необходимо иметь возможность предсказать характеристики коллектора, и это является основной целью данной главы.

6.3. РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЛОСКИХ КОЛЛЕКТОРАХ

Детальное исследование солнечного коллектора представляет собой сложную задачу. К счастью, уже сравнительно простой анализ дает весьма полезные результаты. Эти результаты позволяют выделить существенные переменные, выяснить, как эти переменные связаны и как они влияют на характеристики солнечного коллектора. Для иллюстрации основных принципов построения расчетной схемы, в первую очередь, будет рассмотрен жидкостной коллектор, схема которого приведена на рис. 6.2. Представленная методика расчета основана на исходных разработках [1]—[3].

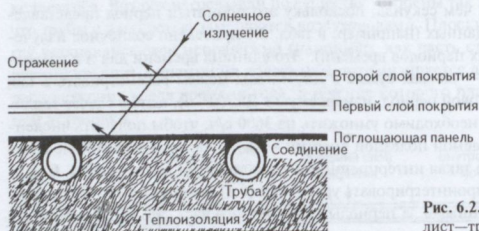


Рис. 6.2. Солнечный коллектор типа лист—труба

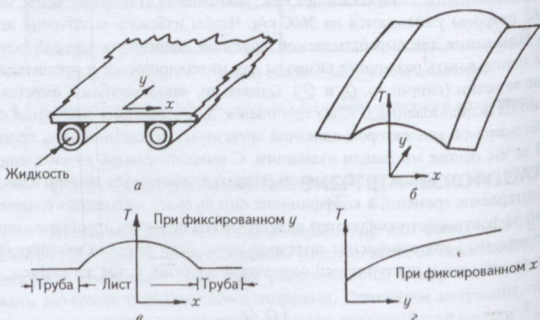


Рис. 6.3. Распределение температур по поглощающей панели [4]

Для того чтобы разобраться в нижеследующих выкладках, желательно иметь представление о распределении температуры, имеющем место в солнечном коллекторе, построенном по схеме рис. 6.2. На рис. 6.3 изображена область между двумя трубами. Часть солнечной энергии, поглощаемой панелью, передается по панели к месту расположения труб. Следовательно, температура панели в точках между трубами будет больше, чем в окрестности труб.

Подвод тепла к жидкости приводит к возникновению температурного градиента в направлении ее течения. Поскольку на любом участке панели уровень температуры определяется местным уровнем температуры жидкости, можно ожидать ситуации, приведенной на рис 6.3, б. В любом сечении y , общее распределение температуры в направлении x будет таким, как показано на рис. 6.3, в, а в любом сечении x распределение температуры в направлении y будет выглядеть, как на рис. 6.3, г.

При моделировании конфигурации, показанной на рис. 6.3, можно сделать ряд основных упрощающих допущений, не искажающих физической сущности процессов. Эти допущения следующие:

1. Режим работы стационарный.
 2. Конструкция типа лист-труба.
 3. Гидравлические коллекторы занимают малую площадь системы в целом и могут не учитываться.
 4. Гидравлические коллекторы обеспечивают равномерное распределение жидкости по трубам.
 5. Поглощение солнечной энергии светопрозрачным покрытием слабо влияет на тепловые потери коллектора.
 6. Тепловой поток через верхнее покрытие является одномерным.
 7. Перепад температуры по толщине слоя покрытия пренебрежимо мал.
 8. Слои прозрачного для коротковолнового солнечного излучения покрытия не прозрачны для инфракрасного излучения панели.
 9. Тепловой поток через заднюю теплоизоляцию является одномерным.
 10. В области длинноволнового излучения небосвод можно рассматривать как абсолютно черное тело при некоторой эффективной температуре.
 11. Градиентами температур по периметру труб можно пренебречь.
 12. Градиенты температур в направлении потока и между трубами могут рассматриваться независимо.
 13. Свойства материалов не зависят от температуры.
 14. Теплопотери через лицевую и заднюю поверхности коллектора происходят в окружающую среду с одинаковой температурой.
 15. Запыление и загрязнение коллектора не учитываются.
 16. Затенение поглощающей панели коллектора не учитывается.
- В следующих разделах этой главы многие из этих допущений будут ослаблены.

6.4. ПОЛНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ КОЛЛЕКТОРА

Уравнения, выведенные в этом разделе, представляют собой систему связанных нелинейных алгебраических или дифференциальных уравнений. Эти уравнения представлены в виде, удобном как для ручного решения, так и решения путем программирования на алгоритмических языках, таких как Фортран, Паскаль или С. Обычно это означает, что нелинейные уравнения линеаризуются, дифференциальные уравнения дискретизируются, и требуется решение итерационными методами. Имеется множество компьютерных программ, которые могут решать

системы алгебраических и дифференциальных уравнений; необходимо только записать эти уравнения в соответствующем виде и предоставить программе [например, Engineering Equation Solver (EES)¹] поиск решения.

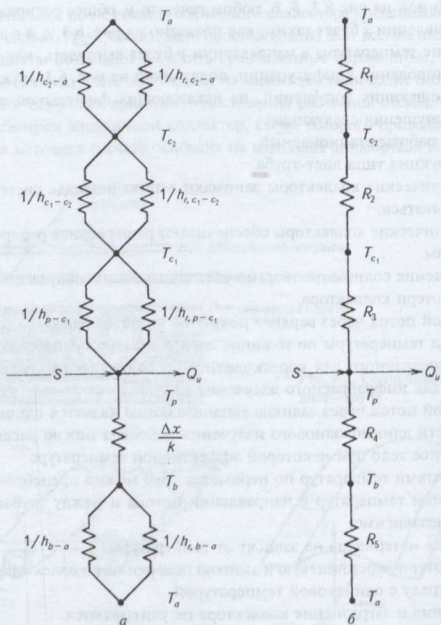


Рис. 6.4. Тепловая схема солнечного коллектора с двухслойным покрытием:

a — в терминах кондуктивных, конвективных и радиационных термических сопротивлений; *б* — в терминах термических сопротивлений между поглощающей панелью, слоями покрытия, окружающей средой

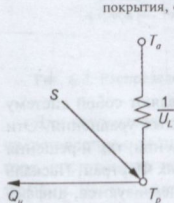


Рис. 6.5. Эквивалентная тепловая схема плоского солнечного коллектора

Для упрощения расчетов полезно ввести понятие полного коэффициента потерь солнечного коллектора. Рассмотрим тепловую схему коллектора с двухслойным покрытием, представленную на рис. 6.4. В некоторой характерной до-

¹ Информация об Engineering Equation Solver доступна на <http://www.fchart.com>

кальной области панели, где температура равна T_p , панелью поглощается солнечное излучение энергии S , где S равно энергии падающего солнечного излучения за вычетом оптических потерь (см. разд. 5.9). Поглощенная энергия S разделяется на тепловые потери через лицевую и заднюю стенки коллектора и на выработку полезного тепла. Цель этого раздела — переход от тепловой схемы рис. 6.4 к эквивалентной тепловой схеме рис. 6.5.

Энергетические потери через лицевую поверхность коллектора являются результатом конвективного и радиационного теплообмена между параллельными пластинами. В стационарном состоянии поток тепла между панелью при T_p и первым слоем покрытия при T_{c1} равен потерям энергии в окружающую среду с наружного слоя покрытия. Потери с наружного слоя покрытия в расчете на единицу площади, в таком случае, равны переносу тепла с поглощающей панели к первому слою покрытия:

$$q_{\text{loss, top}} = h_{c, p-c1} (T_p - T_{c1}) + \frac{\sigma (T_p^4 - T_{c1}^4)}{1/\epsilon_p + 1/\epsilon_{c1} - 1}, \quad (6.3)$$

где $h_{c, p-c1}$ — конвективный коэффициент теплопередачи между двумя наклонными параллельными пластинами (см. гл. 3). Если использовать определение радиационного коэффициента теплопередачи (3.25), тепловые потери обращаются в

$$q_{\text{loss, top}} = (h_{c, p-c1} + h_{r, p-c1}) (T_p - T_{c1}), \quad (6.4)$$

где

$$h_{r, p-c1} = \frac{\sigma (T_p + T_{c1}) (T_p^2 + T_{c1}^2)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_{c1}} - 1}. \quad (6.5)$$

Сопротивление R_3 может быть выражено как

$$R_3 = \frac{1}{h_{c, p-c1} + h_{r, p-c1}}. \quad (6.6)$$

Аналогичное выражение можно записать для R_2 — сопротивления между слоями покрытия. Вообще говоря, число слоев покрытия может быть любым, однако на практике редко используются два, а в большинстве коллекторов используется 1 слой.

Термическое сопротивление от наружного слоя покрытия к окружающей среде имеет тот же вид, что уравнение (6.6), однако в него входит конвективный коэффициент теплопередачи h_w , определенный в разд. 3.15. Радиационное термическое сопротивление от наружного слоя покрытия отвечает за радиационный теплообмен с небосводом, находящимся при температуре T_s . Для удобства мы относим это сопротивление к температуре окружающего воздуха T_a , так что радиационный коэффициент теплопередачи может быть записан в виде:

$$h_{r, c2-a} = \frac{\sigma \epsilon_c (T_{c2} + T_s) (T_{c2}^2 + T_s^2) (T_{c2} - T_s)}{T_{c2} - T_a}. \quad (6.7)$$



Сопротивление к окружающей среде R_1 , при этом, задается выражением

$$R_1 = \frac{1}{h_w + h_r, c_2 - a}. \quad (6.8)$$

Для рассмотренной системы с двухслойным покрытием, коэффициент потерь через лицевую поверхность от панели коллектора к окружающей среде равен

$$U_i = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3}. \quad (6.9)$$

Процедура нахождения коэффициента потерь через лицевую поверхность с использованием уравнений (6.3)—(6.9) неизбежно представляет собой итерационный процесс. Сначала делается предположение о неизвестных температурах слоев покрытия, на основании которого рассчитываются конвективный и радиационный коэффициенты теплопередачи между параллельными пластинами. В этом случае уравнение (6.3) может быть решено, а коэффициент тепловых потерь через лицевую поверхность — вычислен. Тепловые потери через лицевую поверхность коллектора есть произведение этого коэффициента на полную разность температур, поскольку тепловой поток между поверхностями должен быть равен тепловым потерям, можно рассчитать новый набор температур слоев покрытия. Начиная с температуры поглощающей панели, рассчитывается температура первого слоя покрытия, новое значение температуры первого слоя покрытия используется для нахождения температуры следующего слоя и так далее. Для любых двух соседних слоев покрытия или панели новая температура пластины или покрытия j может быть выражена через температуру панели/покрытия i следующим образом:

$$T_j = T_i - \frac{U_i (T_p - T_a)}{h_{c, i-j} + h_{r, i-j}}. \quad (6.10)$$

Процесс повторяется до тех пор, пока температуры слоев покрытия между последовательными итерациями будут отличаться незначительно. Следующий пример иллюстрирует процесс.

Пример 6.1

Рассчитать коэффициент потерь через лицевую поверхность для поглощающей панели с одностекольным покрытием и следующими характеристиками:

Расстояние между поглощающей панелью и стеклом	25 мм
Степень черноты панели	0,95
Температуры окружающего воздуха и небосвода	10 °С
Коэффициент теплоотдачи за счет ветра	10 Вт/(м ² · °С)
Средняя температура поглощающей панели	100 °С
Угол наклона коллектора к горизонту	45°
Степень черноты стекла	0,88