

ГЛАВА 5

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

5.1. ОБЪЕКТ АНАЛИЗА

В этой главе рассматриваются простейшие солнечные водонагревательные установки (СВУ), ориентированные на индивидуальных потребителей с суточным потреблением от 100 до нескольких сотен литров горячей воды. Как правило, 100 литров нагретой воды оказывается достаточно для удовлетворения минимальных бытовых потребностей семьи из 2–3 человек. Такие установки сегодня находят наибольшее распространение в мире среди частных пользователей и имеют спрос во многих российских регионах. Принципиальная схема рассматриваемой солнечной установки изображена на рис. 25.

Установка включает в себя в качестве основных компонентов солнечный коллектор, водяной бак-аккумулятор и теплоизолированные трубопроводы, обеспечивающие их гидравлическую связь. В дневное время при наличии солнечного излучения вода нагревается в солнечном коллекторе и за счет естественной или принудительной циркуляции поступает в бак-аккумулятор, откуда вновь направляется в солнечный коллектор для дальнейшего нагрева. Стандартные средства автоматики прекращают циркуляцию воды в контуре при недоста-

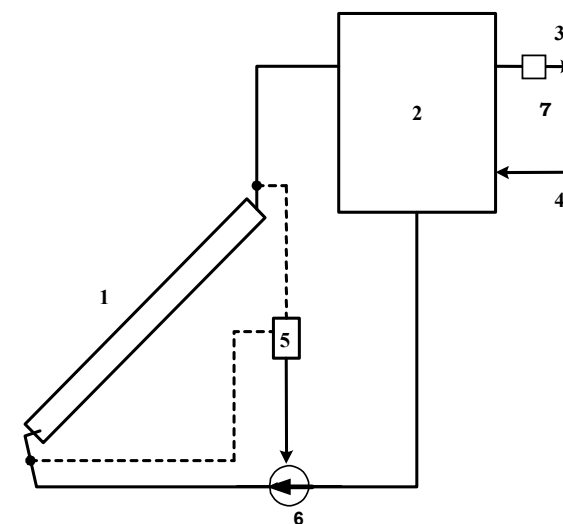


Рис. 25. Принципиальная схема солнечной водонагревательной установки: 1 – солнечный коллектор; 2 – бак-аккумулятор; 3 – вывод горячей воды к потребителю; 4 – ввод холодной воды; 5 – блок автоматики; 6 – циркуляционный насос, 7 – резервный нагреватель

точном для нагрева воды в солнечном коллекторе потоке солнечного излучения и возобновляют ее, если поток солнечного излучения для нагрева воды достаточен. В течение светового дня вода из бака-аккумулятора, как правило, проходит через солнечный коллектор многократно, нагреваясь до максимальной температуры во второй половине дня. К потребителю нагретая солнцем вода отбирается из бака-аккумулятора, догреваясь, если это необходимо, до нужной потребителю темпера-

туры в резервном нагревателе. Размещение резервного нагревателя за баком-аккумулятором позволяет повысить эффективность солнечного нагрева воды по сравнению с вариантом размещения нагревателя внутри бака (повысить КПД солнечного коллектора), поскольку в этом случае вода в солнечном коллекторе нагревается от более низких температур.

5.2. ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВУ

Традиционным и широко используемым показателем энергетической эффективности использования солнечной энергии для нагрева воды является доля покрытия нагрузки горячего водоснабжения потребителя за счет солнечной энергии (в зарубежной литературе он носит название «solar fraction», в отечественной литературе иногда называется коэффициентом замещения) f :

$$f = \frac{Q_{solar}}{Q_{total}} = \frac{Q_{solar}}{Q_{solar} + Q_{PH}}, \quad (7)$$

где Q_{solar} – энергия солнечного излучения, пошедшая на нагрев воды, Q_{total} – суммарная энергия, затраченная на нагрев воды до необходимой потребителю температуры. Эта энергия равна сумме Q_{solar} и энергии, подведенной от резервного нагревателя, Q_{PH} . Доля покрытия нагрузки f изменяется в диапазоне от 0 до 1. В первом случае на-

грев воды осуществляется только от резервного нагревателя, во втором – только за счет солнечной энергии. Если за счет солнечной энергии вода в баке-аккумуляторе нагревается выше необходимой потребителю температуры (ясный солнечный день или чрезмерно большая площадь солнечных коллекторов), то избыток затраченной энергии не учитывается, величина f ограничена единицей.

В работе [31] введен еще один показатель эффективности СВУ, который наряду с долей покрытия нагрузки позволяет получить информацию о работе установки и является более понятным и наглядным для потенциальных пользователей, не всегда разбирающихся в тонкостях энергетического баланса. Показатель характеризует число дней $N_{t>t^*}$ за определенный период времени (месяц, сезон, полугодие, год), в которые вода в баке-аккумуляторе СВУ нагревается за счет солнечной энергии до температуры не ниже, чем контрольная (t^*). Если рассматриваемый период содержит N_{max} календарных дней, то соответствующий удельный показатель имеет вид:

$$n_{t>t^*} = \frac{N_{t>t^*}}{N_{max}}. \quad (8)$$

Данный показатель, как и доля покрытия нагрузки, изменяется в диапазоне от 0 до 1 и информирует пользователя о том, какую долю дней интересующего его пе-

риода солнечная установка обеспечит нагрев воды в баке-аккумуляторе не ниже, чем до контрольной температуры без использования резервного нагревателя. Таким образом, этот показатель применим не только для СВУ с резервным нагревателем, но и для простейших установок, резервного нагревателя не имеющих.

В качестве контрольных температур t^* целесообразно выбирать такие значения, которые представляют интерес для потребителя, например, 37, 45 и 55°C (при температуре 37°C вода уже ощущается как теплая, все перечисленные уровни температур имеют потребительскую значимость и присутствуют в нормативных документах по горячему водоснабжению).

5.3. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВУ

Показатели эффективности СВУ могут быть оценены на основе моделирования работы солнечных установок в реальных климатических условиях с использованием характеристик применяемого в них оборудования. Такие математические модели разработаны в Объединенном институте высоких температур РАН [31, 32]. Перечислим здесь их основные особенности.

Имитационные модели солнечных установок разработаны с использованием упомянутой выше программы динамического моделирования TRNSYS, в качестве исходной климатической информации ис-

пользуются справочные среднемесячные климатические данные, на основе которых генерируется «типичный метеогод».

Солнечная установка моделируется поэлементно с обеспечением между элементами информационных связей, отражающих связи физических параметров, описывающих работу компонентов установки.

Солнечные коллекторы. На рынке имеется широкий выбор солнечных коллекторов различных конструкций (от простейших плоских бесстекольных, применяемых для подогрева воды в плавательных бассейнах, до трубчатых вакуумированных, в том числе с оптическими концентраторами, позволяющих получать температуры теплоносителя до 200°C и выше). В солнечных водонагревательных установках наиболее широкое применение находят относительно недорогие и простые по конструкции плоские одностекольные солнечные коллекторы. Такие коллекторы выпускаются и рядом российских производителей (Ковровский машиностроительный завод, ВПК «НПО Машиностроения» и др.). Основными, принципиально важными характеристиками солнечного коллектора является его оптический КПД $F'(\tau\alpha)$ и обобщенный коэффициент тепловых потерь $F'U_L$. Эти характеристики измеряются на специальных стендах в соответствии с существующими стандартами, интегрально описывают степень теплотехнического совершенства солнечных коллекторов и необходимы для анализа эффективности

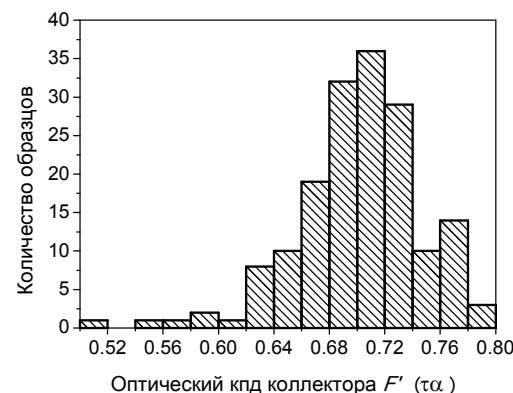


Рис. 26. Распределение значений оптического КПД солнечных коллекторов, по количеству образцов

СВУ. В зависимости от особенностей конструкции солнечного коллектора параметры его теплотехнического совершенства могут изменяться в довольно широких пределах.

На рис. 26 и 27 приведено распределение по количеству образцов значений параметров теплотехнического совершенства плоских одностекольных солнечных коллекторов, испытания которых были проведены в Институте солнечных технологий (Institut für Solartechnik, SPF), Швейцария (около 200 образцов различных производителей).

Моделирование выполнялось применительно к плоским солнечным коллекторам с $F'(\tau\alpha) = 0,7$ и $F'U_L = 3,5$ Вт/м²К, соответствующим типичным представителям солнечных коллекторов, представленных на европейском рынке (максимумы распределений

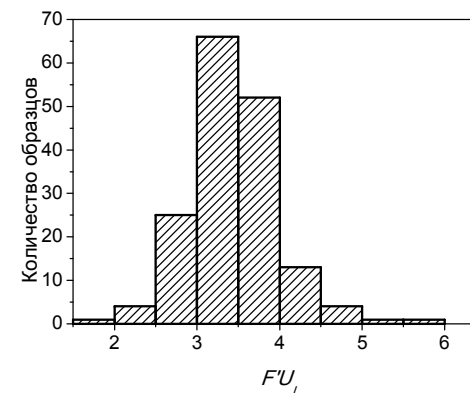


Рис. 27. Распределение значений приведенного коэффициента потерь (без ветра) солнечных коллекторов по количеству образцов

рис. 26 и 27). Характеристики плоских солнечных коллекторов ведущих российских производителей выбранным значениям также приблизительно соответствуют.

Солнечный коллектор считался ориентированным на юг, угол наклона к горизонту приблизительно равен широте местности.

Бак-аккумулятор хорошо теплоизолирован, а вода в нем хорошо перемешана (температурная стратификация отсутствует).

Важным фактором при моделировании СВУ является суточный график потребления нагретой воды. Для упрощения анализа предполагалось, что разбор нагретой воды осуществляется лишь после захода солнца. К следующему утру бак полностью опорожняется и заполняется водопроводной водой с температурой 10°C.

Рассматривалась типичная СВУ с объемом бака 100 л. Площадь солнечного коллектора варьировалась в диапазоне от 1 до 4 м². Полученные результаты могут быть распространены и на СВУ с большим объемом бака-аккумулятора с использованием масштабного фактора, поскольку очевидно, что в рассмотренной постановке задачи показатели эффективности СВУ будут одинаковыми для установок с одним и тем же соотношением между объемом бака-аккумулятора и площадью солнечного коллектора (100 л/2 м² и 200 л/4 м² и т.п.).

Итак, анализ показателей эффективности СВУ базировался на динамическом моделировании типовой установки в конкретных климатических условиях. В процессе моделирования рассчитывались ежесуточные показатели работы установки, фиксировались достигнутые температуры нагрева воды полученные результаты статистически обрабатывались для различных периодов года.

В выполненных в 2001–2003 гг. исследованиях применительно к климатическим условиям России, а затем и Европы [33, 34], было установлено, что в рамках сформулированной постановки задачи имеют место универсальные зависимости показателей эффективности СВУ от сумм солнечной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность. Полученные результаты создали предпосылки для расширения географической зоны анализа на другие континенты [35]. Приведенные ниже данные от-

носятся к 1049 метостанциям, распределенным по частям света следующим образом: Африка – 144, Азия – 158, Антарктида – 10, Австралия и Океания – 45, Северная и Центральная Америка – 404, Южная Америка – 121, Европа – 167. В их число входят и метеостанции, расположенные в европейской и азиатской частях России. Первичными источниками климатической информации служили уже упомянутые базы климатических данных RETScreen (Канада) и Научно-прикладной справочник по климату СССР.

5.4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СВУ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Примеры обобщения результатов моделирования СВУ в виде зависимостей удельного числа дней, в которые вода в баке-аккумуляторе установки нагревается не ниже, чем до указанных контрольных температур, от среднесуточной суммарной солнечной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность за рассматриваемый период года приведены на рис. 28...30. Рисунки относятся к типичной СВУ с площадью солнечного коллектора 2 м². Рис. 28 иллюстрирует работу СВУ в течение всего года (365 дней), рис. 29 – в течение теплого полугодия, рис. 30 – в течение летних месяцев. Несмотря на определенный разброс расчетных точек, обусловленный особенностями микроклимата, имеет место явно вы-

раженное расслоение массива точек по контрольным температурам, причем с ростом дневной суммы солнечной радиации удельное число дней возрастает, приближаясь к 1. При относительно малых значениях дневной суммы солнечной радиации число дней естественно стремится к нулю.

На рис. 30 представлен пример анализа корреляции между двумя критериями эффективности: удельным числом дней и долей покрытия нагрузки для летнего периода работы СВУ. При приближении доли покрытия нагрузки f к 1, что достигается, например, путем увеличения площади солнечного коллектора, удельное число дней n также приближается к единице, т.е. практически во все дни рассматриваемого периода года СВУ нагревает воду не ниже, чем до контрольного уровня температуры. При уменьшении площади солнечного коллектора оба показателя снижаются, причем существует некое значение доли покрытия, при котором $n = 0$. Для рассмотренного на рис. 30 случая пороговое значение соответствует $f = 0,4 \dots 0,5$. Этот факт является исключительно важным, поскольку свидетельствует о том, что солнечная установка, имеющая проектную долю покрытия нагрузки за счет солнечной энергии ниже 0,5, без использования резервного нагревателя воду до контрольного уровня температуры нагреть не сможет. Создание СВУ без резервного нагревателя должно быть ориентировано на получение

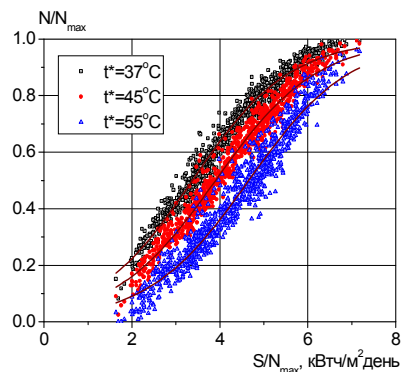


Рис. 28. Результаты моделирования работы типичной СВУ в течение всего года ($N_{\max} = 365$), площадь коллектора 2 м^2

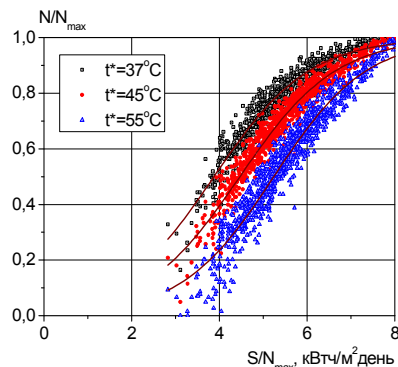


Рис. 29. Результаты моделирования работы типичной СВУ в теплое полугодие ($N_{\max} = 183$), площадь коллектора 2 м^2

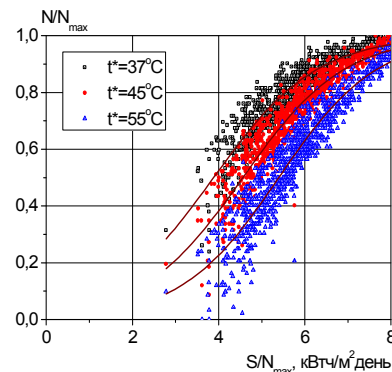


Рис. 30. Результаты моделирования работы типичной СВУ в летний период ($N_{\max} = 92$), площадь коллектора 2 м^2

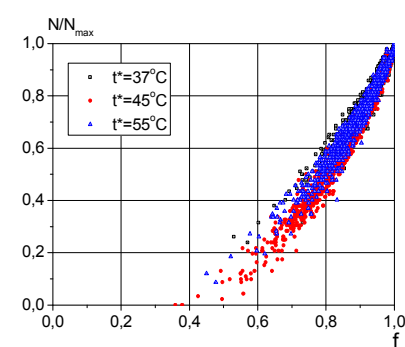


Рис. 31. Корреляция между N/N_{\max} и долей покрытия тепловой нагрузки (площадь коллектора 2 м^2 , лето)

высоких значений доли покрытия, по крайней мере, превышающих 0,5.

5.5. ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СВУ

Полученные в результате вариантных расчетов зависимости удельного числа дней от суточных сумм солнечного излучения, приходящего на горизонтальную поверхность, отличаются относительно небольшим разбросом данных, что позволяет провести их обработку с получением более или менее универсальных аппроксимационных соотношений, пригодных для проведения инженерных оценок. При этом следует отметить, что указанные зависимости имеют вид широко используемых, в том числе и в гелио-

технике, «input-output» диаграмм, т.е. соотношений между входными и выходными «сигналами» системы, рассматриваемой как «черный ящик». В нашем случае входным сигналом служит наиболее существенный климатический параметр – дневная сумма солнечного излучения, усредненная за рассматриваемый период года, выходным – удельное число дней, в которые температура воды в баке-аккумуляторе СВУ не ниже контрольного значения. Не останавливаясь на подробностях процедуры обработки данных, представим ее конечный результат.

Анализ возможностей аппроксимации результатов показал, что наиболее подходящей и простой для практического применения является функция Больцмана с пределами изменения от нуля до единицы:

$$\frac{N}{N_{\max}} = 1 - \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{S/N_{\max} - X_0}{dx}\right)}, \quad (9)$$

где X_0 – абсцисса точки перегиба (ордината этой точки равна 0,5), dx – постоянная времени в функции Больцмана, S/N_{\max} – дневная сумма солнечной радиации, усредненная за рассматриваемый период года. Наилучшая аппроксимация результатов получается при $dx = 1,10 \pm 0,02 \text{ кВтч/м}^2 \text{ день}$, а параметр X_0 является функцией площади солнечного коллектора F_c , хорошо аппроксимируемой гиперболой

$$X_0 = \frac{P_1 F_c}{F_c - P_2}, \quad (10)$$

где $P_2 = 0,54 \pm 0,06 \text{ м}^2$, а параметр P_1 линейно зависит от контрольной температуры t^*

$$P_1 = B(t^* + \Delta t), \quad (11)$$

где $\Delta t = 3^\circ\text{C}$, $B = 0,060$, $0,067$ и $0,070$ для СВУ, работающих круглый год, полгода и три месяца, соответственно.

Погрешность использования полученных аппроксимационных соотношений, собственно и составляющих в совокупности разработанную инженерную методику, при расчете удельного числа дней лежит в пределах $15 \dots 20\%$ в рассмотренном диапазоне изменения параметров СВУ, что для инженерных оценок вполне приемлемо. Применение методики сводится к следующим последовательным действиям:

1. Для предполагаемого места создания СВУ определяется дневная сумма солнечного излучения на горизонтальную поверхность, усредненная за предполагаемый период эксплуатации установки: круглый год ($N_{\max} = 365$), теплое полугодие ($N_{\max} = 183$) или только летняя эксплуатация ($N_{\max} = 92$).

2. С учетом продолжительности периода работы установки выбирается значение коэффициента B и по формуле (11) для желаемой контрольной температуры t^* вычисляется коэффициент P_1 .

3. По формуле (10) определяется X_0 в зависимости от площади солнечного коллектора.

4. Наконец, по формуле (9) рассчитывается искомое удельное число дней за рассматриваемый период эксплуатации, в которые СВУ будет нагревать воду не ниже, чем до выбранного контрольного уровня температуры.

На основе вариантных расчетов потребитель может определить подходящую площадь солнечных коллекторов и провести соответствующие экономические оценки.

Разработанная инженерная методика является упрощенной и не учитывает ряд специфических технических и эксплуатационных факторов, влияющих на эффективность использования солнечных водонагревателей, однако для приближенных оценок и формирования представления о том, что может дать простейшая солнечная водонагревательная установка в различных климатических условиях она крайне полезна.

5.6. АНАЛИЗ КАРТОГРАФИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

На картах 25...28 представлены результаты расчета эффективности использования типичной индивидуальной солнечной водонагревательной установки с солнечным коллектором площадью 2 м^2 с использованием двух описанных выше показателей: удельного числа дней n (карты 25...26) нагрева воды до температуры не менее 37°C и доли покрытия нагрузки горячего водоснабжения за счет солнечной энергии f (карты 27...28) для

теплого полугодия (апрель–сентябрь) и летних месяцев (июнь–август).

В летний период на большей части территории юга России и значительной части Сибири доля покрытия нагрузки за счет солнечной энергии составляет $0,9 \dots 1,0$. На остальной территории страны доля покрытия нагрузки составляет $0,8 \dots 0,9$ и лишь на относительно малых территориях северо-запада страны и на части территорий Дальнего Востока доля покрытия оказывается $0,6 \dots 0,8$.

По другому показателю – относительно числу дней, получение в рассмотренной СВУ воды с температурой не ниже 37°C в течение $80 \dots 90\%$ летних дней возможно на части территории Северного Кавказа, в Бурятии и Тыве, на части территории Якутии. Для большей части территории России ежедневное получение горячей воды в летнее время с вероятностью более 60% остается весьма высокой. Лишь на окраинных западных, северо-западных и восточных территориях величина удельного числа дней в летнее время оказывается ниже 50% .

Аналогичные результаты для теплого полугодия демонстрируют карты 25 и 27. Рассмотренные показатели по сравнению с летним периодом несколько снижаются, однако остаются достаточно высокими для того, чтобы сделать вывод о высокой эффективности использования солнечных водонагревательных установок на большей части территории России.