

**ПОТЕНЦИАЛ ЗАМЕЩЕНИЯ ОТОПИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ  
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА  
ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ЗЕМЛИ<sup>6</sup>**

В.Я. Федянин, И.Б. Неймарк, Н.Б. Шарипов

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова

Барнаул, Российская Федерация

[fedyanin054@mail.ru](mailto:fedyanin054@mail.ru)

Теплонасосные установки, применяемые для решения проблем теплоснабжения зданий, в последнее время продемонстрировали конкурентные преимущества на рынке теплохладогенерирующего оборудования благодаря своим возможностям замещать органическое топливо низкопотенциальным теплом природного и техногенного происхождения. С ростом цен и тарифов на ископаемое топливо эти тенденции усиливаются [1].

Использование низкопотенциальной теплоты поверхностных слоев Земли посредством тепловых насосов возможно практически в любой местности. В настоящее время это одно из наиболее динамично развивающихся направлений использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии. Низкопотенциальная тепловая энергия поверхностных слоев Земли, извлекаемая с помощью тепловых насосов, может использоваться для отопления, горячего водоснабжения, кондиционирования в зданиях и сооружениях любого назначения.

В общем случае теплонасосная система теплохладоснабжения, использующая низкопотенциальную теплоту поверхностных слоев Земли, включает в себя два основных элемента:

— теплонасосное оборудование;

— систему сбора низкопотенциальной теплоты поверхностных слоев Земли.

В настоящее время основу эксплуатируемого сегодня в мире парка теплонасосного оборудования составляют парокомпрессионные тепловые насосы, но применяются также и абсорбционные, электрохимические и термоэлектрические.

**Потенциал возобновляемого тепла.** Тепловой баланс земной поверхности и атмосферы, учитывая приток и отдачу тепла для системы «Земля–атмосфера», отражает закон сохранения энергии. Чтобы составить уравнение теплового баланса «Земля–атмосфера», следует учесть все тепло — получаемое и расходуемое, — с одной стороны, всей Землей вместе с атмосферой, а с другой, — отдельно подстилающей поверхностью земли (вместе с гидросферой и литосферой) и атмосферой. Поглощая лучистую энергию Солнца, земная поверхность часть этой энергии теряет через

<sup>6</sup> Работа поддержана грантом РФФИ, №15-48-04071.

излучение. Остальная часть расходуется на нагревание этой поверхности и нижних слоев атмосферы, а также на испарение. Нагревание подстилающей поверхности сопровождается теплоотдачей в почву, а если почва влажная, то одновременно происходит затрата тепла и на испарение почвенной влаги.

Основной приток энергии к Земле обеспечивается солнечным излучением и составляет около  $341 \text{ Вт/м}^2$  в среднем по всей поверхности планеты. Внутренние источники тепла (радиоактивный распад, стратификация по плотности) по сравнению с этой цифрой незначительны (около  $0,08 \text{ Вт/м}^2$ ).

Земная поверхность, здания, растительность, поглощая солнечную радиацию, нагреваются и испускают длинноволновое инфракрасное излучение  $I_i$ , которое тем больше, чем выше их температура. Атмосфера и облака также испускают длинноволновое излучение  $I_a$ , которое, падая на земную поверхность, поглощается и почти компенсирует расход  $I_i$ .

Разность между приходом и расходом лучистой энергии представляет собой **радиационный баланс**:

$$B = S + D + I_a - R - I_i, \quad (1)$$

где  $S$  — прямая солнечная радиация на горизонтальную поверхность;

$D$  — рассеянная солнечная радиация;

$R$  — отраженная радиация.

Таким образом, **тепловой баланс** поверхностных слоев Земли в целом складывается из четырех составляющих:

— радиационный баланс ( $B$ ). Он определяется разностью между количеством поглощенной коротковолновой радиации Солнца и длинноволновым эффективным излучением;

— теплообмен в почве, характеризующий процесс теплопередачи между поверхностными и более глубокими слоями почвы ( $A$ ). Этот тепловой поток зависит от теплофизических характеристик почвы;

— турбулентный теплообмен между земной поверхностью и атмосферой ( $P$ ). Он определяется количеством тепла, которое подстилающая поверхность получает или отдает атмосфере в зависимости от соотношения между температурами подстилающей поверхности и атмосферы;

— тепло, затрачиваемое на испарение ( $Q_p E$ ). Оно определяется произведением скрытой теплоты парообразования ( $Q_p$ ) на поток влаги в процессе испарения ( $E$ ).

Эти составляющие теплового баланса в силу закона сохранения энергии связаны между собою следующим соотношением:

$$A = B - P - Q_p E, \quad (2)$$

## Grand Altai Council of HEI Chancellors network edition

Таким образом, температура почвы формируется под воздействием падающей на поверхность солнечной радиации и процессами теплообмена на границе «почва–атмосфера». Сезонные и суточные изменения интенсивности солнечной радиации и температуры наружного воздуха вызывают колебания температуры верхних слоев грунта.

В течение года в слоях почвы, примыкающих к поверхности выше границы «нейтральной зоны», под воздействием потоков тепла, связанных с солнечной радиацией, интенсивно идет процесс теплопереноса. В холодный период года результирующий поток тепла направлен из глубины к поверхности, весной и в первую половину лета напротив — от верхних слоев в глубь почвы. Летом на процессы теплопереноса влияет растительный покров (чем он выше и чаще, тем ниже температура), зимой — состояние и мощность снежного покрова, который обладает малой теплопроводностью и поэтому способствует сохранению тепла в почве.

Исходя из описанных выше механизмов теплопереноса, тепловой поток в поверхностном слое почвы (выше границы «нейтральной зоны») изменяется от величины, соответствующей геотермическому градиенту, до величины, определяемой условиями теплообмена на границе «почва — атмосфера»

Величина теплового потока на границе «почва — атмосфера» определяется краевым условием:

$$-\lambda_p \left. \frac{\partial T_p}{\partial z} \right|_{zp} = A/F, \quad (3)$$

где  $\lambda_p$  — коэффициент теплопроводности почвы, Вт/м °С,

$T_p(z,t)$  — температура почвы, °С,

$F$  — площадь реперного участка, м<sup>2</sup>.

Поглощенная поверхностными слоями почвы энергия приводит к нестационарным процессам теплообмена. Пространственно-временное распределение температуры описывается следующей формулой [2]:

$$T(z,t) = T_0 - \Delta T_0 e^{-\xi} \cos(\omega t + \varphi - \xi), \quad (4)$$

где  $\xi = z \sqrt{\frac{\omega}{2a}}$  безразмерная глубина;

$\omega$  — круговая частота, соответствующая годовому периоду колебаний

$$\omega = \frac{2\pi}{365 * 24 * 3600} = 2,0 * 10^{-7} \text{ рад/с};$$

$a = \frac{\lambda}{\rho c}$  — коэффициент температуропроводности почвы, м<sup>2</sup>/с;

коэффициенты  $T_0$ ,  $\Delta T_0$  и  $\varphi$  выбираются из условия наилучшего совпадения значений температуры поверхности почвы, измеренной напочвенным термометром и рассчитанной с помощью формулы:  $T(t) = T_0 - \Delta T_0 \cos(\omega t + \varphi)$ .

Удельное количество теплоты, запасаемое слоем почвы за время, равное половине периода, равно:

$$Q_0 = \frac{2\pi b \Delta T_0}{\omega}, \text{ Дж/м}^2, \quad (5)$$

где  $b = \sqrt{\lambda \rho c \omega / \pi}$ , Дж/(м<sup>2</sup>К) — коэффициент теплоусвоения почвы за половину периода.

Средняя удельная тепловая энергия, запасаемая в одном кубическом метре поверхностных слоев почвы, равна:

$$Q_v = \frac{Q_s}{L}, \text{ Дж/м}^3, \quad (6)$$

где  $L = \sqrt{\frac{2 a_p}{\omega_k}}$  — характерное расстояние, определяющее пространственное изменение амплитуды и фазы температурной волны, м.

Введем коэффициент преобразования энергии солнечного излучения в тепловую энергию, запасенную почвой:

$$\eta_s = \frac{Q_0}{B_+}, \quad (7)$$

где  $B_+$ , МДж/м<sup>2</sup> — средняя величина суммарной приходной (положительной) части баланса солнечной радиации на горизонтальную поверхность при действительных условиях облачности.

**Безразмерный критерий (потенциал) замещения отопительной нагрузки.** Солнечная энергия, запасенная в поверхностных слоях почвы, — возобновляемый источник, который может быть использован для отопления зданий промышленного и гражданского назначения.

Нормами [3] установлены показатели тепловой защиты здания:

— удельный расход тепловой энергии на отопление здания  $q_h^{des}$ , кДж/(м<sup>2</sup> °С сут) или [кДж/(м<sup>3</sup> °С сут)] (на 1 м<sup>2</sup> отапливаемой площади пола квартир или полезной площади помещений [или на 1 м<sup>3</sup> отапливаемого объема]). Этот показатель для любого здания должен быть меньше или равен нормируемому значению  $q_h^{req}$ , кДж/(м<sup>2</sup> °С сут) или [кДж/(м<sup>3</sup> °С сут)], и определяется путем выбора теплозащитных свойств ограждающих конструкций здания, объемно-планировочных решений, ориентации здания и типа, эффективности и метода регулирования используемой системы отопления до удовлетворения условия: удельный расход тепловой энергии на отопление здания достигает нормируемого значения этого показателя;

— градусо-сутки отопительного периода  $D_d$ , °С·сут, определяют по формуле:

$$D_d = (t_{int} - t_{hr}) z_{hr}, \quad (8)$$

## Grand Altai Council of HEI Chancellors network edition

где  $t_{int}$  — расчетная средняя температура внутреннего воздуха здания, °С,  
 $t_{ht}$ ,  $z_{ht}$  — средняя температура наружного воздуха, °С, и  
продолжительность отопительного периода, сут.

При использовании теплонасосных систем теплоснабжения вводят показатель энергетической эффективности системы — коэффициент преобразования теплового насоса [3]:

$$\mu = Q_{конт} / N_{конт}, \quad (9)$$

где  $Q_{конт}$  — теплота, отводимая от теплообменника-конденсатора,  
 $N_{конт}$  — электроэнергия, подводимая к приводу компрессора.

Энергетический баланс теплового насоса описывается следующим уравнением:

$$Q_{конт} = N_{конт} + Q_{исп}, \quad (10)$$

где  $Q_{исп}$  — теплота, подводимая к теплообменнику-испарителю от низкопотенциального источника.

С учетом (9) и (10) получим:

$$Q_{исп} = \frac{\mu - 1}{\mu} Q_{конт}. \quad (11)$$

Рассмотрим составляющие энергетического баланса теплонасосной системы отопления здания за отопительный период:

— количество низкопотенциального тепла поверхностных слоев Земли, потребляемое системой отопления, равно

$$Q_{исп} = F \cdot Q_0 = F \cdot \eta_s \cdot B_+; \quad (12)$$

— тепловые потери здания за отопительный период равны

$$Q_{конт} = F_{зд} \cdot q_h^{req} D_d. \quad (13)$$

Подставив (12) и (13) в (11), найдем отношение площади реперного участка к отапливаемой площади здания:

$$f = \frac{F}{F_{зд}} = \frac{\mu - 1}{\mu} \cdot \frac{q_h^{req} D_d}{\eta_s B_+}. \quad (14)$$

Безразмерный критерий  $f$  назовем **потенциалом замещения отопительной нагрузки при использовании низкопотенциального тепла поверхностных слоев Земли.**

Формула (14) справедлива в том случае, когда используется показатель  $q_h^{req}$  с размерностью кДж/(м<sup>2</sup> °С сут).

Если же для здания нормируется удельное теплотребление в расчете на  $1 \text{ м}^3$  отапливаемого объема, формула для критерия  $f$  примет следующий вид:

$$f = \frac{F \cdot L}{V_{\text{зд}}} = \frac{\mu - 1}{\mu} \cdot \frac{q_h^{\text{рег}} D_d L}{\eta_s B_+}, \quad (15)$$

где  $V_{\text{зд}}$  — отапливаемый объем здания,  $\text{м}^3$ .

Для примера оценим величину этого критерия для малоэтажного жилого здания в условиях Барнаула (2 этажа, отапливаемая площадь  $250 \text{ м}^2$ ).

Изменения температуры почвы, измеренные напочвенными термометрами, расположенными на различной глубине, приведены на рисунке 1 б). Средняя годовая температура поверхности почвы в Барнауле составляет  $2,0^\circ\text{C}$ . Это на  $0,8^\circ\text{C}$  выше средней годовой температуры воздуха. С апреля по октябрь температура поверхности почвы положительна, а с мая по сентябрь превышает  $10^\circ\text{C}$ . Периодическое изменение температуры поверхности возбуждает колебание температуры поверхностных слоев почвы.

В годовом ходе радиационный баланс в Барнауле с марта по октябрь — положительный и достигает максимального значения ( $381 \text{ МДж/м}^2$ ) в июле. При положительном балансе земная поверхность получает больше энергии от Солнца, чем его излучает в инфракрасном диапазоне. Энергия расходуется на нагревание почвы, воздуха и испарение влаги. К осени радиационный баланс существенно уменьшается, и в октябре он равен  $38 \text{ МДж/м}^2$ . Зимой радиационный баланс отрицательный, месячные суммы изменятся в пределах  $-21 \div -38 \text{ МДж/м}^2$ . Среднегодовое значение радиационного баланса в Барнауле около  $1704 \text{ МДж/м}^2$ . Сумма положительных месячных сумм (приходная часть) радиационного баланса составляет  $1784 \text{ МДж/м}^2$ .

Для расчетов использовались месячные суммы радиационного баланса и изменение температуры почвы для города Барнаула [4].

Расчеты проведены на основе изложенной выше методики с использованием данных по пространственно-временному распределению температуры почвы на глубинах  $0 \div 3,2 \text{ м}$  от поверхности с использованием измерений с помощью вытяжных термометров. На основе опытных данных о среднемесячных температурах на различных глубинах методом наименьших квадратов с использованием формулы (4) получены значения величин  $\Delta T_{\text{гп}0}$ ,  $\varphi_{\text{сп}}$  и  $T_{\text{гп}0}$ . Расчеты величин  $L$ ,  $Q_s$ ,  $Q_v$  проведены с помощью формул (5), (6).

Для условий Барнаула  $Q_0 = 144,9 \text{ МДж/м}^2$ ,  $\eta_s = \frac{144,9}{1784} = 0,08$ . В соответствии с региональными нормами тепловой защиты зданий [5]:

$q_h^{\text{рег}} = 105 \text{ кДж/м}^2 \cdot \text{Cсут}$ ,  $D_d = 6343 \text{ Cсут}$ , принимаем  $\mu = 3$

$$f = \frac{\mu - 1}{\mu} \cdot \frac{q_h^{\text{рег}} D_d}{\eta_s B_+} = \frac{3 - 1}{3} \cdot \frac{0,105 \cdot 6343}{0,08 \cdot 1784} = 3,1.$$

## Grand Altai Council of HEI Chancellors network edition

Таким образом, для отопления рассматриваемого здания (250 м<sup>2</sup>) с помощью теплонасосной системы достаточно низкопотенциального тепла, поступающего с солнечной радиацией на площадь ~ 800 м<sup>2</sup>.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев Г.П. Использование низкопотенциальной тепловой энергии Земли в теплонасосных системах // АВОК. — 2002. — №4. — С. 12–16.
2. Федянин, В.Я., Мещеряков В.А. Инновационные технологии для повышения эффективности Алтайской энергетики : Монография . — Барнаул : Изд-во ААЭП, 2010. — 192 с.
3. СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий.– Взамен СНиП II-3-79; Введ. 10.01.2003.– М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004.– 42 с.
4. Климат Барнаула / под ред. С.Д Кошинского и В.Л. Кухарской — Ленинград : Гидрометеиздат, 1984. — 139 с.
5. ТСН23-3ХХ-2001 АлтК. Энергетическая эффективность жилых и общественных зданий: Нормы проектирования / администрация Алтайского края. — Барнаул, 2001. — 45 с.

### REFERENCES

1. Vasiliev G. P. the Use of low-grade thermal energy of the Earth in heat pump systems // AVOK. — 2002. — No.4.– pp.12-16.
2. Fedyanin, V. I., Meshcheryakov V. A. Innovative technologies to improve the energy efficiency of Altai : Monograph . — Barnaul : Publishing house of AAEP, 2010.–192 p.
3. SNiP 23-02-2003 Thermal protection of buildings.– Instead of SNiP II-3-79; Type. 10.01.2003.– M: Gosstroy of Russia, Federal state unitary enterprise tspp, 2004.– 42 p.
4. The climate of Barnaul / ed. D Kosinskogo and L. V. Kukharsky — Leningrad : Gidrometeoizdat, 1984. — 139 p.
5. TSN-3XX-2001 ALD. The energy efficiency of residential and public buildings: design Norms / administration of the Altai krai. — Barnaul, 2001. — 45 p.