

2. Проталинский О. М., Немчинов Д. В. Система поддержки принятия управленческих решений по снижению рисков аварийных ситуаций на промышленных объектах // Автоматизация в промышленности. 2010. № 3. С. 13–16 с.
3. Соложенцев Е. Д. Сценарное логико-вероятностное управление риском в бизнесе и технике. СПб.: Изд. дом «Бизнес-пресса». 2004. 216 с.
4. Хоменко Т. В. Обобщенная математическая модель формирования критерия оценивания для решения задачи выбора технических решений Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2013. Т. 19. № 2. С. 271–277.
5. Проталинский О. М., Щербатов И. А., Ханова А. А. Адаптивная система прогнозирования надежности технологического оборудования объектов энергетики // Информатика и системы управления. 2019. № 1 (59). С. 93–105.
6. Афанасьев А. Н., Войт Н. Н., Кириллов С. Ю. Автоматизация проектирования потоков работ в промышленном производстве // Автоматизация процессов управления. 2019. № 1 (55). С. 57–65.

© Проталинский О. М., Хоменко Т. В.

**Ссылка для цитирования:**

**Проталинский О. М., Хоменко Т. В.** Типизация процедур автоматизированного проектирования системы оценки показателей аварийных ситуаций сложных технических систем // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2019. № 1 (27). С. 123–129.

УДК 621.311

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ  
ДЛЯ МАЛОЭТАЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА В РЕСПУБЛИКЕ ДАГЕСТАН**

**С. С. Таргачев\*, И. С. Просвирина\*\***

\*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

\*\*Астраханский государственный архитектурно-строительный университет

Выполнен анализ наиболее перспективных возобновляемых источников энергии на характер использования их на территории республики Дагестан. Даны обоснования неэффективности использования ветровых генераторов. Выведены варианты структуры математической модели теплового режима здания. На основе принятой математической модели для теплового режима, выведены математические модели солнечного коллектора и теплового насоса, с учетом их зависимостей. Математическая модель солнечного коллектора получена для приблизительной работы в условиях двух суток августа. Математическая модель теплового насоса дает возможность регулирования работы теплового насоса, тем самым обеспечивая экономичность работы системы с высокой эффективностью.

**Ключевые слова:** математическая модель, тепловая защита здания, ветровой генератор, солнечный коллектор, тепловой насос.

**MATHEMATICAL MODEL OF ALTERNATIVE ENERGY SOURCES  
FOR LOW-RISE CONSTRUCTION IN THE REPUBLIC OF DAGESTAN**

**S. S. Targachev\*, I. S. Prosvirina\*\***

\*Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

\*\*Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering

The analysis of the most promising renewable energy sources on the nature of their use in the Republic of Dagestan. The substantiation of the inefficiency of the use of wind generators is given. The variants of the structure of the mathematical model of the thermal regime of the building are derived. On the basis of the adopted mathematical model for the thermal regime, derived mathematical models of the solar collector and heat pump, taking into account their dependencies. The mathematical model of a solar collector is received for approximate work in the conditions of two days of August. The mathematical model of the heat pump makes it possible to regulate the operation of the heat pump, thereby ensuring the efficiency of the system with high efficiency.

**Keywords:** mathematical model, thermal protection of the building, wind generator, solar collector, heat pump.

В своей предыдущей работе по актуальности использования альтернативных источников энергии для малоэтажного строительства в республике Дагестан [1], мы выяснили, что наиболее перспективными возобновляемыми источниками энергии в данном регионе являются солнечная, ветровая и геотермальная энергетика. Использование ветрогенераторов, солнечных коллекторов, а также тепловых насосов в данном регионе имеет высокую эффективность и потенциал в сфере нетрадиционной энергетики. Так же использование выше перечисленных альтернативных источников энергии на территории республики перспективно с эконо-

мической точки зрения, как утверждают коллеги из “Института социально-экономических исследований ДНЦ РАН” [1].

Однако, прежде чем рассматривать математические модели возобновляемых источников энергии, сузим наш список нетрадиционных источников [1].

Если рассматривать использование альтернативных источников энергии конкретно для малоэтажного строительства, то не рационально рассматривать ветровые генераторы по ряду причин. А именно:

- а) не удобство в установки на территории малоэтажного строительства;
- б) не приспособленность к эксплуатации ветровых генераторов;

в) спорные показатели безопасности данных установок;

Помимо всего прочего, ветрогенераторы преобразуют ветровую энергию в электрическую, после электрическая энергия преобразовывается в тепловую. Следовательно, это ведет к значительному усложнению и повышению цены на эту установку [1].

На основе предыдущих и выше указанных выводов разберем математические модели для солнечных коллекторов и тепловых насосов для малоэтажного строительства. Прежде чем разбирать математические модели этих двух возобновляемых источников энергии, необходимо учесть тепловой режим здания, в частности. То есть совместим математические модели солнечного коллектора и теплового насоса с математической моделью теплового режима здания.

Актуальность или особенность работы заключается в том, что прежде чем разбирать и определять какой источник энергии устанавливать совместно с системами теплоснабжения здания, необходимо определить теплопотери здания [1].

Коллеги из ЮУрГУ исследовали математическую модель теплового режима здания (ТРЗ). В своей работе, оптимизировали ТРЗ на основе анализа его формирования. Данная модель со-

ставлена на основе известных факторов и теплотехнических расчетов, а так же было учтено основное условие – аккумуляирование теплоты зданием [2].

Наиболее часто встречающейся математической модель, составленная на основе теплового баланса – это модель Е. Л. Соколова. В базе, которой определение средней температуры наружной стены здания, как средняя арифметическая между наружной и внутренней температурой воздуха. Это дает нам возможность детальнее принять в расчет распределение температуры по внутренней толщине несущей стены [3].

Используя квазистационарный подход, получаем, что средняя температура наружной стены здания будет равна:

$$\bar{t} = (t_B - t_H) \left( \frac{\delta}{2R\lambda} + \frac{1}{\alpha_H R} \right) + t_H; \quad (1)$$

где  $t_B$  и  $t_H$  – соответственно температура внутреннего и наружного воздуха;

$\delta$  и  $R$  – соответственно толщина и термическое сопротивление теплопередаче наружной стены здания;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала;  $\alpha_H$  – коэффициент теплоотдачи для наружной стены здания.

Уравнение теплового баланса для маленького промежутка времени будет иметь вид:

$$[W_0 - q_0 V(t_B - t_H)] dt = c\rho F \delta \times \left[ \left( \frac{\delta}{2R\lambda} + \frac{1}{\alpha_H R} \right) dt_B - \left( \frac{\delta}{2R\lambda} + \frac{1}{\alpha_H R} \right) dt_H \right]; \quad (2)$$

где  $W_0$  – мощность системы отопления;

$q_0$  – удельная тепловая характеристика здания;  $V$  – его объем;

$F$  – площадь наружной поверхности; плотность материала стен.

Если воспользоваться принятыми в теории обозначениями, то уравнение (2) запишется следующим образом:

$$T_B \frac{dt_B}{dt} + t_B = kW_0 + T_H \frac{dt_H}{dt} + t_H; \quad (3)$$

где  $T_B = \frac{c\rho A\delta}{q_0 V} \left( \frac{\delta}{2R\lambda} + \frac{1}{\alpha_H R} \right)$  – постоянная времени для температуры внутреннего воздуха;

$T_H$  – постоянная времени дифференцирования для температуры наружного воздуха. В рассматриваемом случае при выводе уравнения получается, что  $T_H = T_B$ .

$k = \frac{1}{q_0 V}$  – коэффициент передачи;

В математической модели Е. Л. Соколова константа  $T_B$  – определена как “коэффициент тепловой аккумуляции здания”. Причем соотношение является следующим:

$$T_B = T_1 \left( \frac{\delta}{R\lambda} + \frac{2}{\alpha_H R} \right); \quad (4)$$

где  $T_1 = \frac{c\rho A\delta}{2q_0 V}$  – коэффициент тепловой аккумуляции здания.

Модель (3) описывает нестационарный тепловой режим здания. Поскольку стационарный режим является частным случаем нестационарного режима, то его модель должна содержаться в уравнении (3). [3]

Если положить, что  $t_B = const$  и  $t_H = const$ , то получим уравнение теплового баланса для стационарного режима:

$$q_0 V(t_B - t_H) = W_0; \quad (5)$$

Мощность водяного отопительного прибора, определяется по следующему уравнению:

$$KF\Delta\bar{t} = W; \quad (6)$$

где  $K$  – коэффициент теплоотдачи отопительного прибора;

$F$  – площадь поверхности отопительного прибора;

$\Delta\bar{t}$  – среднее значение температурного напора.

$$\Delta\bar{t} = 0.5(t_{Bx} + t_{B\text{вых}}) - t_B; \quad (7)$$

Подставив (7) в (6), получим математическую модель для мощности отопительного прибора.

$$KF \frac{t_{B\text{вых}} - t_B}{1 + \frac{2cG_m}{KF}} = W; \quad (8)$$

Считая, что температура теплоносителя вдоль поверхности теплообмена распределяется по экспоненте, то получается, математическая модель теплового режима будет иметь вид:



$$T_B \frac{dt_B}{dt} + t_B = T_H \frac{dt_H}{dt} + t_H + k(t_{\text{Вых}} - t_B) c G_m \left[ 1 - \exp\left(\frac{-KF}{c G_m}\right) \right]; \quad (9)$$

Учитывая, что коэффициент теплопередачи отопительного прибора не постоянная величина, а зависит от расхода и среднего значения температурного напора, то:

$$K = m \Delta t^n \bar{G}_{\text{отн}}^p; \quad (10)$$

$$T_B \frac{dt_B}{dt} + t_B = T_H \frac{dt_H}{dt} + t_H + kc G_m \left[ (t_{\text{Вых}} - t_B) - \left(\frac{mn}{Gc} \bar{G}_{\text{отн}}^p F + (t_{\text{Вх}} - t_B)\right) \right]; \quad (11)$$

Выведены варианты структуры математической модели теплового режима здания. Особенностью является принятое во внимание мощность отопительного прибора, а, следовательно, температура теплоносителя и расход.

Полученная модель ТРЗ имеет широкую область применения – в любых системах отопления.

На основе принятой математической модели для теплового режима, можно применить математическую модель солнечного коллектора и теплового насоса, с учетом их зависимостей [3]. Солнечный коллектор – это теплообменник. Теплообменники – смесители представляют собой объекты с сосредоточенными параметрами, гидродинамика которых описывается моделью идеального перемешивания. Основными исходными данными для математического моделирования являются геометрические размеры теплообменника, а также величины, определяющие физические свойства потоков [2].

Теплообмен между двумя потоками теплоносителей происходит только через стенку, поверхность которой  $F_T$ . Объемные расходы теплоносителей и объемы  $V_1$  и  $V_2$  секций перемешивания являются постоянными величинами.

Запишем уравнения теплового баланса секций нестационарного теплообменника:

для первой секции:

$$C_{p1} V_1 \frac{dT_1}{dt} = g_{11} C_{p1} T_{10} - g_{12} C_{p1} T_1 + K F_T (T_1 - T_2); \quad (12)$$

для второй секции:

$$C_{p2} V_2 \frac{dT_2}{dt} = g_{21} C_{p2} T_{20} - g_{22} C_{p2} T_2 + K F_T (T_2 - T_1); \quad (13)$$

$$g_{11} = g_{12} = g_I g_{21} = g_{22} = g_{II} \quad (14)$$

где  $g_i$  – объёмный расход  $i$ -го теплоносителя;  $T_{i0}$  – значение температуры  $i$ -го теплоносителя при его поступлении в теплообменник (в случае

где  $n$ ,  $p$  и  $m$  – эмпирические числовые показатели, зависящие от типа прибора и характера циркуляции в нем воды;

$\Delta t^n$  – текущий температурный напор;

$G$  – относительный расход воды.

Учитывая выше перечисленные зависимости получаем структуру для мат. модели для температурного напора:

трубчатого теплообменника – граничное условие).

$T_i$  – текущее значение температуры  $i$ -го теплоносителя.

$C_p, C_{pi}$  – теплоёмкость единицы объёма смеси и  $i$ -го теплоносителя, соответственно.

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи.

Принимая во внимание уравнение (14), преобразуем систему дифференциальных уравнений (12), (13) к виду, удобному для программирования на АВМ:

$$\frac{dT_1}{dt} = N_{11} T_{10} - N_{11} T_1 + N_{12} (T_2 - T_1), \quad (15)$$

$$\frac{dT_2}{dt} = N_{21} T_{20} - N_{21} T_2 + N_{22} (T_2 - T_1), \quad (16)$$

где

$$N_{11} = \frac{g_I}{V_1} \quad N_{12} = \frac{K F_T}{C_{p1} V_1}$$

$$N_{21} = \frac{g_{II}}{V_2} \quad N_{22} = \frac{K F_T}{C_{p2} V_2}$$

Регулирование осуществляется по температуре  $T_2$  теплоносителя, регулируемая величина – расход  $g_{11}$ .

Теплоноситель 1 (фтортрихлорметан):  $T_{10} = 200$  °С;  $C_{p1} = 0.36$

Теплоноситель 2 (вода):  $T_{20} = 22$  °С;  $C_{p2} = 0.65$  ккал/кг\*град

На основании полученных выражений была смоделирована работа солнечного коллектора в условиях двух среднестатистических суток августа. Принят бак объёмом 100 л, который теплоизолирован. Циркуляция воды в контуре «солнечный коллектор-бак» – естественная или принудительная.

На рис. 1 представлены результаты математического моделирования.

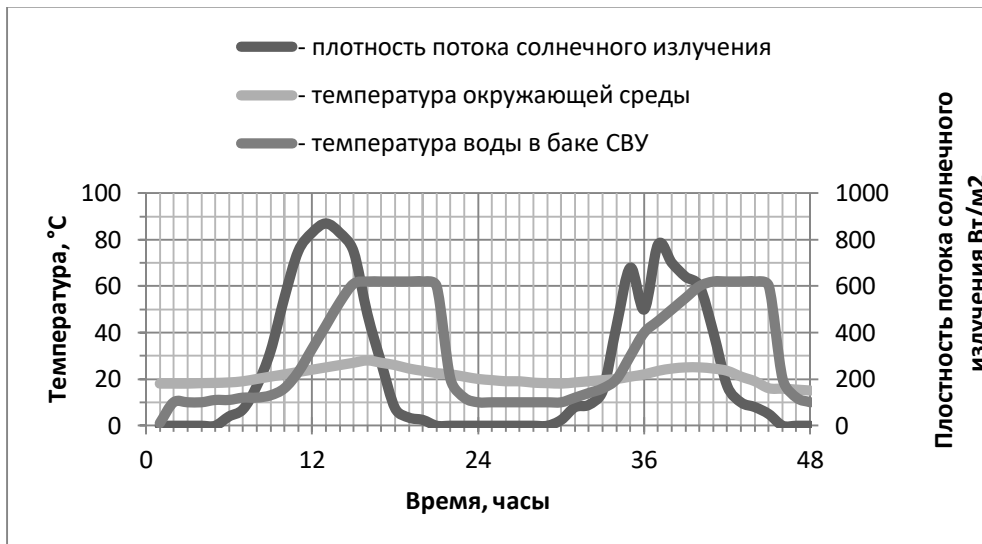


Рис. 1. Результаты математического моделирования

Из рисунка видно, что при максимальной температуре окружающей среды наблюдаются резкое увеличение плотности потока солнечного излучения и, как следствие, и температуры воды в баке СВУ через 12 и 36 часов.

Перспективной технологией использования геотермальной энергии является технология – тепловых насосов. Данная установка связана с системой сбора низкопотенциального тепла; источниками низкопотенциального тепла являются грунт, геотермальные воды. Для повышения эффективности работы теплового насоса необходимо использовать его максимальные возможности для получения тепла и холода. Для этого разработали математическую модель процесса работы данной установки для одновременного нагрева и охлаждения теплоносителей в виде динамической системы. Принцип работы теплового насоса напоминает работу холодильника “наоборот”, то есть тепловой насос работает по циклу Карно в обратную сторону [4].

Система уравнения математической модели состоит из пяти уравнений. А именно из основного уравнения энергетического баланса, уравнений термодинамики, уравнений для определения коэффициентов преобразования холода и тепла. Основными параметрами математической модели таких установок коэффициенты преобразования тепла и холода, так как они являются показателями эффективности работы тепловых насосов.

$$q_2 = q_1 + N; \quad (17)$$

$$q_1 = G_{x1} c_{x1} (t_{y1} - t_{x1}); \quad (18)$$

$$q_2 = G_{x2} c_{x2} (t_{y2} - t_{x2}); \quad (19)$$

$$\eta_T = h q_1 / N; \quad (20)$$

$$\eta_x = h q_2 / N; \quad (21)$$

где  $\eta_T$  и  $\eta_x$  – коэффициенты преобразования тепла и холода;  
N – мощность.

В результате решения уравнений получаем формулы для определения коэффициентов преобразования.

$$\eta_x = G_{x1} (t_{y1} - t_{x1}) / [G_{x2} c_{x2} (t_{y2} - t_{x2}) - G_{x1} (t_{y1} - t_{x1})] \quad (22)$$

$$\eta_T = G_{x2} (t_{y2} - t_{x2}) / [G_{x2} c_{x2} (t_{y2} - t_{x2}) - G_{x1} (t_{y1} - t_{x1})] \quad (23)$$

Исходя из того, что тепловой насос работает по циклу Карно, коэффициенты преобразования зависят от разницы температур нагреваемого и геотермального теплоносителей, то есть от температуры грунта ниже глубины промерзания.

Следовательно, получаем зависимость:

$$\eta_x = h T_1 / (T_2 - T_1); \quad (24)$$

$$\eta_T = h T_2 / (T_2 - T_1); \quad (25)$$

$$\eta_x \text{ и } \eta_T \rightarrow \max$$

Чем меньше разница температур между нагреваемым и геотермальным теплоносителем ( $T_2 - T_1$ ), тем соответственно больше коэффициенты преобразования, а значит выше эффективность работы теплового насоса при небольшой разнице температур между источниками и потребителем тепла [4].

А зная нагрузку на здания из математической модели теплового режима здания, возможно будет регулировать работу теплового насоса, тем самым обеспечить экономичность работы системы с высокой эффективностью [4].

Таким образом, полученные математические модели в дальнейшем позволят определять параметры работы системы отопления малоэтажного строительства, использующих солнечные коллекторы и тепловые насосы как возобновляемые источники энергии.

#### Список литературы

1. Просвирина И. С., Таргачёв С. С. Актуальность использования альтернативных источников энергии для малоэтажного строительства для республики Дагестан // Сборник СПбГАСУ. 2019.
2. Кряклина И. В. Разработка математической модели солнечного коллектора для теплоснабжения дома фермера // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве : сборник 2012. 310 с.
3. Панферов В. И., Анисимова Е. Ю., Нагорная А. Н. К теории математического моделирования теплового режима зданий // Вестник ЮУрГУ. 2006. № 14.
4. Кряклина И. В. Математическая модель и оптимизация параметров работы теплового насоса // SCIENCE PROSPECTS. 2014. № 3 (54)

© Таргачев С. С., Просвирина И. С.

#### Ссылка для цитирования:

Таргачев С. С., Просвирина И. С. Математические модели альтернативных источников энергии для малоэтажного строительства в Республике Дагестан // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2018. № 1 (27). С. 129-133.