

УДК 620.91 (925.16)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ НАСОСАМИ ЗДАНИЙ НА ПОБЕРЕЖЬЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ



А.В. Еделев

*Институт систем энергетики
им. Л. А. Мелентьева СО РАН
г. Иркутск, Российская Федерация
e-mail: flower@isem.irk.ru*

A. V. Edelev

*Institute of Energy Systems
named after L. A. Melentjeva of SBS RAN
Irkutsk, Russian Federation
e-mail: flower@isem.irk.ru*



В. И. Зоркальцев

*Лимнологический институт СО РАН
Институт систем энергетики
им. Л. А. Мелентьева СО РАН
Байкальский государственный университет
г. Иркутск, Российская Федерация
e-mail: vizork@ mail.ru*

V. I. Zorkaltsev

*Lymphnological Institute of SBS RAN
Institute of Energy Systems
named after L. A. Melentjeva of SBS RAN
Baikal State University
Irkutsk, Russian Federation
e-mail: vizork@ mail.ru*



А. Ю. Маринченко

*Институт систем энергетики
им. Л. А. Мелентьева СО РАН
г. Иркутск, Российская Федерация
e-mail: marinchenko@isem.irk.ru*

A. Y. Marinchenko

*Institute of Energy Systems
named after L. A. Melentjeva of SBS RAN
Irkutsk, Russian Federation
e-mail: marinchenko@isem.irk.ru*

Аннотация. Излагается методика расчета экономической эффективности теплоснабжения зданий и сооружений на побережье озера Байкал тепловыми насосами, использующими в качестве источника теплоэнергии байкальскую воду. Методика основывается на вычислении математического ожидания приведенных затрат на основе имитационного моделирования процессов теплоснабжения в течение года. В качестве критерия для сравнения вариантов предлагается использовать минимизацию математического ожидания приведенных затрат. В излагаемой методике учитываются сезонные, суточные и случайные колебания потребности в теплоэнергии в зависимости от изменений температуры наружного воздуха.

Ключевые слова: тепловые насосы, побережье Байкала, теплоснабжение баз отдыха, приведенные затраты, температура воздуха.

Информация о статье. Дата поступления: 27 апреля 2020 г.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФИ № 19-07-00322 и в рамках проекта РАН № 0279-2019-0003. Алгоритм расчета математического ожидания приведенных затрат разработан при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-47-380002-p_a.

SIMULATION OF HEAT PUMP SUPPLY TO BUILDINGS ON THE SHORES OF LAKE BAIKAL

Annotation. The study describes the method for calculating economic efficiency of heating of buildings and structures on the shores of Lake Baikal with heat pumps using Baikal water as a source of heat energy. The method is based on calculation of the distribution mean of the above costs on the basis of simulation modelling of heat supply processes during the year. It is proposed to use distribution mean of the given costs as a criterion for comparing the variants. The method described takes into account seasonal, daily and random variations in heat demand as a function of changes in open air.

Keywords: heat pumps, Baikal coast, heating of recreation camps, present costs, air temperature.

Article info. Received 27 April, 2020.

Acknowledgements. The research was carried out with the financial support of the RFBR Fund 19-07-00322 and within the framework of the project RAS 0279-2019-0003. The algorithm for calculating the mathematical expectation of the above costs was developed with the financial support of the Government of Irkutsk region within the framework of the scientific project 20-47-380002-p_a.

Введение

Одной из проблем в развитии туризма и отдыха на Байкале является теплоснабжение зданий и сооружений. В силу суровых климатических условий необходимо нести большие затраты на теплоснабжение не только в зимний, но даже и в летний период.

Использование для этих целей котельных и печей на угле требует для многих районов побережья озера повышенных затрат в силу удаленности от транспортных магистралей. При этом возникают большие экологические проблемы в использовании угольных котельных и печей на побережье озера. Очистка от сажи, окислов углерода, серы и от других вредных выбросов котельных и печей малой мощности технически затруднена и ведет к большому удорожанию.

В качестве потенциально эффективных по экономическим и экологическим условиям источников теплообеспечения населенных пунктов и баз отдыха на побережье озера Байкал могут рассматриваться древесина, выращиваемая на специально создаваемых энергетических плантациях [1], а также, в некоторых районах побережья озера Байкал, использование природного газа. К сожалению, оба эти экологически приемлемые вида топлива пока не нашли должного применения. Требуется значительное время и специальные разработки по формированию условий для этого.

В настоящее время для целей энергообеспечения баз отдыха на побережье Байкала широко используется электрообогрев. Такой способ энергообеспечения имеет большие экологические и технологические преимущества. Его недостаток — дороговизна.

Особый интерес для теплоснабжения зданий на побережье представляют тепловые насосы [2], использующую энергию воды Байкала. Даже зимой вода подо льдом Байкал имеет положительную температуру, около 4°C . Охлаждение в тепловом насосе до 2°C , когда вода еще находится в жидком состоянии, позволяет получать около 2-х калорий с каждого литра пропускаемой через тепловой насос байкальской воды. Большой опыт использования тепловых насосов на байкальской воде накоплен в Байкальском музее. По оценкам работников музея переход на теплоснабжение сократил примерно в 6 раз затраты на теплоснабжение здания Музея. Конечно, такой колоссальный эффект был достигнут прежде всего из-за существовавшей ранее очень затратной системы теплоснабжения от котельной соседнего предприятия (санатория Байкал), работавшей на топочном мазуте. Значительного эффекта (удешевления теплоснабжения в 2–3 раза) можно было ожидать при переходе просто на электроотопление здания при существующих в иркутской области тарифах на электроэнергию. Вместе с тем, и по сравнению с электроотоплением применение тепловых насосов в Байкальском музее дает существенный эффект. По имеющимся расчетным оценкам это ведет к сокращению затрат на отопление также примерно в 2–3 раза.

Представленные оценки нуждаются в уточнении с учетом реально существующих сезонных, суточных и случайных колебаний, теплотребления, диктующих необходимость использования переменных режимов в работе системы теплоснабжения. Для активного использования тепловых насосов на основе воды Байкала для теплоснабжения зданий необходима методика расчета их экономической эффективности. Данная статья посвящена изложению такой методики, проходящей в настоящее время численную апробацию. На основе данной методики предполагается также решение задач оптимизации состава и параметров оборудования, режимов его эксплуатации. Учет действия случайных факторов в рассматриваемой методике осуществляется организацией расчетов математического ожидания приведенных затрат при разных вариантах теплоснабжения. Математическое ожидание рассчитывается на основе многократной имитации функционирования системы теплоснабжения здания в формируемых случайным образом (методом Монте-Карло, называемого также методом статистических испытаний) изменяющихся в течение года и суток внешних условий (температуры наружного воздуха). Излагаемая здесь методика является конкретизацией для тепловых насосов методического подхода к оптимизации и оценки эффективности систем энергообеспечения потребителей на побережье озера Байкал изложенного в работах [3–6].

Принципиальная схема работы теплового насоса

Теоретическое обоснование устройств, которые ныне называются тепловыми насосами дал в 1824 году С. Карно. Первая работающая модель этого устройства была создана в 1852 году У. Томпсоном (более известным как лорд Кельвин), который и ввел в обиход этот термин. Тепловой насос — это устройство, которое забирает теплоэнергию от низкопотенциального (низкотемпературного) источника (охлаждает поток вещества в этом источнике) и передает эту энергию потребителю с повышенной температурой [2]. Тепловой насос для отопления зданий на основе байкальской воды включает три контура (см. рис. 1) [7].

Первый контур — поток вещества с низкопотенциальной энергией. В нашем случае это вода Байкала. В результате прохождения воды через теплообменник со вторым контуром ее температура понижается. Чтобы вода не замерзала, могла циркулировать ее температура после прохождения теплообменника не должна быть меньше 0°C . Для надежности, понижение температуры должно осуществляться до температуры примерно в 2°C .

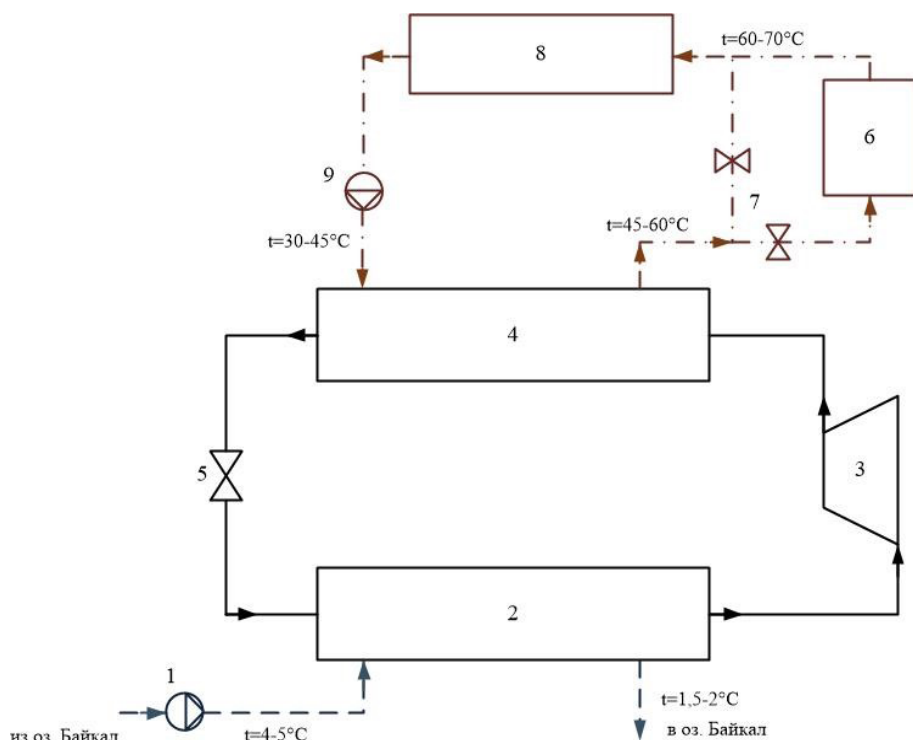


Рис. 1. Принципиальная схема системы отопления на основе теплового насоса: 1 — насосная станция; 2 — испаритель; 3 — поршневой компрессор с электроприводом; 4 — конденсатор; 5 — терморегулирующий вентиль; 6 — электродкотел; 7 — регулирующие водяные вентили; 8 — отопительные приборы; 9 — циркуляционный насос системы отопления

Второй контур составляет собственно тепловой насос, в котором циркулирует хладагент. Этот хладагент испаряется в камере с низким давлением и низкой температурой, являющейся теплообменником с первым контуром. Здесь осуществляется передача энергии от байкальской воды к хладагенту. Затем температура хладагента повышается в результате повышения давления компрессором. После чего во втором теплообменнике осуществляется передача энергии от хладагента в третий контур в процессе конденсации. При этом может осуществляться нагрев воды в третьем контуре до 50–70 °С. После теплообменника-конденсатора хладагент проходит через дроссель понижающие давление и соответственно температуру этого хладагента в целях последующего забора энергии от низкопотенциальных вод Байкала.

Третий контур — собственно система теплоснабжения здания. Нагретая в теплообменнике вода поступает в систему отопления здания, где охлаждается и опять идет на подогрев в теплообменник-конденсатор теплового насоса.

При необходимости в электрокотле осуществляется дополнительный подогрев сетевой воды.

Отметим, что для перекачки жидкости во всех трех контурах используются электрические двигатели. Расходуемая ими энергия, денежные затраты на нее, составляет основную часть затрат на теплоснабжение. Причем вся электроэнергия второго и третьего контура (потраченная на преодоление трения) и отчасти первого контура входит в суммарную величину энергии идущей на отопление здания.

Одним из простейших способов оценки эффективности теплового насоса является сопоставление объемов расхода электроэнергии при производстве теплоэнергии в тех же объемах только электрообогревателями (и электрокотлами) и с использованием тепловых насосов. По имеющимся оценкам применение теплового насоса требует примерно в 3 раза меньше электроэнергии, что свидетельствует о потенциальной экономической эффективности такого способа теплоснабжения. Конечно, эта оценка не учитывает, что применение тепловых насосов является более капиталоемким мероприятием, эффективность которого существенно зависит от режимов теплоснабжения. Потребность в теплоэнергии изменяется по сезонам года, внутри суток. Возможны различного рода случайные отклонения, что ведет к необходимости использования переменных режимов выработки тепловыми насосами теплоэнергии, необходимости резервирования и покрытия пиковых нагрузок иными источниками теплоснабжения.

Необходимо также отметить, что имеются также большие возможности повышения эффективности применения тепловых насосов за счет понижения температуры хладагента перед первым теплообменником при увеличении потока байкальской воды, в том числе путем использования непосредственного нагрева хладагента в озера Бакал или в реке Ангара с использованием естественной или принудительной циркуляции воды. Существенные возможности повышения эффективности имеются также за счет оптимизации состава используемого оборудования и режимов его работы. Эту оптимизацию можно осуществлять на основе излагаемой далее методике расчета математического ожидания затрат на теплоснабжение на базе использования имитационного моделирования функционирования системы теплоснабжения.

Описание динамики потребности в теплоэнергии базы отдыха по часам года

Предлагаемая методика анализа и оптимизации эффективности теплоснабжения зданий на побережье озера Байкал на базе тепловых насосов является конкретизацией ранее высказанных положений об использовании для этих и аналогичных целей имитационного моделирования [2].

Этот подход использует многократную имитацию функционирования объектов и систем при возможных периодических и случайных изменениях условий, формируемых методом Монте-Карло. Для исследования процессов теплоснабжения объектов такая имитация должна охватывать период в один год с учетом изменений условий в течение каждого часа. Исходной информацией для имитации должно стать описание возможных регулярных и случайных изменений потребностей в теплоэнергии.

Предположения. Считаем что:

- 1) продолжительность года составляет 8760 часов (ровно 365 суток);
- 2) нумерация $t = 1, \dots, 8760$ соответствует номерам часов года, начинающегося ($= 1$) в 1 час ночи 1 января;
- 3) в летний период \check{t} с часов по \hat{t} часов в связи с потеплением и необходимостью проведения профилактических и ремонтных работ тепловые насосы не используются (например, с конца мая $t = 3360$ по конец июля $t = 5800$).

Считаем также, что потребность в теплоэнергии базы отдыха Q_t в час года t состоит из потребности в теплоэнергии на нужды отопления Q_t^1 и потребности Q_t^2 в теплоэнергии на горячее водоснабжение (в т.ч. на санитарно-гигиенические нужды, пищуприготовление)

$$Q_t = Q_t^1 + Q_t^2. \quad (1)$$

В первом приближении можем считать, что потребность в теплоэнергии на нужды горячего водоснабжения неизменна во времени

$$Q_t^2 = \bar{Q}, \quad (2)$$

где \bar{Q} — средний уровень часовой потребности на горячее водоснабжение. В дальнейшем следует учитывать сезонные и суточные колебания этой потребности, возможности ее регулирования за счет накопления горячей воды в периоды избытка мощности теплового насоса.

Потребность в теплоэнергии на цели теплоснабжения считаем пропорциональной разности желаемой (комфортной, нормативной) температуры внутри здания и температурой наружного воздуха в данный час

$$Q_t^1 = k(T_N - T_t), \quad (3)$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от состава отапливаемых помещений и теплоизоляции зданий. Будем считать, что температура внутри здания равна 20°C , т.е. $T_N = 20$.

При задании данных о температуре наружного воздуха можно воспользоваться двумя вариантами действий.

1. Использовать имеющиеся данные о температурах воздуха по часам года (за один или лучше за несколько лет) полученные из метеонаблюдений для данной территории.

2. Использовать расчетные величины T_t , базирующиеся на представлении почасовых изменений температур в виде взаимодействия трех составляющих:

- 1) сезонных колебаний температур S_t ;
- 2) среднесуточных отклонений температур Z_t ;
- 3) случайные отклонения ε_t .

При аддитивном характере взаимодействия указанных составляющих

$$T_t = S_t + Z_t + \varepsilon_t + T_0, \quad (4)$$

где T_0 — среднегодовая температура. Например, для побережья Малого моря можно принять $T_0 = -1^\circ\text{C}$. Сезонные колебания в первом приближении можно представить в виде тригонометрической функции

$$S_t = -\frac{a}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{8760}(t - 24d)\right). \quad (5)$$

Здесь a — амплитуда сезонных колебаний, выраженная в градусах цельсия. Например, можно считать $a = 40^\circ\text{C}$. Число d соответствует дню статистически самой низкой зимней температуры. Например, можно принять $d = 15$, что соответствует предположению, что в среднем пик зимнего похолодания приходится на 15 января.

Суточные отклонения можно также представить в виде строго тригонометрической функции:

$$Z_t = \frac{b}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{24}(t - r)\right). \quad (6)$$

Здесь величина b соответствует амплитуде среднесуточных отклонений от температур, выраженных в градусах Цельсия. Например, можем принять $b = 20^\circ\text{C}$. Величина соответствует часу дня, который можем считать наиболее теплым. Например, если это 2 часа дня, то $r = 14$.

Значение ε_t характеризует случайные относительные отклонения от произведения сезонных и среднесуточных отклонений. Эта величина формируется случайным образом из некоторого отрезка $[\underline{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}]$ при

$$\underline{\varepsilon} < 0 < \bar{\varepsilon}. \quad (7)$$

Выбор ε_t осуществляется на базе метода Монте-Карло по заданному закону вероятности с учетом наличия положительной автокорреляционных связей отклонений температур для соседних часов.

Например, можно воспользоваться таким алгоритмом. Зададим значение максимального случайного отклонения $c > 0$. В частности можем считать $c = 15$. Пусть

$$\bar{\varepsilon} = c, \underline{\varepsilon} = -c,$$

Можем считать, что

$$\varepsilon_0 = 0$$

Пусть

$$\varepsilon_t = \alpha \rho_t + (1 - \alpha) \varepsilon_{t-1}, \quad t = 1, \dots, 8760$$

где α — заданная величина из интервала $(0,1)$. Например, можно положить $\alpha = 0,5$. Значение ρ_t выбираем случайным образом из интервала $[\underline{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}]$. Можем считать плотность вероятности реализации случайной величины ρ_t на данном интервале постоянной.

Алгоритм расчета математического ожидания приведенных затрат

В рассматриваемой здесь постановке задачи анализа и оптимизации эффективности теплоснабжения баз отдыха на Байкале требуется обеспечивать заданную потребность в теплоэнергии (формируемую с учетом действия случайных факторов) с минимальными затратами. В принципе можно рассматривать постановки, в которых учитывается влияние затрат на объемы потребности. Например, в холодные периоды года можно вводить повышенную стоимость проживания на турбазе, что будет вести к снижению количества желающих проживать на ней и к снижению потребности в теплоэнергии. В излагаемой далее методике такого типа обратные связи не учитываются.

В качестве критерия для сопоставления вариантов энергообеспечения здания (базы отдыха) предлагается использовать минимизацию математического ожидания приведенных затрат. Этот показатель вычисляется по формуле

$$S = EK + \bar{C}, \quad (8)$$

где K — капитальные вложения (руб.), инвестиции, которые необходимо сделать для функционирования рассматриваемого варианта теплоснабжения, E — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений (1/год), \bar{C} — математическое ожидание годовых текущих издержек (руб./год). Нормативный коэффициент эффективности предназначен для соизмерения в единый по размерности показатель разовых инвестиций и ежегодных текущих затрат. Он имеет несколько интерпретаций. Одна из них — проценты за кредит, если считать, что капиталовложения делаются за счет заемных средств. Обратную к E величину можно также интерпретировать как расчетный срок окупаемости капиталовложений. Так значению $E = 0.12$ соответствует срок окупаемости 8 лет.

Величину математического ожидания текущих издержек предлагается рассчитывать на основе многократной имитации функционирования рассматриваемой системы теплоснабжения по правилу

$$\bar{C} = \frac{1}{T} \sum_{\tau=1}^T C_{\tau} + D, \quad (9)$$

где C_{τ} — переменная составляющая годовых издержек, зависящая от реализации в данном году потребностей в теплоэнергии Q_{τ}^r . Здесь τ — номер имитации годового функционирования системы теплоснабжения, T — количество осуществляемых имитаций. Для достижения устойчивых результатов предлагается использовать значение примерно равным 50000.

Величина D обозначает постоянные, не зависящие от случайных реализаций потребностей, текущие издержки. Например, на содержание обслуживающего персонала, затраты на регулярные ремонтно-профилактические работы.

Расчет переменных текущих издержек. Он базируется на реализации с использованием метода Монте-Карло потребностей в теплоэнергии Q_{τ}^r по часам $t = 1, \dots, 8760$ года и $\tau = 1, \dots, T$. Считается заданной мощность теплового насоса \bar{R} — величина максимальной тепловой энергии, которая может быть получена от его работы в течение часа. Эта мощность, как и другие параметры могут варьироваться при решении задачи выбора оптимального состава оборудования. Когда состав оборудования задан (именно для таких условий излагается здесь методика расчета математического ожидания затрат), то считается заданной и величина \bar{R} .

Для каждого часа рассчитывается величина теплоэнергии вырабатываемая тепловым насосом по правилу

$$R_{\tau}^r = \min\{Q_{\tau}^r, \bar{R}\}. \quad (10)$$

Здесь \bar{R} — мощность теплового насоса, максимальный объем теплоэнергии, который может им вырабатываться за час.

На основе построенных ранее характеристик определяется потребность теплового насоса в электроэнергии в данном часу

$$R_{\tau}^e = f(R_{\tau}^r). \quad (11)$$

Здесь f — зависимость потребляемой тепловым насосом электроэнергии от вырабатываемой им теплоэнергии за час. Функция f в простейшей форме может иметь следующий вид [8]

$$R_{\tau}^e = \frac{R_{\tau}^r}{c}, \quad (12)$$

где c — коэффициент производительности теплового насоса, указанный его изготовителем в документации. Однако часто изготовитель приводит коэффициент производительности только самого блока теплового насоса, а не всей системы в сборе.

Функция f может быть также приближённо определена исходя из цикла Карно [8]

$$R_i^r = \frac{R_i^r q (T_H - T_A)}{T_H}, \quad (13)$$

где T_H — температура на выходе теплового насоса, измеряемая в К, T_A — температура на входе теплового насоса, измеряемая в К. Коэффициент q , отражающий тепловые, механические и электрические потери в тепловом насосе, можно принять равным 2.

Если мощность теплового насоса не достаточна для покрытия всей потребности, то используется электрообогрев. Объем требуемой в данном часу электроэнергии на электрообогрев рассчитывается по формуле

$$N_i^r = h(Q_i^r - R_i^r), \quad (14)$$

где h — коэффициент перевода тепловой энергии в электрическую.

Суммарный расход электроэнергии в данном часу определяется по правилу

$$\Xi_i^r = P_i^r + N_i^r \quad (15)$$

Пусть p цена единицы электроэнергии. Затраты на электроэнергию для теплоснабжения в данном часу определяются по формуле

$$V_i^r = p \Xi_i^r \quad (16)$$

Суммируя по всем дням рассматриваемого года получаем значение

$$C_T = \sum_{\tau=1}^T V_i^r. \quad (17)$$

Отметим, что в периоды проведения ремонтно-профилактических работ тепловой насос не используется. В этот период теплоснабжение осуществляется только за счет электрообогрева.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губий Е. В. Эффективность энергетических плантаций / Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев. — Новосибирск: Наука, 2018. — 96 с.
2. Рей Д. Тепловые насосы / Д. Рей, Д. Макмайл; пер. с англ. — Москва: Энергоиздат, 1982. — 224 с.
3. Зоркальцев В. И. Анализ экономической эффективности природосберегающих технологий / В. И. Зоркальцев, Е. В. Губий // System analysis & mathematical modeling. — 2020. — Т. 2, № 1. — С. 15–21.
4. Зоркальцев В. И. Методика оценки эффективности инфраструктурных экологических технологий для побережья озера Байкал / В. И. Зоркальцев, Е. В. Губий // Актуальные вопросы аграрной науки. — 2020. — № 34. — С. 67–78.

5. Gubiy E. The Markov Chain of Energy Carryover Reserves in Models of Power Supply Reliability in Remote / E. Gubiy // *Energy Systems Research 2019: International Conference of Young Scientists*. — Paris, 2019. — Vol. 114. — P. 03004.

6. Губий Е. В. Марковская последовательность переходящих запасов топлива / Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев // *Научный вестник НГТУ*. — 2019. — № 1. — С. 181–196.

7. Тепловые насосы для теплоснабжения в рекреационных зонах / С. Л. Елистратов, В. Е. Накоряков, А. М. Клер, А. Ю. Маринченко // *Исследования и разработки СО РАН в области энергоэффективных технологий* / под ред. С. В. Алексеенко. — Новосибирск, 2009. — С. 184–193.

8. Bonin J. *Heat pump planning handbook* / J. Bonin. — New York: Routledge, 2015. — 326 p.

REFERENCES

1. Gubiy E.V., Zorkaltsev V. I. *Effektivnost' energeticheskikh plantatsii* [Efficiency of Energy Plantations]. Novosibirsk, Nauka, 2018. 96 p.

2. Reay D., Macmichael D. *Heat pumps*. Oxford, 1979. (Russ. ed.: Reay D., Macmichael D. *Teplovye nasosy*. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 224 p.).

3. Zorkaltsev V.I., Gubiy E. V. Analysis of economic efficiency of sustainable technologies. *System analysis & mathematical modeling*, 2020, vol. 2, no. 1, pp. 15–21. (In Russian).

4. Zorkaltsev V.I., Gubiy E. V. Methodology for Estimating the Effectiveness of Infrastructure Ecological Technologies for the Lake Baikal Coast. *Aktual'nye voprosy agrarnoi nauki = Actual issues of agrarian science*, 2020, no. 34, pp. 67–78. (In Russian).

5. Gubiy E. The Markov Chain of Energy Carryover Reserves in Models of Power Supply Reliability in Remote. *Energy Systems Research 2019. International Conference of Young Scientists*. Paris, 2019, vol. 114, pp. 03004.

6. Gubiy E.V., Zorkaltsev V. I. Markov sequence of carryover fuel resources. *Nauchnyi vestnik NGTU = Scientific Bulletin of NSTU*, 2019, no. 1, pp. 181–196. (In Russian).

7. Elistratov S.L., Nakoryakov V. E., Kler A. M., Marinchenko A. Yu. Тепловые насосы для теплоснабжения в рекреационных зонах. Heat pumps for heating in recreational zones. In Alekseenko S. V. (ed.). *Issledovaniya i razrabotki SO RAN v oblasti energoeffektivnykh tekhnologii* [Research and development of Siberian branch of the Russian academy of sciences in the field of energy efficient technologies]. Novosibirsk, 2009, pp. 184–193. (In Russian).

8. Bonin J. *Heat pump planning handbook*. New York, Routledge, 2015. 326 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алексей Владимирович Еделев — кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории живучести систем энергетики, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения РАН, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: flower@isem.irk.ru.

Валерий Иванович Зоркальцев — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории междисциплинарных эколого-экономических исследований и технологий, Лимнологический институт СО РАН, профессиональный консультант, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: vizork@mail.ru.

Андрей Юрьевич Маринченко — кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории теплоэнергетических систем, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: marinchenko@isem.irk.ru.

AUTHORS INFORMATION

Aleksey V. Edelev — PhD in Technical Sciences, Senior Researcher of the Survivability Laboratory of Energy Systems, Institute of Energy Systems named after L. A. Melentjeva of Siberian branch of RAS, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: flower@isem.irk.ru.

Valery I. Zorkaltsev — Dr. hab. in Technical Sciences, Leading Researcher at the Laboratory of Interdisciplinary Environmental-Economic Research and Technology, Limnological Institute of SO RAS, Professional Consultant, Baikal State University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: vizork@mail.ru.

Andrey Y. Marinchenko — PhD in Technical Sciences, researcher at the Laboratory of Heat and Power Systems, Institute of Energy Systems of Russian Federation named after L. A. Melentjeva SO RAN, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: marinchenko@isem.irk.ru.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Еделев А. В., Зоркальцев В. И., Маринченко А. Ю. Моделирование процесса теплоснабжения тепловыми насосами зданий на побережье озера байкал / А. В. Еделев, А. Ю. Маринченко, В. И. Зоркальцев // System Analysis & Mathematical Modeling. — 2020. — Т. 2, № 2. — С. 5–17.

FOR CITATION

Edelev A. V., Zorkaltsev V. I., Marinchenko A. Y. Simulation of heat pump supply to buildings on the shores of lake baikal. System Analysis & Mathematical Modeling, 2020, vol. 2, no. 2, pp. 5–17. (In Russian).