

УДК 697.9

## К ВОПРОСУ РАЗВИТИЯ ЖИЛИЩНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА С МИНИМАЛЬНЫМ ПОТРЕБЛЕНИЕМ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

Акад. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. ХРУСТАЛЕВ Б. М.<sup>1)</sup>,  
докт. техн. наук, проф. ПИЛИПЕНКО В. М.<sup>2)</sup>,  
кандидаты техн. наук ДАНИЛЕВСКИЙ Л. Н.<sup>2)</sup>, НГУЕН ТХУ НГА<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет,

<sup>2)</sup>ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.»,

<sup>3)</sup>Научный энергетический институт Вьетнамской академии наук и технологий

E-mail: rector@bntu.by

В статье выполнен анализ энергоэффективных решений систем горячего водоснабжения (ГВС) для зданий г. Минска, обеспечивающих значительное снижение энергии по сравнению с существующим уровнем. В качестве технических средств, позволяющих использовать солнечную энергию и вторичные источники теплоты, рассматриваются системы с утилизацией теплоты «серых» сточных вод, солнечные коллекторы, фотоэлектрические преобразователи, тепловые насосы.

Анализ показывает, что экономически эффективно применение утилизаторов теплоты сточных вод, преимущество которых по сравнению с системой солнечных коллекторов – в круглогодичном использовании. Второй вариант – комбинация утилизатора теплоты сточных вод и солнечного коллектора – увеличивает экономию энергии, однако растут и капитальные затраты. Третий вариант обеспечивает полное покрытие затрат теплоты на ГВС. Следует обратить внимание на то, что затраты в первых двух вариантах близки к необходимым, в то время как показатели в третьем варианте могут существенно превышать нормативные данные.

Приведен аналитический материал белорусских и вьетнамских исследователей, которые принимали активное участие в реализации совместного белорусско-вьетнамского проекта «Использование возобновляемых источников энергии в физико-математической модели теплового режима энергоэффективного жилого здания» (код проекта VAST. HTQT. Belarus. 03/2012–2013).

**Ключевые слова:** энергоэффективные здания, источники энергии, сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций, инженерно-техническое оборудование.

Ил. 6. Табл. 9. Библиогр.: 21 назв.

**ON PROBLEM IN DEVELOPMENT  
OF HOUSE BUILDING CONSTRUCTION  
WITH MINIMUM POWER RESOURCES CONSUMPTION**

**KHROUSTALEV B. M.<sup>1)</sup>, PILIPENKO V. M.<sup>2)</sup>, DANILEVSKY L. N.<sup>2)</sup>,  
NGUYEN THUY NGA<sup>3)</sup>**

<sup>1)</sup>*Belarusian National Technical University,*

<sup>2)</sup>*Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S.,*

<sup>3)</sup>*Institute of Energy Science, Vietnam Academy of Science and Technology*

The paper presents an analysis of several variants of energy-efficient solutions for hot water supply systems in Minsk buildings that ensure significant reduction of energy for hot water supply in comparison with the existing level. The different systems have been considered as technical facilities for usage of solar energy and secondary heat sources and which are based on heat recovery of "grey" waste water, solar collector, photoelectric transducer, heat pump.

Comparative analysis of the considered variants shows economic efficiency of waste water heat utilizers. An advantage of such system is in its all-year round usage in comparison with a solar collector. The second variant that is a combination of waste water heat utilizer and a solar collector that increases energy saving but it requires the increase of capital expenses. The third variant completely covers expenses of heat energy which is necessary for hot water supply. It is necessary to attract attention to the fact that expenses in the first two variants are close to the required ones but values of the third variant may significantly exceed the reliable level.

The paper contains analytical material of Belarusian and Vietnamese researchers who were actively involved in implementation of the joint Belarusian-Vietnamese project "Usage of Renewable Power Sources in Physical-Mathematical Model of Heat Regime of Energy-Efficient House" (Project code: VAST. HTQT. Belarus. 03/2012–2013).

**Keywords:** energy-efficient buildings, renewable and recurrent power sources, heat transfer resistance of enclosure structures, engineering and technical equipment.

Fig. 6. Tab. 9. Ref.: 21 titles.

**Введение.** Экономические затраты на отопление и горячее водоснабжение в некоторых странах достигают 35 % от общего объема энергопотребления. Результаты исследований, обеспечивающих снижение энергопотребления жилищного фонда, – проекты так называемых пассивных жилых домов, энергопотребление на отопление которых не превышает 15 кВт·ч/м<sup>2</sup> в год (Западная Европа), энергоэффективных жилых домов с энергопотреблением на отопление не более 30 кВт·ч/м<sup>2</sup> в год (Германия, Беларусь) и др.

В Республике Беларусь результатом исследования в области энергосбережения отопляемых объектов является создание энергосберегающих систем жизнеобеспечения зданий, проектов энергоэффективных жилых домов, систем тепловой модернизации зданий, комплекса нормативно-технических документов и пр. При этом стационарный рост потребления и стоимости энергоресурсов требует поиска решения в создании жилых домов, широко использующих для энергоснабжения систем жизнеобеспечения возобновляемые и возобновляющиеся источники энергии (солнечной и энергии грунта, биомассы и пр.). В этом направлении актив-

но работают ученые Беларуси, Германии (Институт пассивного дома, г. Дармштадт, Институт ИОМ – энергетические системы, Научно-исследовательский институт подземного строительства и прокладки труб – FITR), Вьетнама (Научный энергетический институт Вьетнамской академии наук и технологий), Австрии (фирма RETIC) и других стран, результаты исследований которых опубликованы в отечественной и зарубежной литературе [1–11].

Целесообразность проведения совместных исследований с вьетнамскими специалистами вытекает из возможности использования белорусскими партнерами результатов исследований, выполненных вьетнамскими учеными в области биоэнергетики. Представители вьетнамских научных кругов проявили интерес к использованию результатов исследований в области снижения эксплуатационных затрат энергии на отопление и горячее водоснабжение в жилых зданиях. Несмотря на различие климатических условий, задача снижения эксплуатационных затрат теплоты решается в наших странах по единому сценарию. Например, если для климатических условий Беларуси увеличение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий необходимо для снижения трансмиссионных тепловых потерь из помещений в отопительный период, то во Вьетнаме – для снижения теплового потока из окружающей среды в здание. В условиях Республики Беларусь система принудительной вентиляции с рекуперацией теплоты вентиляционных выбросов необходима для уменьшения потерь теплоты с удаляемым воздухом, а во Вьетнаме она может решить задачу снижения затрат энергии для функционирования системы при кондиционировании в здании. Проблемы уменьшения затрат теплоты для горячего водоснабжения жилых зданий одинаковы для обеих стран.

Идея экономии энергии при эксплуатации зданий популярна и реализуется во всем мире. Построены экспериментальные здания с нулевым потреблением энергии (Null-Energie) [1–3] и даже с ее положительным балансом (Plus-Energie), энергетические системы которых без использования ископаемых видов топлива производят больше энергии, чем потребляют [4–8]. Однако экономическое обоснование строительства таких зданий требует экспериментальных, аналитических и натурных обследований. Целью проектов Null-Energie или Plus-Energie здания является, скорее, демонстрация современных технических возможностей строительства, чем переход к их массовому строительству.

Цель настоящей статьи – постановка задачи и разработка концептуальных технических решений по снижению расхода теплоты при эксплуатации жилых зданий с учетом полученных совместных результатов исследований ученых Беларуси и Вьетнама при выполнении проекта «Использование возобновляемых источников энергии в физико-математической модели теплового режима энергоэффективного жилого здания».

**Энергоэффективные здания.** В 1970–1980 гг., годы первого энергетического кризиса, в западном мире были сделаны начальные шаги в направлении экономии теплоты при эксплуатации жилых зданий, которые в настоящее время называются энергоэффективными. Выбор технических решений при их строительстве – многофакторный аспект, а в понятии «энергоэффективность» отсутствует термодинамический анализ. Объекты

рассматривали на многочисленных примерах решений с использованием альтернативных источников энергии: солнечной, ветра, геотермальной. Понимание необходимости системного подхода к проектированию зданий с предельно низким уровнем тепловых потерь было продемонстрировано в совместном проекте «Пассивный дом». Основной идеей проекта было строительство зданий, в которых система отопления могла бы выполнять вспомогательную функцию, способствующую массовому строительству зданий указанного типа в Западной Европе. Недостатком идеологии пассивных зданий является некоторый догматизм, относящийся к уровню теплоснабжения здания (15 кВт·ч/м<sup>2</sup> в год), не учитывающему особенности архитектурно-объемно-планировочных решений здания, экономические условия, климатические и социальные особенности регионов строительства.

В [12] декларируется системный подход к проектированию и строительству энергоэффективных зданий, однако здание не рассматривается как развивающийся организм, увязанный с общим развитием энергоэффективных технологий. В то же время в интенсивно развивающемся технологическом мире энергоэффективное здание нельзя рассматривать как статичную систему вне общих тенденций развития энергетики и энергоэффективных технологий.

Затраты энергии на эксплуатацию здания в течение срока его функционирования  $E$ , кВт·ч, можно записать в следующем виде:

$$E = S_{от} \left[ \sum_{n=1}^N \tau_n (f_1 \Delta T_n - f_{2n}) - \sum_{m=3}^M \sum_{n=k_m}^N \tau_n f_{mn} \right],$$

где  $N$  – продолжительность функционирования;  $M$  – количество энергоэффективных технологий в здании;  $n$  – номер года;  $m$  – номер технологии;  $k_m$  – номер первого года введения технологии;  $S_{от}$  – отапливаемая площадь здания, м<sup>2</sup>;  $\tau_n$  – длительность отопительного периода в  $n$ -м сезоне, ч;  $f_1$  – общий удельный коэффициент теплопередачи здания, Вт/(м<sup>2</sup>·°К);  $f_{2n}$  – удельная мощность внутренних источников теплоты в здании, кВт/м<sup>2</sup>;  $f_{mn}$  – удельная мощность энергоэффективных технологий  $m$ -й технологии в  $n$ -м году, кВт/м<sup>2</sup>;  $\Delta T_n$  – средняя разность температур воздуха внутри и снаружи здания в  $i$ -м году, °С.

С точки зрения уровня используемого инженерного оборудования и снижения тепловых потерь, энергоэффективное здание – это развивающееся здание, энергетические характеристики которого улучшаются по мере подключения нового инженерного оборудования (с развитием энергоэффективных технологий), оставаясь оптимальными по соотношению затрат с получаемой экономией энергии в период эксплуатации, то есть это открытая энергетическая система с оптимальным для существующих технико-экономических условий уровнем потребления теплоты при эксплуатации и возможностью дальнейшего снижения этого уровня путем подключения новых энергоэффективных модулей [13].

**Тепловой баланс в зданиях.** При рассмотрении тепловых потерь зданий обычно не разделяют возвращаемые и безвозвратные потери теплоты, учитывая, что некоторые потери в здании можно регламентировать и по-

новому подойти к оптимизации сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий. Возвращаемыми являются потери теплоты с вытяжным воздухом и канализационными стоками из зданий. Использование высокоэффективных теплообменников и высокая герметичность помещений могут обеспечить 100 % возврата теплоты вытяжного воздуха. Применение теплообменников позволяет также частично вернуть теплоту из канализационных и ливневых стоков. Следует полагать, невозвратимыми являются трансмиссионные потери теплоты через ограждающие конструкции зданий.

**Характеристики минимального уровня потребления теплоты.** Тепловой баланс в процессе эксплуатации формируется с учетом климатических условий, влияющих на уровень тепловых потерь, социально-урбанистских условий, мощности тепловых выделений в здании и структуры жилого фонда, определяющих компактность зданий как результат строительного процесса и случайных воздействий жильцов на параметры микроклимата квартир. Эти воздействия сказываются как на величине теплотерь здания, так и перераспределяют тепловую нагрузку между отдельными квартирами. Величину средней удельной мощности теплотерь здания  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>, с учетом случайных воздействий жильцов можно записать в следующем виде:

$$q = \frac{T_{icp} - T_{out}}{S_{ot}} \left( c\rho v_{cp} S_{ot} + \sum_{m=1}^M \left( \frac{S_m}{R_m} \left( 1 - \sum_{n=1}^N \frac{\delta R_{nm}}{R_m} \right) \right) \right) + \frac{1}{S_{ot}} \sum_{n=1}^N \tau_n \left( c\rho v_n S_m + \sum_{m=1}^M S_{nm} \left( \frac{1}{R_m} - \frac{\delta R_{nm}}{R_m^2} \right) \right) - \frac{q_{вн}}{S_{уд}}$$

где  $S_{ot}$ ,  $S_m$ ,  $S_{nm}$  – отапливаемая площадь  $n$ -й квартиры (м<sup>2</sup>), площадь  $m$ -х ограждающих конструкций в здании и в  $n$ -й квартире (м<sup>2</sup>) с приведенным сопротивлением теплопередаче, равным  $R_m$  (м<sup>2</sup>·°C/Вт);  $v_{cp}$  – средний объем воздухообмена в здании, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с);  $\tau_n$  – случайная величина, равная отклонению значения температуры в  $n$ -й квартире от среднего по зданию значения, °C;  $v_n$  – случайная величина, равная отклонению значения воздухообмена в  $n$ -й квартире от среднего по зданию значения, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с);  $\delta R_{nm}$  – случайная величина, равная отклонению значения сопротивления теплопередаче  $m$ -го ограждения в  $n$ -й квартире от среднего по зданию значения, м<sup>2</sup>·°C/Вт;  $N$ ,  $M$  – количество квартир в здании и типов ограждающих конструкций соответственно;  $q_{вн}$  – мощность внутренних источников теплоты, приходящаяся на одного человека, Вт/чел.;  $S_{уд}$  – средняя удельная заселенность зданий, м<sup>2</sup>/чел.

Первый член суммы показывает среднее значение мощности удельных тепловых потерь здания в течение отопительного сезона, второй – случайную составляющую, обусловленную отклонениями температуры и воздухообмена в квартирах от среднего значения.

Величина среднеквадратичного отклонения удельной мощности теплотерь зданий от среднего значения равна

$$\sigma_q^2 = \frac{\sigma_\tau^2}{S_{ot}^2} \left( c^2 \rho^2 \sigma_v^2 \sum_{n=1}^N S_n^2 + \sum_{n=1}^N \left( \sum_{m=1}^M \frac{S_{nm}}{R_m} \right)^2 \right),$$

где  $\sigma_\tau$ ,  $\sigma_v$  – среднеквадратичное отклонение температуры и удельного воздухообмена в квартирах от среднего значения, °С и м³/(м²·с) соответственно.

Поскольку потери теплоты при вентиляции можно утилизировать, используя высокоэффективные теплообменники, сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций здания можно принимать исходя из равенства средних за отопительный сезон трансмиссионных тепловых потерь в здании суммарному значению энергии внутренних источников теплоты и потоков прямой и рассеянной солнечной радиации.

Нормативные значения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций разных стран представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

**Нормативные требования к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций зданий в странах ЕС [14]**

Страна	Франция	Германия		Словения	Венгрия	Румыния	Дания	Норвегия	Финляндия
Год принятия требований	2005	2009		2008/2010	2006	2006	2006	2007	2012
Тип здания	–	Жилое	Общественное	–	–	–	–	–	–
Коэффициент сопротивления теплопередаче, м²·°С/Вт									
Стена	2,22	2,50–1,54	2,86/2,00 <sup>1</sup>	3,57	2,22	1,49	2,50	4,55	7,00
Кровля	3,57 (2,94) <sup>2</sup>		2,86/2,00 <sup>1</sup>	5,00	4,00	3,45	4,00	5,56	11,00
Окно	0,38		0,53/0,34 <sup>1</sup>	0,77	0,62	0,56	0,50	0,63	1,00
Пол	2,78 (2,50) <sup>3</sup>		2,86/2,00 <sup>1</sup>	3,33	4,00	4,55	3,33	5,56	11,00
<sup>1</sup> Для температуры внутреннего воздуха соответственно более 19 °С / менее 19 °С. <sup>2</sup> Для металлических крыш. <sup>3</sup> Для полов над подвальным помещением.									

Таблица 2

**Нормативные требования к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций зданий в странах СНГ [14]**

Страна	Россия, 4000 градусосуток	Казахстан, 4000 градусосуток	Украина
Год принятия	2012	2012	2006
	–	–	–
Коэффициент сопротивления теплопередаче, м²·°С/Вт			
Стена	2,8	3,2	3,30
Кровля	3,7	5,0	5,35
Окно	0,5	0,6	0,75
Перекрытие над неотапливаемым помещением	3,7	2,5	3,75

мыми подвалами			
----------------	--	--	--

Сравнительный анализ значений, приведенных в табл. 1, 2, и нормативных показателей сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий в Беларуси свидетельствует о том, что практически для всех типов ограждающих конструкций, за исключением перекрытий над подвальным помещением, сопротивление теплопередаче в республике больше или равно аналогичному значению. Значение сопротивления теплопередаче оконных конструкций превышает аналогичное для всех стран, исключая Финляндию. Было бы ошибкой выбирать сопротивление теплопередаче для зданий массового строительства методом аналогии с соседними странами. Сопротивление теплопередаче должно быть близким оптимальному значению для конкретных климатических и экономических условий. Для оптимального значения сопротивления теплопередаче разность между дополнительными капитальными затратами и экономией энергии в течение продолжительности функционирования системы утепления минимальна [15]. Более точное значение даст учет совокупного дохода с учетом прогноза ставки рефинансирования, уровня инфляции и роста стоимости энергоносителей [10].

Оптимальное значение сопротивления теплопередаче при использовании пенополистирола (при упрощенном расчете) составляет  $7,5 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ . Приведенные в табл. 1 значения в настоящее время существенно ниже оптимальных. Они были близки к оптимальным значениям при подготовке изменения к документу [16] в 2009 г. Согласно сравнительному анализу значений сопротивления теплопередаче, в первую очередь следует увеличить сопротивление теплопередаче перекрытия над неотапливаемым подпольем до значений  $6,0\text{--}7,5 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ . Для жилых зданий целесообразно сопротивление теплопередаче увеличивать в зависимости от этажности, установив для зданий 1–3-го этажей его значение, равное оптимальному.

Рассчитанные значения удельных трансмиссионных тепловых потерь для зданий различной этажности с учетом существующих требований к сопротивлению теплопередаче [16] и климатических условий г. Минска представлены в табл. 3. Здесь же приведены данные о необходимом утеплении ограждающих конструкций зданий, обеспечивающем равенство трансмиссионных тепловых потерь сумме энергии внутренних тепловыделений и солнечной энергии. Для одноэтажного здания, учитывая малую заселенность, значение средней за отопительный сезон энергии внутренних источников теплоты принимается равным  $22 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$  в год.

Таблица 3

**Трансмиссионные тепловые потери и необходимое дополнительное утепление для зданий г. Минска при температуре воздуха в помещениях  $21 \text{ }^\circ\text{C}$**

Показатель	Здание						
	Одно-этажное	4-этажное	5-этажное	6-этажное	7-этажное	9-этажное	12-этажное
$Q_{\text{тр}}$ , $\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ в год	108,0	46,3	44,0	41,7	40,6	39,4	38,2
Дополнительное утепление ограждающих конструкций, %	192,7	22,0	15,9	9,8	6,7	3,7	0,6
$R_{\text{стен}}$ , $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	9,4	3,9	3,7	3,5	3,4	3,3	3,2
$R_{\text{пер}}$ , $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	5,4	2,2	2,1	2,0	1,9	1,9	1,8

$R_{\text{покр}}, \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	17,6	7,3	7,0	6,6	6,4	6,2	6,0
$R_{\text{ок}}, \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	2,9	1,2	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0

Учитывая показатели, приведенные в табл. 3, можно сделать вывод, что для зданий средней и повышенной этажности сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций, обеспечивающее равенство среднегодовой энергии трансмиссионных тепловых потерь суммарному значению бытовых тепловыделений и поступлению в здание солнечной энергии, ниже оптимального значения и вполне может быть принято в качестве нормативного. Необходимо отметить, что экономию теплоты на отопление и вентиляцию зданий средней и повышенной этажности следует перенести в область совершенствования инженерного оборудования, утилизации теплоты вентиляционных выбросов из отапливаемых объектов. В то же время автоматизация систем воздухообмена дает возможность экономии энергии за счет управления термодинамическими параметрами, режимами систем в зависимости от климатических характеристик и времени суток. Например, для работающих более 70 ч в неделю, когда жители находятся вне здания, можно ограничить воздухообмен до 50 % от нормативного. При таком управлении потери с воздухообменом в здании, оборудованном управляемой приточно-вытяжной вентиляцией с рекуперацией теплоты вытяжного воздуха, при эффективности системы 80 % составят 8,29 кВт·ч/м<sup>2</sup> за отопительный сезон.

Анализ приведенных цифр показывает, что значение  $R_{\text{пер}}$  можно увеличить, используя принцип равенства тепловых потерь здания через кровлю и перекрытие первого этажа, принимая температуру воздуха в подполье 5 °С. В данном случае сопротивление теплопередаче этих ограждений будет равно значениям, представленным в табл. 4.

Таблица 4

Рекомендуемые значения сопротивлений теплопередаче

Показатель	Здание						
	Одно-этажное	4-этажное	5-этажное	6-этажное	7-этажное	9-этажное	12-этажное
$R_{\text{пер}}, \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	12,9	5,4	5,1	4,8	4,7	4,6	4,4
$R_{\text{покр}}, \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	17,6	7,3	7,0	6,6	6,4	6,2	6,0

**Варианты энергоэффективных решений систем горячего водоснабжения зданий.** В современных зданиях Республики Беларусь затраты теплоты на приготовление горячей воды превышают аналогичные, используемые для отопления зданий. За счет установки индивидуальных счетчиков горячей воды значение потребления теплоты на отопление зданий за последние 20 лет уменьшилось в три раза, а затраты теплоты в системах ГВС – на 30 %. Это говорит о необходимости более существенной экономии энергии в развитии энергоэффективных систем горячего водоснабжения.

Рассмотрим различные варианты энергоэффективных решений систем ГВС для зданий г. Минска, обеспечивающих значительное снижение энергии на горячее водоснабжение по сравнению с существующим уровнем. В качестве вторичных и альтернативных источников теплоты предполагается использование тепловой энергии сточных вод и солнца [13]. В качестве тех-



нических средств, обеспечивающих использование солнечной энергии, и вторичных источников теплоты могут быть применены следующие:

- системы утилизации теплоты «серых» сточных вод;
- солнечный коллектор;
- фотоэлектрические преобразователи;
- тепловые насосы.

Для утилизации теплоты «серых» сточных вод следует выделить индивидуальную систему слива от других стоков (из кухонь и туалетов). Такое разделение стоков позволяет уменьшить капитальные и текущие затраты на систему очистки смеси стоков [14]. Доля объема горячей воды в «серых» стоках принимается 60 % от общего расхода горячей воды, температура «серых» стоков  $t_{гор}^{сер}$  на входе в систему утилизации – 35 °С. На выходе из утилизатора температура стоков в зависимости от времени года изменяется от 10 до 27 °С, что является достаточным температурным потенциалом для дальнейшей утилизации теплоты сточных вод. Система утилизации теплоты стоков обеспечивает первую ступень нагрева водопроводной воды.

Солнечный коллектор, устанавливаемый на крыше зданий преимущественно в южном направлении, предназначен для преобразования энергии солнечного излучения в теплоту. Преобразованная в теплоту энергия солнечного излучения используется во второй ступени нагрева водопроводной воды, где коэффициент преобразования энергии солнечного излучения в тепловую  $K_{кол}$  в солнечном коллекторе достигает 65 % [17].

Фотоэлектрические преобразователи предназначены для преобразования энергии альтернативного источника теплоты – энергии солнечного излучения – в электрическую. Электричество, вырабатываемое фотоэлектрическими преобразователями, обеспечивает работу компрессионного теплового насоса. Коэффициент преобразования энергии солнечного излучения в электрическую в фотоэлектрических преобразователях принимается 15 %.

Тепловые насосы предназначены для утилизации низкопотенциальной теплоты «серых» сточных вод после утилизатора теплоты сточных вод и являются ее утилизатором второй ступени. Работа компрессора и циркуляционного насоса теплонасосной установки обеспечивается электрической энергией, вырабатываемой фотоэлектрическими преобразователями. Примерно три четверти необходимой для нагрева водопроводной воды тепловой насос получает из низкопотенциальной теплоты «серых» сточных вод, для остальной четверти ему требуется в качестве движущей энергии электрический ток (компрессионные тепловые насосы). Тепловой насос обеспечивает возможность экономного и экологически щадящего отопления с использованием теплоты окружающей среды.

Срок окупаемости инвестиций в энергосберегающие мероприятия по использованию вторичных и возобновляемых источников теплоты  $n$  (лет) определяется по формуле [13]

$$n = \frac{\ln\left(\frac{\Delta\mathcal{E} + Z_0((1+p_1) - \alpha(1+p))}{\Delta\mathcal{E}}\right)}{\ln\left(\frac{1+p_1}{\alpha(1+p)}\right)},$$

где  $\Delta\mathcal{E}$  – годового экономического эффекта применения энергоэффективной технологии;  $Z_0$  – капитальные затраты;  $\alpha$  – коэффициент инфляции;  $p$  – процентная ставка по кредиту в банке;  $p_1$  – прогнозный годовой рост стоимости энергии.

В своих исследованиях авторы рассматривали варианты энергоэффективных решений систем ГВС для различных зданий, когда:

а) утилизация вторичных источников теплоты («серых» сточных вод) обеспечивает две ступени подготовки горячей воды;

б) утилизация вторичного источника теплоты («серых» сточных вод) и преобразование энергии солнечного излучения для подготовки горячей воды с помощью солнечного коллектора обеспечивают три ступени подготовки горячей воды;

в) утилизация вторичного источника теплоты («серых» сточных вод), преобразование энергии солнечного излучения для подготовки горячей воды с помощью солнечного коллектора и теплонасосной системы, в состав которой входят фотоэлектрические преобразователи, обеспечивают четыре ступени подготовки горячей воды.

Данные варианты энергоэффективных решений системы ГВС представлены в табл. 5.

Таблица 5

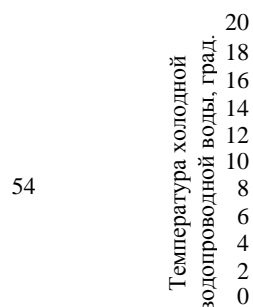
Энергоэффективные решения системы ГВС

Наименование технического средства	Вариант			
	1	2	3	4
Утилизатор теплоты сточных вод	+	+	+	+
Солнечный коллектор	–	+	+	–
Тепловой насос + фотоэлектрический преобразователь	–	–	+	+
<b>Примечание:</b> «+» – наличие технического средства; «–» – отсутствие технического средства.				

В качестве исходных характеристик для расчетов вариантов принимали следующие данные, соответствующие зданию в г. Минске:

а)  $Q_{hy} = 179261 \text{ МДж}\cdot\text{год}^{-1}$  – годовые расходы теплоты на горячее водоснабжение здания;

б) годовой график изменения температуры водопроводной холодной воды, представленный на рис. 1;



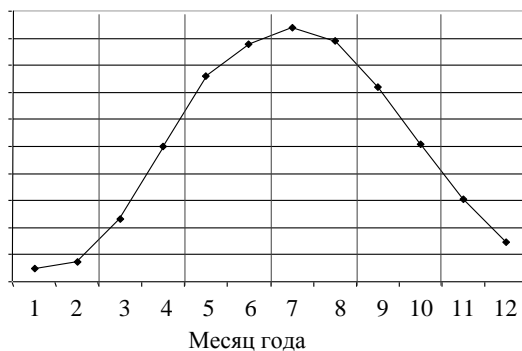


Рис. 1. Среднемесячная температура водопроводной воды по месяцам  
 в) среднемесячные значения суммарной солнечной радиации по месяцам, приведенные на рис. 2.

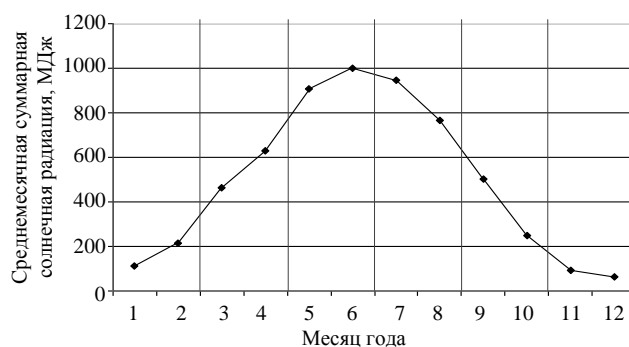


Рис. 2. Среднемесячная суммарная солнечная радиация по месяцам

Результаты расчета варианта 1 представлены на рис. 3, расчетные значения параметров – в табл. 6.

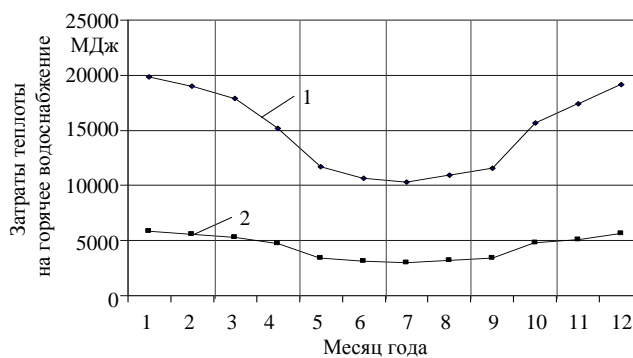


Рис. 3. Графики тепловых характеристик по месяцам для варианта 1:  
 1 – среднемесячная потребность теплоты на горячее водоснабжение по месяцам;  
 2 – среднемесячная теплота, утилизируемая утилизатором сточных вод

Таблица 6

Результаты расчетов параметров варианта 1

Параметр	Единица измерения	Значение параметра

Годовой объем теплоты, утилизированной утилизатором сточных вод	МДж	53167
Доля восполняемой потребности теплоты на горячее водоснабжение		0,30
Годовая экономия условного топлива	т у. т.	2,27
Годовой доход энергосберегающего мероприятия	дол.	273
Капитальные затраты при сроке окупаемости восемь лет	дол.	3750

Результаты расчета варианта 2 представлены на рис. 4, расчетные значения параметров – в табл. 7.

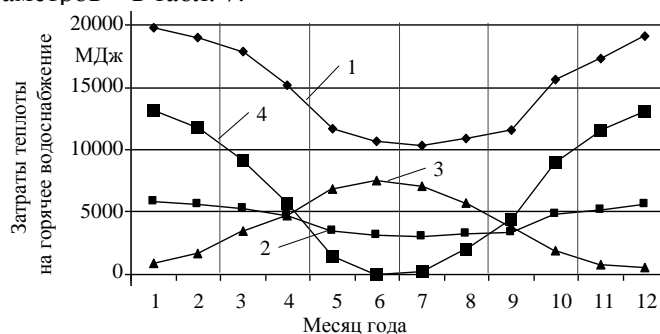


Рис. 4. Графики тепловых характеристик по месяцам для варианта 2:  
 1 – среднемесячная потребность теплоты на горячее водоснабжение по месяцам;  
 2 – среднемесячная теплота, утилизированная утилизатором сточных вод;  
 3 – среднемесячная теплота, вырабатываемая солнечным коллектором;  
 4 – вспомогательный график выбора площади солнечного коллектора из расчета полной компенсации затрат энергии в июле

Таблица 7

**Результаты расчетов параметров варианта 2**

Параметр	Единица измерения	Значение параметра
Годовой объем теплоты, утилизированной утилизатором сточных вод	МДж	53167
Годовая выработка теплоты солнечным коллектором	МДж	44728
Суммарная площадь солнечного коллектора	м <sup>2</sup>	12
Доля восполняемой потребности теплоты на горячее водоснабжение		0,55
Годовая экономия условного топлива	т у. т.	4,2
Годовой доход энергосберегающего мероприятия	дол.	502
Капитальные затраты при сроке окупаемости восемь лет	дол.	6900

Результаты расчета варианта 3 представлены на рис. 5, расчетные значения параметров – в табл. 8.

20000  
 МДж  
 15000  
 10000  
 56  
 5000  
 0

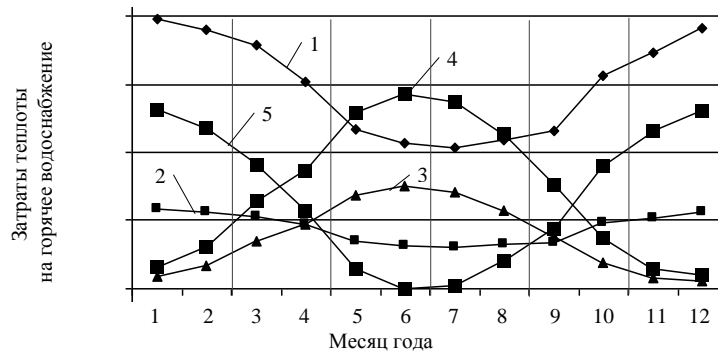


Рис. 5. Графики тепловых характеристик по месяцам для варианта 3:  
 1 – потребность теплоты на горячее водоснабжение; 2 – теплота, утилизируемая утилизатором сточных вод; 3 – теплота, вырабатываемая солнечным коллектором;  
 4 – вспомогательный график выбора площади солнечного коллектора;  
 5 – теплота, восполняемая системой «тепловой насос + фотоэлектрический преобразователь»

Таблица 8

**Результаты расчетов параметров варианта 3**

Параметр	Единица измерения	Значение параметра
Годовой объем теплоты, утилизированной утилизатором сточных вод	МДж	53167
Годовая выработка теплоты солнечным коллектором	МДж	44728
Суммарная площадь солнечного коллектора	м <sup>2</sup>	12
Количество теплоты, восполняемое системой «тепловой насос + фотоэлектрический преобразователь» в течение года	МДж	85685
Суммарная площадь фотоэлектрического преобразователя	м <sup>2</sup>	25
Доля восполняемой потребности теплоты на горячее водоснабжение		1,02
Годовая экономия условного топлива	т у. т.	7,9
Годовой доход энергосберегающего мероприятия	дол.	942
Капитальные затраты при сроке окупаемости восемь лет	дол.	13000

Результаты расчета варианта 4 представлены на рис. 6, расчетные значения параметров – в табл. 9.

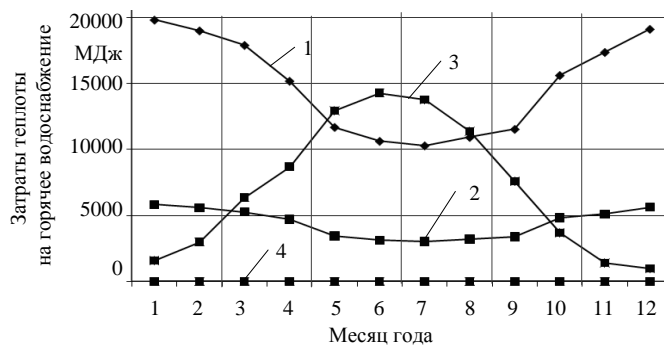


Рис. 6. Графики тепловых характеристик по месяцам для варианта 4:  
 1 – среднемесячная потребность теплоты на горячее водоснабжение по месяцам;  
 2 – среднемесячная теплота, утилизируемая утилизатором сточных вод;  
 3 – вспомогательный график выбора площади солнечного коллектора;

4 – среднемесячная теплота, восполняемая системой  
«тепловой насос + фотоэлектрический преобразователь» по месяцам

Таблица 9

**Результаты расчетов параметров варианта 4**

Параметр	Единица измерения	Значение параметра
Годовой объем теплоты, утилизированной утилизатором сточных вод	МДж	53167
Количество теплоты, восполняемое системой «тепловой насос + фотоэлектрический преобразователь» в течение года	МДж	85685
Суммарная площадь фотоэлектрического преобразователя	м <sup>2</sup>	24,50
Доля восполняемой потребности теплоты на горячее водоснабжение		0,77
Годовая экономия условного топлива	т у. т.	5,90
Годовой доход энергосберегающего мероприятия	дол.	712
Капитальные затраты при сроке окупаемости восемь лет	дол.	9800

Представленные для варианта 3 вторичные и нетрадиционные источники теплоты могут полностью удовлетворить годовую потребность теплоты на горячее водоснабжение. Значимость каждой из составляющих источника теплоты близка друг другу по значению. В варианте 3 тепловой насос использует не только теплоту нагрева горячей воды, но также низкопотенциальную теплоту «серых» стоков, охлаждая их до температуры водопроводной воды в зимнее время (около 5 °С). Значения капитальных затрат при сроке окупаемости восемь лет определяют ценовые ориентиры оборудования, закладываемого в энергоэффективные мероприятия с применением вторичных и нетрадиционных источников теплоты по модернизации административных зданий.

Сравнительный анализ рассмотренных вариантов показывает безусловную экономическую эффективность использования утилизатора тепловой энергии сточных вод. Преимущество этой системы перед солнечным коллектором – в круглогодичном использовании. Второй вариант – комбинация утилизатора теплоты сточных вод и солнечного коллектора – увеличивает экономию энергии, однако растут и капитальные затраты. Третий вариант обеспечивает полное покрытие затрат тепловой энергии на ГВС. Следует обратить внимание на то, что затраты в первых двух вариантах близки к необходимым, в то время как в вариантах 3, 4 в период эксплуатации они могут существенно превысить показатели, представленные в табл. 6–9.

## ВЫВОДЫ

1. Анализ использования энергоэффективных технологий при проектировании и строительстве зданий показал, что проблемы применения технических средств и способов снижения эксплуатационных затрат энергии при эксплуатации жилых зданий в Республике Беларусь и во Вьетнаме, несмотря на различие климатических условий, имеют общие закономерности.

2. Потери теплоты при воздухообмене можно утилизировать, используя теплообменники. Сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций здания можно принимать, исходя из равенства среднего за отопительный сезон значения трансмиссионных тепловых потерь в нем суммарному значению энергии внутренних источников теплоты в здании и солнечной энергии.

3. Сравнительный анализ полученных данных с нормативными величинами сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий в Беларуси показывает, что практически для всех их типов, за исключением перекрытий над подвальными помещениями, этот показатель в республике больше или равен нормативному. Значение сопротивления теплопередаче оконных конструкций превышает нормативное для всех рассматриваемых стран, исключая Финляндию, что во многих случаях не совпадает со значениями сопротивления теплопередаче для зданий массового строительства методами, используемыми в соседних странах.

4. Сопротивление теплопередаче должно быть близким к оптимальному значению для конкретных климатических и экономических условий. Было бы ошибкой выбирать для оптимального значения сопротивления теплопередаче разность между дополнительными капитальными затратами и экономией энергии при длительной эксплуатации строительных конструкций.

5. Исследования, связанные с экономией теплоты на отопление и вентиляцию зданий средней и повышенной этажности, следует перенести в область совершенствования инженерного технического оборудования зданий, в частности вопрос экономии теплоты на отопление можно решать за счет полной утилизации теплоты вентиляционных выбросов из здания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. C o s t a, A. Integrated Design Process for Affordable Net-Zero-Energy Buildings-14 / A. Costa // Internationale Passivhaustagung. – Dresden, 2010. – P. 485–488.
2. S z a l a y, Z. Limits to Reducing Energy Use-14 / Z. Szalay, V. Brophy T. Csoknai // Internationale Passivhaustagung. – Dresden, 2010. – P. 491–496.
3. Е л о х о в, А. Е. Пассивный дом – миф или реальность / А. Е. Елохов // Технологии проектирования и строительства энергоэффективных зданий Passive House, 11–12 апреля 2012 г. – М., 2012. – С. 115–119.
4. R o n a c h e r, H. Passivhaus und Energie Plus Haus – Potenziale für Regionaltypische Architektur-14 / H. Ronacher // Internationale Passivhaustagung. – Dresden, 2010. – P. 525–526.
5. R e g n e r, P. Erkenntnisse aus der Nachbetreuung der Plusenergie-Dreifach-Sport-halle-14 / P. Regner // Internationale Passivhaustagung. – Dresden, 2010. – P. 203–208.
6. П а н и т к о в, О. И. Первый активный дом в Австрии как часть программы «Модельный дом-2010» / О. И. Панитков // Технологии проектирования и строительства энергоэффективных зданий Passive House, 6–7 апреля 2011 г. – М., 2011. – С. 23–25.
7. Л е о н о в а, В. А. Развитие индивидуального домостроения в России: проект «Активный дом» / В. А. Леонова // Технологии проектирования и строительства энергоэффективных зданий Passive House, 6–7 апреля 2011 г. – М., 2011. – С. 26–29.
8. Е л о х о в, А. Е. Развитие концепции пассивного дома. Пилотные проекты в РФ / А. Е. Елохов // Технологии проектирования и строительства энергоэффективных зданий Passive House, 3–4 апреля 2013 г. – М., 2013. – С. 57–64.

9. Duong, Duy Hoat. Renewable Energy Development in Vietnam – Current Status and Prospects / Duong Duy Hoat, Ngo Tuan Kiet, Nguyen Thuy Nga // Conference of Sustainable Energy Development SED 2. Proceedings 2011. – P. 259–269.

10. Vu Minh Phap. Application of Grid tie Solar Power Technology at Ninh Thuan Province / Vu Minh Phap [et al.] // Conference of Sustainable Energy Development SED 3. Proceedings 2013. – P. 201–206.

11. Nguyen, Thuy Nga. Model Combines Biogas and Small Hydropower to Serve Households in Mountainous Areas Outside the National Power Grid in the North West Provinces of Vietnam / Nguyen Thuy Nga, Le Quang Sang, Vu Minh Phap // Workshop on Application of Science and Technology to Serve Economic Development – Social Mountainous Northwestern Provinces of Vietnam 2009. Proceedings. – P. 105–115.

12. Табунщиков, Ю. А. Энергоэффективные здания / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач, Н. В. Шилкин. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2003. – 200 с.

13. Данилевский, Л. Н. Принципы проектирования и инженерное оборудование энергоэффективных жилых зданий / Л. Н. Данилевский. – Минск: Бизнесофсет, 2011. – 375 с.

14. Сеппанен, О. Требования к энергоэффективности зданий в странах ЕС / О. Сеппанен // Энергосбережение. – 2010. – № 7. – С. 42–50.

15. Гагарин, В. Г. Методы экономического анализа повышения уровня теплозащиты ограждающих конструкций зданий / В. Г. Гагарин // АВОК. – 2009. – № 1. – С. 10–16.

16. Андерсон, Б. Солнечная энергия (Основы строительного проектирования) / Б. Андерсон. – М.: Стройиздат, 1982. – 375 с.

17. Калинин, И. М. Энергосберегающие теплонасосные технологии / И. М. Калинин // Экологические системы. – 2003. – № 6. – С. 12–18.

#### REFERENCES

1. Costa, A. (2010) Integrated Design Process for Affordable Net-Zero-Energy Buildings. *14 Internationale Passivhaustagung 2010*. Dresden, 485–488 (German).

2. Szalay, Z., Brophy, V. & Csoknai, T. (2010) Limits to Reducing Energy Use. *14 Internationale Passivhaustagung 2010*. Dresden, 491–496 (German).

3. Elokhov, A. E. (2012) Tour Visit Report in Germany “Passive House – Myth or Reality”. *Technologies for Designing and Construction of Energy-Efficient Houses – Passive House, April 11–12, 2012*. Moscow, 115–119 (in Russian).

4. Ronacher, H. (2010) Passivhaus und Energie Plus Haus – Potenziale für Regional-typische Architektur. *14 Internationale Passivhaustagung 2010*. Dresden, 525–526 (German).

5. Regner, P. (2010) Erkenntnisse aus der Nachbetreuung der Plusenergie-Dreifach-Sporthalle. *14 Internationale Passivhaustagung 2010*. Dresden, 203–208 (German).

6. Panitkov, O. I. (2011) The First Active House in Austria as Part of the Program “Model House-2010”. *Technologies for Designing and Construction of Energy-Efficient Houses – Passive House, April 6–7, 2011*. Moscow, 23–25 (in Russian).

7. Leonova, V. A. (2011) Development of Individual House-Building Construction in Russia. Project “Active House”. *Technologies for Designing and Construction of Energy-Efficient Houses – Passive House, April 6–7, 2011*. Moscow, 26–29 (in Russian).

8. Elokhov, A. E. (2013) Development of Passive House Concept. Pilot Projects in Russian Federation. *Technologies for Designing and Construction of Energy-Efficient Houses – Passive House, April 3–4, 2013*. Moscow, 57–64 (in Russian).

9. Duong, Duy Hoat, Ngo Tuan Kiet, & Nguyen Thuy Nga (2011) Renewable Energy Development in Vietnam – Current Status and Prospects. *Conference of Sustainable Energy Development, SED 2, 259–269* (Vietnamese).

10. Vu Minh Phap (2013) Application of Grid tie Solar Power Technology at Ninh Thuan Province. *Conference of Sustainable Energy Development, SED 3, 201–206* (Vietnamese).

11. Nguyen, Thuy Nga, Le Quang Sang, & Vu Minh Phap (2009) Model Combines Biogas and Small Hydropower to Serve Households in Mountainous Areas Outside the National Power Grid in the North West Provinces of Vietnam. *Workshop on Application of Science and Technology to Serve Economic Development – Social Mountainous Northwestern Provinces of Vietnam, 105–115* (Vietnamese).

12. Табунщиков, Ю. А., Бродач, М. М., & Шилкин Н. В. (2003) *Energy-Efficient Houses*. Moscow, AVOK-PRESS. 200 p. (in Russian).



13. Danilevsky, L. N. (2011) *Designing Principles and Engineering Equipment of Energy-Efficient Houses*. Minsk, Businessofset. 375 p. (in Russian).
14. Seppanen, O. (2010) Benchmarking Regulations on Energy-Efficiency of Buildings in EU Countries. *Energoberezhenie [Power Saving]*, 7, 42–50 (in Russian).
15. Gagarin, V. G. (2009) Methods of Economic Analysis for Improving Heat Protection Rate of Building Enclosure Structures. *AVOK*, 1, 10–16 (in Russian).
16. Anderson, B. (1982) *Solar Energy (Principles of Construction Design)*. Moscow, Stroyizdat. 375 p. (in Russian).
17. Kalinin, I. M. (2003) Energy-Saving Heat Pump Technology. *Ekologicheskie Sistemy [Ecological Systems]*, 6, 12–18 (in Russian).

Представлена кафедрой  
теплогазоснабжения и вентиляции

Поступила 28.08.2014

УДК 681.5

## МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ НАСТРОЕК СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПО КАНАЛУ ВОЗМУЩЕНИЯ

Докторант ГОЛИНКО И. М.<sup>1)</sup>, докт. техн. наук, проф. КУЛАКОВ Г. Т.<sup>2)</sup>,  
канд. техн. наук, проф. КОВРИГО Ю. М.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»,

<sup>2)</sup>Белорусский национальный технический университет

E-mail: tes\_bntu@tut.by

В процессе наладки систем автоматического управления обычно отдают предпочтение элементарным формулам определения параметров оптимальной динамической настройки регуляторов, учитывающим динамику объектов управления. В большинстве случаев известные формулы ориентированы на расчет систем автоматического управления по каналу «задание – выход». Однако практически для всех непрерывных процессов основной задачей регуляторов является стабилизация выходных параметров на заданных значениях.

Разработана методика расчета параметров динамических настроек регуляторов, учитывающая динамику крайнего внешнего возмущения. Данная методика позволяет оптимизировать аналоговые и цифровые регуляторы с учетом минимизации регулирующих воздействий. При этом для оптимизации регуляторов предлагается использовать функционал, учитывающий расхождение и максимальную величину регулирующего воздействия. Так как оптимизация системы автоматического управления с ПИ-регулятором по каналу возмущения является унимодальной задачей, то основной алгоритм оптимизации реализован по методу Хука – Дживса. Для оптимизации регуляторов по каналу внешнего возмущения получены функциональные зависимости расчета параметров динамической настройки ПИ-регулятора от динамических свойств объекта управления. В отличие от существующих методов полученные зависимости позволяют оптимизировать регуляторы автоматического управления по каналу внешнего возмущения как с учетом динамических характеристик объекта управления по каналу регулирующего воздействия, так и по динамическим характеристикам канала крайнего внешнего возмущения, что, несомненно, улучшает качество регулирования переходных процессов. Расчетные формулы обеспечивают высокую точность и удобны для практического использования. В предложенном методе отсутствуют графические номограммы, что исключает субъективность исследова-