

УДК 621.577.62

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-42-52

## Анализ применения теплонасосных установок в системах теплоснабжения

А.Я. Шелгинский, И.В. Яковлев

Рассмотрены проблемы использования теплонасосных установок (ТНУ), применяющихся в системах утилизации вторичных энерго-ресурсов промышленных низкотемпературных теплотехнологических процессов и в системах теплоснабжения зданий.

Приведены данные по продажам ТНУ в различных европейских странах, из которых следует, что в Российской Федерации отмечается существенное отставание по использованию ТНУ в системах теплоснабжения. Установки классифицированы по циклам и по источникам низкопотенциальной теплоты.

Представлена принципиальная схема ТНУ в системе с использованием низкопотенциальной теплоты сточных вод. Для транспорта от источника низкопотенциальной теплоты (ИНТ) к испарителю ТНУ (в качестве примера) вместо насоса с электроприводом для перекачивания промежуточного теплоносителя используется тепловая труба. Показаны график тепловых потоков в температурном соответствии теплоносителей при передаче теплоты от ИНТ к потребителю и тепловой баланс элемента системы с ТНУ.

Проанализированы методы определения энергетической эффективности применения ТНУ с использованием коэффициента трансформации (преобразования) теплоты и эксергетического КПД, учитывающего не только количество получаемой теплоты, но и ее качество — температурный уровень. Показано, что при дополнительных затратах энергии для транспорта теплоты от источника низкопотенциальной теплоты к испарителю ТНУ данные затраты энергии необходимо учитывать для определения энергетической эффективности системы, включающей ТНУ. При использовании электрической и других видов энергии для определения энергетической эффективности системы целесообразно применять такие показатели как стоимость энергоносителей и затраты условного топлива на их выработку. Доказано, что при использовании органического топлива на выработку электроэнергии и теплоты для работы компрессора ТНУ с электроприводом коэффициент трансформации теплоты в ТНУ должен быть существенно выше величины 2,32. Даны результаты реализованных проектов, в которых проводились исследования функционирования систем теплоснабжения на основе ТНУ. Анализ полученных результатов, показывает низкую энергетическую эффективность в ряде выполненных проектов, которая не позволяет компенсировать затраты на их создание.

Величина коэффициента преобразования энергии зависит от требуемой температуры для потребителя и температуры холодного источника; термодинамических свойств рабочего вещества и особенностей термодинамического цикла ТНУ; технического совершенства конструкции ТНУ; видов энергетических затрат на привод компрессора и способа транспорта теплоты от низкопотенциального источника. Для высокой эффективности систем теплоснабжения на основе ТНУ (СТ ТНУ) следует иметь источник низкопотенциальной теплоты с наиболее высокой температурой и потребителя теплоты с наиболее низкой температурой используемого теплоносителя. Наличие удобных источников низкопотенциальной теплоты, которые обладали бы зимой и летом достаточно высокой температурой, не требовали бы больших затрат на их перекачку и не вызывали бы коррозии теплообменных аппаратов и труб — одно из важнейших условий применения ТНУ для теплоснабжения.

Вопросы применения СТ ТНУ в конкретных условиях требуют тщательного предварительного технико-экономического исследования. Коэффициент трансформации (преобразования) теплоты в ТНУ далеко не всегда является определяющим при оценке энергетической эффективности использования СТ ТНУ. Дополнительно нужно учитывать, что на привод компрессора ТНУ и транспорт низкопотенциальной теплоты от источника к испарителю ТНУ желательно использовать наиболее дешевый вид энергии. Для привода компрессора ТНУ в ряде случаев эффективно применять энергию избыточного давления энергоносителей (газа, пара, воды и т.п.), механическую энергию двигателей внутреннего сгорания, газотурбинных установок и подобных устройств. При использовании ТНУ с электроприводом следует регулировать соотношение тарифов на электроэнергию и теплоту с целью уменьшения отношения цены электроэнергии к цене на теплоту.

*Ключевые слова:* источник низкопотенциальной теплоты, коэффициент преобразования энергии, теплонасосная установка, система теплоснабжения, энергетическая эффективность.

*Для цитирования:* Шелгинский А.Я., Яковлев И.В. Анализ применения теплонасосных установок в системах теплоснабжения // Вестник МЭИ. 2018. № 2. С. 42—52. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-42-52.

## Analyzing the Application of Heat Pump Units in Heat Supply Systems

A.Ya. Shelginsky, I.V. Yakovlev

The article discusses matters concerned with the use of heat pump units (HPUs) in systems for reclaiming the secondary energy resources of industrial low-temperature thermal technological processes and in heat supply systems of buildings.

Data on the sales of HPUs in different European countries are given, from which it can be seen that there is a significant lag in the use of HPUs for heat supply systems in the Russian Federation. Different HPUs are classified by cycles and by low-grade heat sources.

The basic circuit diagram of an HPU applied in the system involving the use of waste water low-grade heat is presented. As an example, a heat pipe can be used instead of an electrically driven pump for transporting intermediate heat carrier from the source of low-grade heat (LGHS) to the HPU evaporator. The graph of heat fluxes (constructed in consistency with the heat carrier temperatures) in transferring heat from the LGHS to the consumer and the heat balance for an element of the system containing an HPU are given.

Methods for determining the energy efficiency from applying an HPU are analyzed through the use of the heat transformation (conversion) coefficient and the exergetic efficiency, which takes into account not only the amount of produced heat, but also its quality in terms of temperature level. It is shown that, if additional energy is spent for transporting heat from the low-grade heat source to the HPU evaporator, these energy expenditures must be taken into account in determining the energy efficiency of the system containing an HPU. In case of using electric and other types of energy, it is advisable to use such indicators as the cost of energy carriers and the expenditures of equivalent fuel for producing these kinds of energy in determining the system's energy efficiency. It is shown that in case of using fossil fuel to produce electricity and heat for the operation of the HPU's electrically driven compressor, the heat conversion coefficient in the HPU should be well above 2.32.

The results of implemented projects in which the performance of HPU-based heat supply systems was investigated are given. An analysis of the obtained results shows that a number of implemented projects feature low energy efficiency, a circumstance that does not allow the cost of their construction to be compensated.

It is shown that the energy conversion coefficient depends on the required temperature for a consumer, on the cold source temperature, on the working fluid thermodynamic properties and the HPU thermodynamic cycle features, on the HPU design technical perfection, on the type of energy expenditures for driving the compressor, and on the method for transporting heat from the low-grade source. For securing high efficiency of HPU-based heat supply systems (HSS), it is necessary to have a low-grade heat source with the highest temperature and a heat consumer with the lowest temperature of the used heat carrier. The availability of convenient low-grade heat sources that would (i) have a sufficiently high temperature both in winter and in summer, (ii) not require high expenditures for transferring them and (iii) not cause corrosion of heat exchangers and pipes is one of the most important conditions for using an HPU for heat supply purposes.

Matters concerned with the use of HPU-based HSS under specific conditions require a thorough preliminary feasibility study. The heat transformation (conversion) coefficient in an HPU is by no means a universal factor that can be used as the determining one in assessing the energy efficiency of using an HPU-based HSS. It must also be borne in mind that the cheapest available type of energy should be used for driving the HPU compressor and for transporting low-grade heat from the source to the HPU evaporator. In a number of cases, the most efficient way of driving the HPU compressor consists in using the energy of excess pressure available in energy carriers (gas, steam, water, etc.) or the mechanical energy of internal combustion engines, gas turbine plants and similar devices. When using electrically driven HPUs, it is recommended to adjust the ratio of tariffs for electricity and heat in order to reduce the ratio of electricity prices to the price of heat.

*Key words:* low-grade heat source, coefficient of performance, heat pump unit, heat supply system, energy efficiency.

*For citation:* Shelginsky A.Ya., Yakovlev I.V. Analyzing the Application of Heat Pump Units in Heat Supply Systems. MPEI Vestnik. 2018;2:42—52. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-42-52.

Вопросы энергосбережения и экологии весьма актуальны для промышленных предприятий и сферы жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ). В настоящее время особое внимание уделяется проблемам использования теплонасосных установок (ТНУ), которые применяются в системах утилизации вторичных энергоресурсов промышленных низкотемпературных теплотехнологических процессов и системах теплоснабжения зданий.

Впервые в Европе мощный тепловой насос для отопления здания был использован в Цюрихе в 1938 г. С этого времени в западных странах, особенно в Германии, Швеции и Норвегии, теплонасосные установки активно исследовались и внедрялись в системы теплоснабжения зданий и отдельные теплотехнологические процессы. Уже ко второй половине XX в. были реализованы многие десятки тысяч различных проектов с использованием ТНУ [1].

В СССР теплонасосными установками с 1930 года занимались во Всесоюзном теплотехническом институте им. Ф.Э. Дзержинского, Энергетическом институте им. Г.М. Кржижановского и др. Однако, эти работы являлись в основном обзорными и теоретически-расчетными и не находили практического применения из-за недостатка комплектующих для ТНУ. С развитием машиностроения в России стали применять ТНУ различных типов с различными источниками низкопотенциальной теплоты.

В информационно-методическом издании [2] приведены данные по продажам ТНУ в различных европейских странах в 2015 г. (рис. 1). Из диаграммы следует, что в Российской Федерации отмечается существенное отставание по использованию ТНУ в системах теплоснабжения.

На правительственном уровне поднимались вопросы энергетической стратегии России на период до 2030 г. [3] и был утвержден перечень объектов и технологий, относящихся к объектам и технологиям высокой энергетической эффективности [4]. В этот перечень вошли и технологии с применением ТНУ.

Наиболее распространены ТНУ по циклам и по источникам низкопотенциальной теплоты:

- компрессионные: пароконпрессорные, газоконпрессорные;
- сорбционные: абсорбционные, адсорбционные;
- окружающий воздух;
- водоемы, озера, реки;
- грунтовые и подземные воды;
- канализационные и сточные воды
- поверхностный и глубинный грунт.

Подробная информация по классификации ТНУ, используемым хладагентам и источникам низкопотенциальной теплоты представлена в [2].

На рис. 2 изображена принципиальная схема ТНУ с использованием низкопотенциальной теплоты сточ-

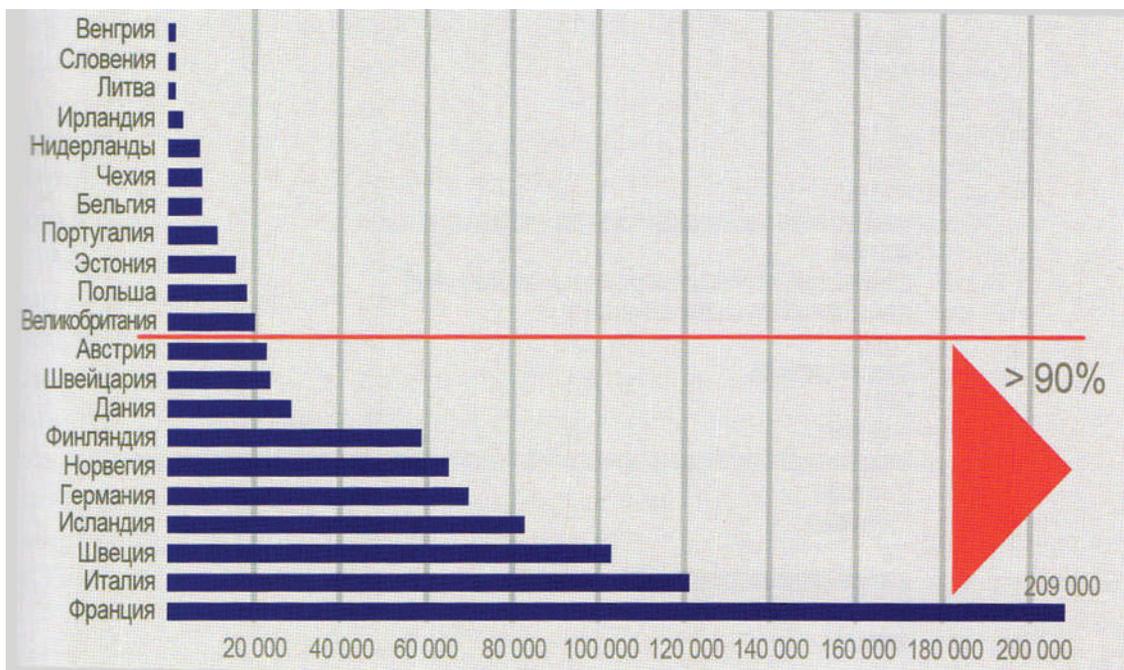


Рис. 1. Количество проданных тепловых насосов в 2015 г.

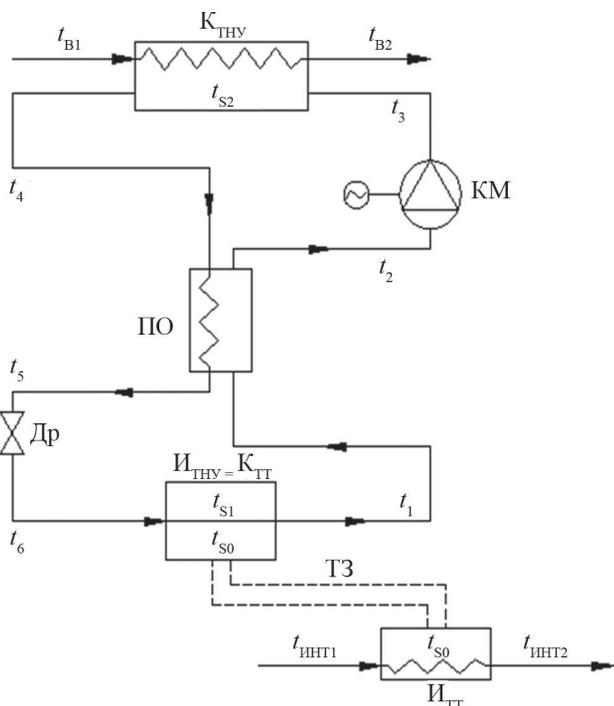


Рис. 2. Схема теплопереноса от источника низкопотенциальной теплоты к потребителю:

$I_{ТТ}$ ,  $K_{ТТ}$ ,  $I_{ТНУ}$ ,  $K_{ТНУ}$  — испаритель и конденсатор ТТ и ТНУ;  $KМ$  — компрессор ТНУ;  $ПО$  — промежуточный охладитель конденсата ТНУ;  $Др$  — дроссель;  $ТЗ$  — транспортная зона ТТ;  $t_{ИНТ1}$ ,  $t_{ИНТ2}$  — температура теплоносителя ИНТ на входе и выходе из испарителя ТТ, °С;  $t_{S0}$  — температура насыщения промежуточного теплоносителя ТТ в  $I_{ТТ}$  и  $K_{ТТ}$ , °С;  $t_{S1}$ ,  $t_{S2}$  — температуры насыщения теплоносителя ТНУ в  $I_{ТНУ}$  и  $K_{ТНУ}$ , °С;  $t_{B1}$ ,  $t_{B2}$  — температуры нагрева теплоносителя, поступающего к потребителю, °С;  $t_2$  —  $t_4$  — температуры теплоносителя ТНУ после  $ПО$ ,  $КМ$ ,  $K_{ТНУ}$ , °С;  $t_5$  — температура конденсата после  $ПО$ , °С

ных вод. Для транспорта от источника низкопотенциальной теплоты (ИНТ) к испарителю ТНУ вместо насоса с электроприводом для перекачивания промежуточного теплоносителя предложено использовать тепловую трубу (ТТ) [5].

Тепловые потоки в температурном соответствии теплоносителей для анализируемого комплекса показаны на рис. 3. Теплоноситель от ИНТ с температурой

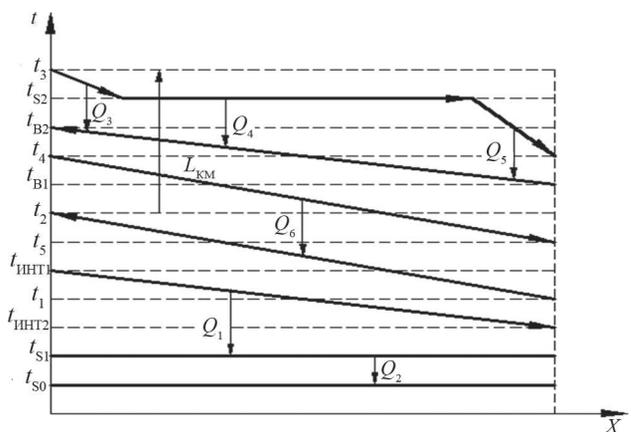


Рис. 3. Принципиальная схема тепловых потоков в температурном соответствии теплоносителей:

$Q_1$  — тепловой поток от теплоносителя ИНТ к промежуточному теплоносителю ТТ в  $I_{ТТ}$ , кВт;  $Q_2$  — тепловой поток от промежуточного теплоносителя ТТ к теплоносителю ТНУ в  $K_{ТТ}$ – $I_{ТНУ}$ , кВт;  $Q_3$  —  $Q_5$  — тепловые потоки от теплоносителя ТНУ к нагреваемому теплоносителю потребителя теплоты в  $K_{ТНУ}$  при охлаждении и конденсации пара и охлаждении конденсата теплоносителя ТНУ, кВт;  $Q_6$  — тепловой поток, передаваемый в  $ПО$ , кВт;  $L_{КМ}$  — работа, затрачиваемая в  $КМ$  ТНУ для повышения температурного уровня теплоносителя ТНУ от  $t_2$  до  $t_3$ , кВт

$t_{\text{ИТТ1}}$  поступает в испаритель ТТ ( $I_{\text{ТТ}}$ ), где охлаждается до температуры  $t_{\text{ИТТ2}}$ , отдавая теплоту  $Q_1$  промежуточному теплоносителю ТТ. Промежуточный теплоноситель ТТ испаряется при температуре  $t_{\text{S0}}$ . Пар промежуточного теплоносителя ТТ практически при этой же температуре по транспортной зоне поступает в конденсатор ТТ ( $K_{\text{ТТ}}$ ), который одновременно является испарителем ТНУ ( $I_{\text{ТНУ}}$ ). Транспортная зона представляет собой два отдельных теплоизолированных канала для пара и конденсата. При конденсации в  $K_{\text{ТТ}}$  выделяется теплота конденсации  $Q_2$ , которая передается теплоносителю ТНУ. Теплоноситель ТНУ испаряется и пар нагревается в промежуточном охладителе (ПО) до температуры  $t_2$  и затем поступает в компрессор ТНУ (КМ), где в результате его сжатия температура возрастает до  $t_3$ . При этом затрачивается работа на привод компрессора ТНУ  $L_{\text{КМ}}$ . В конденсаторе ТНУ пар охлаждается до  $t_{\text{S2}}$ , отдавая теплоту охлаждения  $Q_3$ , конденсируется при этой температуре с выделением теплоты конденсации  $Q_4$ . Конденсат охлаждается до температуры  $t_4$ , отдавая теплоту охлаждения  $Q_5$ . После конденсатора  $K_{\text{ТНУ}}$  конденсат охлаждается в ПО до температуры  $t_5$ , отдавая теплоту охлаждения  $Q_6$ . При дросселировании в дросселе (Др) температура конденсата меняется до  $t_6 = t_{\text{S1}}$ . Теплоноситель, поступающий к потребителю теплоты, нагревается в  $K_{\text{ТНУ}}$  от температуры  $t_{\text{B1}}$  до  $t_{\text{B2}}$ .

Тепловой баланс рассматриваемого комплекса выглядит следующим образом:

$$Q_2 + L_{\text{КМ}} = Q_3 + Q_4 + Q_5;$$

$$Q_2 = Q_1 - Q_{\text{ПОТ}},$$

где  $Q_{\text{ПОТ}}$  — потери теплоты в транспортной зоне ТТ, кВт.

Энергетическую эффективность ТНУ принято оценивать коэффициентом трансформации теплоты и эксергетическим КПД [6, 7]. Коэффициент трансформации (преобразования) теплоты определяется отношением полученной теплоты  $Q_{\text{ТНУ}}$  в ТНУ к затраченной работе  $N_{\text{КМ}}$ :

$$\mu = Q_{\text{ТНУ}}/N_{\text{КМ}}.$$

Эксергетический КПД учитывает не только количество полученной теплоты, но и ее качество, т. е. ее температурный уровень

$$\eta_{\text{е}} = Q_{\text{ТНУ}} \tau_q / N_{\text{КМ}}^{\text{э}},$$

где  $\tau_q$  — коэффициент работоспособности теплоты [6],

$$\tau_q = (T_{\text{B}} - T_{\text{OC}})/T_{\text{B}} = 1 - T_{\text{OC}}/T_{\text{B}},$$

здесь  $T_{\text{B}}$  — температура внешнего теплоносителя, поступающего к потребителю после конденсатора ТНУ, К;  $T_{\text{OC}}$  — температура окружающей среды, К.

Пределы изменения эксергетического КПД —  $0 \leq \eta_{\text{е}} \leq 1$ . Для реальных ТНУ коэффициент трансформации теплоты составляет  $\mu \cong 2,5 \dots 6$ , т. е. на каждый

затраченный 1 кВт·ч энергии в реальной ТНУ в конденсаторе можно использовать  $Q_{\text{ТНУ}} = 2,5 \dots 6$  кВт·ч теплоты, что принято считать основным преимуществом ТНУ перед другими способами получения теплоты (электронагрев, котельные и т. п.). При использовании ТНУ в большинстве случаев необходимы дополнительные затраты энергии для транспорта теплоты от низкопотенциального источника теплоты к испарителю. Для перекачки промежуточного теплоносителя используются насосы с электроприводом. В этом случае коэффициент трансформации теплоты в системе теплоснабжения с ТНУ следует определять как:

$$\mu = Q_{\text{ТНУ}} / (N_{\text{КМ}} + N_{\text{ТР}}).$$

Следует учитывать, что при использовании органического топлива на выработку электроэнергии и теплоты для работы компрессора ТНУ с электроприводом на среднестатистическом источнике электрической энергии затрачивается около 0,3445 кг.у.т./кВт·ч, тогда как на выработку теплоты на среднестатистическом источнике тепловой энергии потребляется около 0,1278 кг.у.т./кВт·ч. Из этого следует, что в среднем по Российской Федерации коэффициент трансформации теплоты в ТНУ должен быть существенно выше результата отношения  $3445/1278 = 2,70$ , т. е.  $\mu > 2,70$ . В конкретном случае применения ТНУ значение отношения, при котором ТНУ установка будет энергетически выгодна, определяется соотношением удельных расходов условного топлива на производство сопоставимых количеств электрической и тепловой энергии.

Реализованные проекты, в которых проводились исследования функционирования систем теплоснабжения, отмечены в [8 — 11].

В 2001 г. в московском микрорайоне Никулино-2 введены в строй два 17-этажных 82-квартирных жилых дома серии 111-355 МО. Строительный объем отапливаемой части 30133 м<sup>3</sup>, площадь жилых помещений 6582 м<sup>2</sup>, расчетное количество жителей 292. ОАО «Инсолар-Инвест» разработала систему горячего водоснабжения здания на основе тепловых насосов, использующих как нетрадиционный возобновляемый источник энергии — низкопотенциальное тепло грунта, так и вторичный энергетический ресурс — тепло вентиляционных выбросов.

В [9] приведены данные по результатам эксплуатации ТНУ, использующей теплоту грунта, в системе теплоснабжения сельской школы за отопительный период 2001/2002 г. Рассматривались два периода отопительного сезона: с 05.10.01 по 04.11.01 и с 05.11.01 по 23.03.02. Полученные показатели энергосбережения за первый месяц отопительного периода значительно отличаются в лучшую сторону от показателей других периодов отопления. При работе ТНУ происходит захлаживание грунта вокруг теплообменников отбора низкопотенциальной теплоты грунта, что приводит к понижению температуры ТН и, соответственно, снижению коэффициента трансформации теплоты  $\mu$ .

В [10] описана работа экспериментальной автоматизированной ТНУ, утилизирующей теплоту неочищенных сточных вод и предназначенной для подогрева водопроводной воды перед котлами районной тепловой станции (РТС) № 3 г. Зеленограда.

В [11] представлены результаты исследования опытной ТНУ, работающей в системе горячего водоснабжения жилого дома. В качестве низкопотенциальной теплоты используются теплота грунта и теплота канализационных стоков дома (рис. 4). Приведены данные по результатам исследования работы ТНУ в течение суток различных трех дней. В таблице продемонстрирована часть наиболее характерных результатов этих исследований. К сожалению, в [11] не указаны данные по расходу электроэнергии на привод циркуляционных насосов, обеспечивающих транспорт низкопотенциальной теплоты к испарителю ТНУ, что может существенно снизить реальную энергоэффективность системы в целом.

Из таблицы следует, что в [8] энергоэффективность ниже по сравнению с теплоснабжением от котельной, особенно, если утилизировать теплоту вентиляционных выбросов. В [9] установлена система теплоснабжения на основе ТНУ вместо электрод котлов. Несмотря на низкий коэффициент преобразования теплоты, данный вариант оказался более энергоэффективным. В [10] достигнут значительный экономический эффект, за счет подогрева воды в конденсаторе ТНУ перед котлом и большой мощности теплопотребления. Оценить результаты работы [11] не представляется возможным из-за недостатка информации.

Для повышения энергоэффективности систем теплоснабжения на основе ТНУ следует применять более дешевую энергию на привод компрессора, сокращать энергопотребление на транспорт теплоты от низкопотенциального источника теплоты [5], брать источник низкопотенциальной теплоты с более высокой температурой. Например, используя теплоту солнечного из-

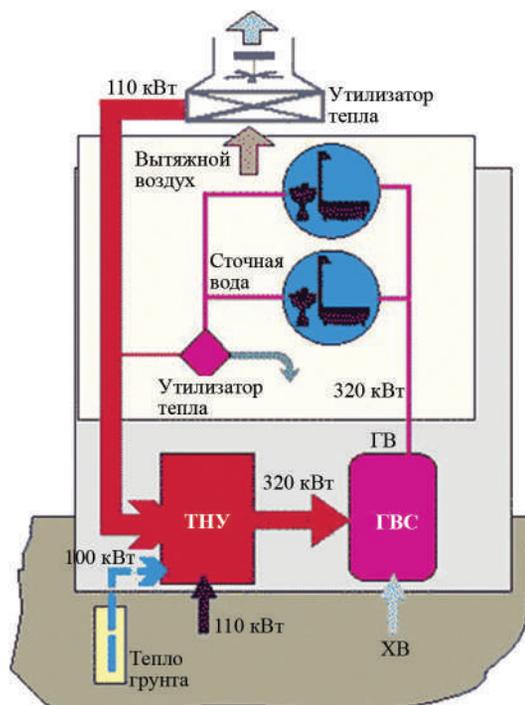


Рис. 4. Принципиальная схема инженерных систем экспериментального энергоэффективного дома с применением ТНУ.

лучения в испарителе ТНУ при температуре более высокой, чем окружающий воздух, грунт, грунтовые воды и т. п., солнечные коллекторы повышают коэффициент преобразования теплоты в ТНУ [12] (рис. 5).

Автономная система теплоснабжения представляет собой солнечно-теплонасосную установку, предназначенную для обеспечения нужд отопления и горячего водоснабжения в течение всего года. Система состоит из четырех контуров: теплоприемного циркуляционного солнечный коллектор – бак – аккумулятор, циркуляционного бак – аккумулятор – испаритель, контуров

#### Результаты исследования работы теплонасосных установок

Источник	Показатели					
	$Q_{ТНУ}$ , кВт·ч	$N_{КМ}$ , кВт·ч	$\mu_{ТНУ}$	$N_{ТР}$ , кВт·ч	$\Sigma N_3$ , кВт·ч	$\mu$ системы $Q_{ТНУ} / \Sigma N_3$
[8]	36,8	10,4	3,53	7,0 без. вент. 15,0 с вент.	17,4 без. вент. 25,4 с вент.	2,11 без. вент. 1,45 с вент.
[9]	153,68	31,59	4,86	16,06	47,65	3,22
	64,19	45,6	2,52	7,58	53,18	1,21
	69,00	25,79	2,68	4,90	30,69	2,25
[10]	1980	585	3,39	93,6	678,6	2,92
	1623	503	3,23	45,27	548,27	2,96
[11]	17,15	4,93	3,48	—	—	—
	17,07	4,93	3,46	—	—	—
	18,06	5,38	3,36	—	—	—
	18,04	5,38	3,35	—	—	—
	18,58	5,40	3,44	—	—	—
	22,86	6,33	3,61	—	—	—

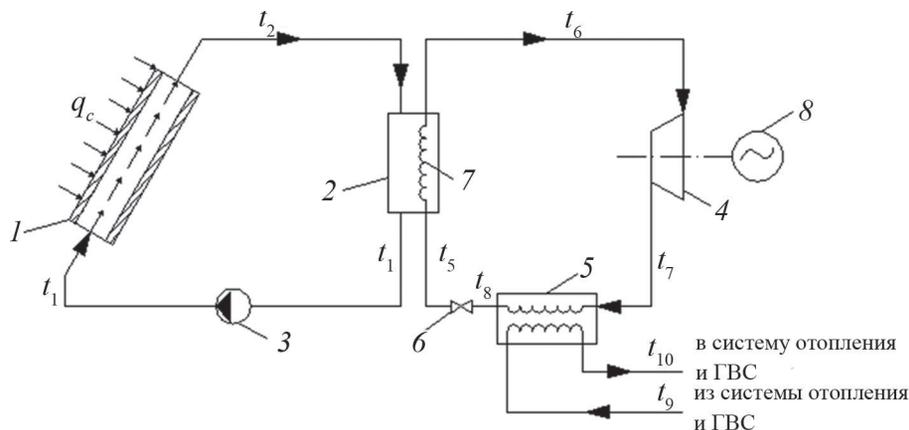


Рис. 5. Принципиальная схема солнечной ТНУ с погруженным испарителем:

1 — солнечный коллектор; 2 — бак — аккумулятор; 3 — циркуляционный насос; 4 — компрессор; 5 — конденсатор; 6 — дроссель; 7 — испаритель; 8 — электродвигатель

теплонасосной установки, отопления и горячего водоснабжения. Система работает следующим образом. Вода в коллекторе нагревается и передает тепло баку-аккумулятору. Тепловая нагрузка от бака к испарителю передается с помощью циркуляционного контура. Парообразный рабочий агент (фреон) после сжатия в компрессоре конденсируется в конденсаторе, нагревая при этом воду в системе отопления и горячего водоснабжения. При отсутствии солнечной радиации, тепловой насос расходует энергию, запасенную в баке.

На практике в качестве теплоносителя, передающего теплоту от коллектора к испарителю теплового насоса, используется вода. Весьма эффективным является использование баков-аккумуляторов. Теплота от солнечного коллектора подается в жидкостный тепловодный аккумулятор, куда непосредственно погружен испаритель или же организован циркуляционный контур бак-аккумулятор — испаритель. Принципиальная схема установки с погруженным испарителем приведена на рис. 6. Солнечная радиация, попадая на приемную панель коллектора, нагревает теплоноситель (воду). Из коллектора нагретый теплоноситель поступает в массивный тепловой аккумулятор, куда погружены трубки

испарителя. С помощью теплового насоса повышается температурный потенциал от значения температуры испарения до значения температуры конденсации рабочего агента. Тепловая нагрузка конденсатора идет на нужды отопления и горячего водоснабжения.

На рисунке 7 показана схема с наличием циркуляционного контура бак — аккумулятор — испаритель. Циркуляционный насос позволяет регулировать расход теплоносителя, тем самым более гибко формируя количество теплоты, передаваемое из бака-аккумулятора в испаритель. Наличие дополнительного циркуляционного насоса ведет к повышению эксплуатационных затрат на установку.

В [13] предложено использовать ТНУ в тепловом пункте централизованной системы теплоснабжения для горячего водоснабжения. Источником низкопотенциальной теплоты является теплота воды обратной тепловой сети, имеющей относительно высокую температуру (рис. 8), кроме того, предусмотрена возможность использования внешнего источника низкопотенциальной теплоты с достаточно высокой температурой.

При такой схеме включения ТНУ уменьшаются нагрузка на центральном теплогенераторе и температура

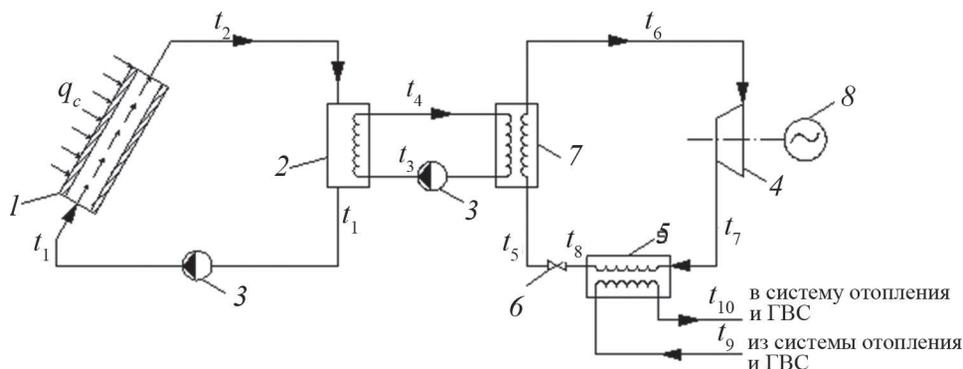


Рис. 6. Принципиальная схема солнечной ТНУ с наличием циркуляционного контура бак — аккумулятор — испаритель:

1 — солнечный коллектор; 2 — бак аккумулятор; 3 — циркуляционный насос; 4 — компрессор; 5 — конденсатор; 6 — дроссель; 7 — испаритель; 8 — электродвигатель

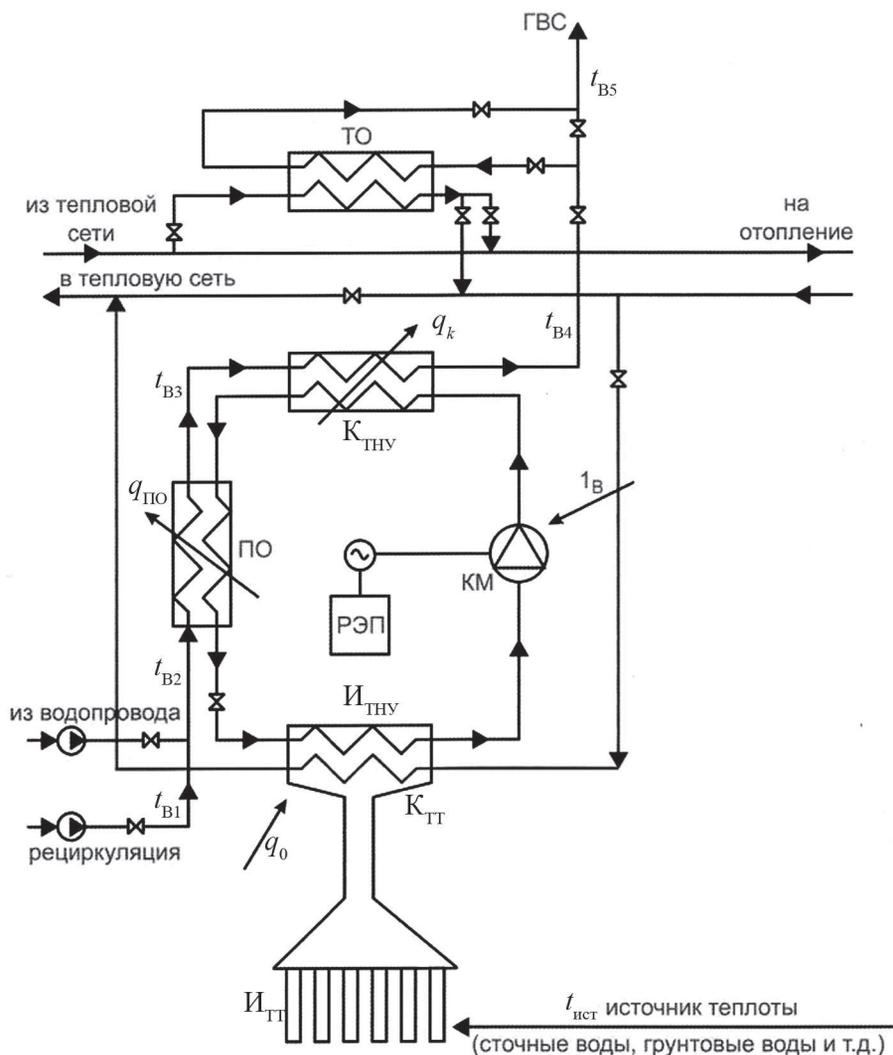


Рис. 7. Варианты схем включения ТНУ в централизованную систему теплоснабжения:

КМ — компрессор;  $K_{ТНУ}$ ,  $I_{ТНУ}$ ,  $K_{ТТ}$ ,  $I_{ТТ}$  конденсатор и испаритель ТНУ и ТТ; ПО — переохладитель; ТТ — тепловая труба; РЭП — регулятор электропривода; ТО — теплообменник

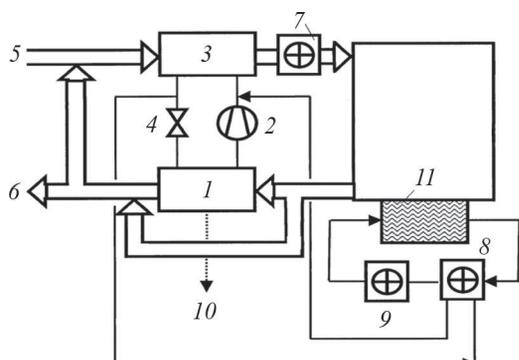


Рис. 8. Принципиальная схема использования ТНУ в системе поддержания микроклимата плавательного бассейна:

1 — испаритель; 2 — компрессор; 3 — воздушный конденсатор; 4 — ТРВ; 5 — наружный воздух; 6 — канал удаляемого воздуха; 7 — дополнительный воздухоподогреватель; 8 — водоохлаждаемый конденсатор; 9 — дополнительный подогреватель воды для чаши бассейна; 10 — дренаж; 11 — чаша бассейна [23]

обратной сетевой воды. Особенно это важно при ограниченной мощности существующей системы теплоснабжения.

Одно из направлений использования ТНУ — применение теплонасосных установок в системах обеспечения микроклимата зданий, требующих затрат тепловой энергии [14 — 24]. При применении ТНУ в системах обеспечения микроклимата в качестве низкопотенциального источника теплоты, как правило, используется вытяжной вентиляционный воздух. Получаемая теплота используется как для термовлажностной обработки воздуха, включающей нагрев, охлаждение и осушку воздуха [14 — 19, 21 — 24], так и в любых теплопотребляющих системах, например, в системах подготовки горячей воды [20].

В работах [17 — 19] даны описание и результаты численного исследования схемы теплоснабжения жилых зданий на базе ТНУ, в которых в качестве ис-

точников низкопотенциальной теплоты предлагалось использование вентиляционных выбросов и канализационных стоков. Анализ показал, что использование ТНУ позволяет снизить финансовые эксплуатационные затраты в три раза при трехставочном тарифе на электроэнергию.

В ряде работ, включая зарубежных авторов, рассматривалось применение тепловых насосов на нужды теплоснабжения в помещениях с повышенной влажностью [20 — 24], в том числе в плавательных бассейнах.

Так, на рис. 8 представлена принципиальная схема применения ТНУ в системе обеспечения микроклимата плавательного бассейна [23]. В [23] было произведено сравнение энергопотребления при использовании трех различных схем: с использованием ТНУ, абсорбционного осушителя, а также схемы без применения дополнительных средств утилизации (во всех трех схемах была взята первая рециркуляция). При сопоставлении схем брались экспериментальные данные, полученные в ходе испытания «пилотной» системы поддержания микроклимата плавательного бассейна с применением абсорбционного осушителя (место расположения объекта — Швеция). Проведенные численные исследования показали 14 %-ое снижение годовых энергозатрат. Срок окупаемости вышеописанной системы по оценкам авторов составляет около 12 лет. Как отмечают авторы, оптимизация данного параметра может оказать существенное влияние на результаты расчетов.

Принципиальная схема утилизации теплоты вытяжного воздуха плавательного бассейна на базе ТНУ представлена на рис. 9 [20]. Основными элементами системы являются теплонасосная установка 1, буферный бак-накопитель смешивающего типа 3; крышный вентилятор 10, утилизатор теплоты вытяжного воздуха в составе конденсационного теплообменника-утилизатора 2 и циркуляционного контура с промежуточным

теплоносителем. В отличие от схемы, приведенной в [23], утилизация теплоты вытяжного воздуха осуществляется благодаря установке с промежуточным теплоносителем (УПТ). Применение промежуточного теплоносителя позволяет проводить глубокую утилизацию теплоты вентиляционных выбросов, поскольку температура поверхности теплопередачи снижается ниже температуры точки росы. Это возможно при использовании в качестве промежуточного теплоносителя антифриза — 45 %-го пропиленгликоля. Результаты исследования показали, что при существующем уровне цен на тепловую и электрическую энергию, применение ТНУ в системах горячего водоснабжения целесообразно, с точки зрения затрат энергоносителя, при соотношении коэффициента преобразования  $\mu \geq 2,5...3,0$ . Оптимальными режимами работы ТНУ считаются режимы, в которых разность температур конденсации и испарения не выше примерно 30 °С, при этом коэффициент преобразования выше четырех (рис. 10).

Таким образом, величина коэффициента преобразования зависит от:

- требуемой температуры для потребителя ( $T_B$ ) и температуры холодного источника ( $T_H$ );
- термодинамических свойств рабочего вещества и особенностей термодинамического цикла ТНУ;
- технического совершенства конструкции ТНУ;
- вида энергетических затрат на привод компрессора и способа транспорта теплоты от низкопотенциального источника.

В первом приближении можно считать, что коэффициент  $\mu$  зависит от разности температур ( $T_B - T_H$ ). Чем она меньше, тем выше коэффициент  $\mu$ . В качестве примера на рис. 10 дана зависимость коэффициента трансформации от разности температур испарения и конденсации, полученная по результатам испытания ТНУ в системе теплоснабжения бассейна [20].

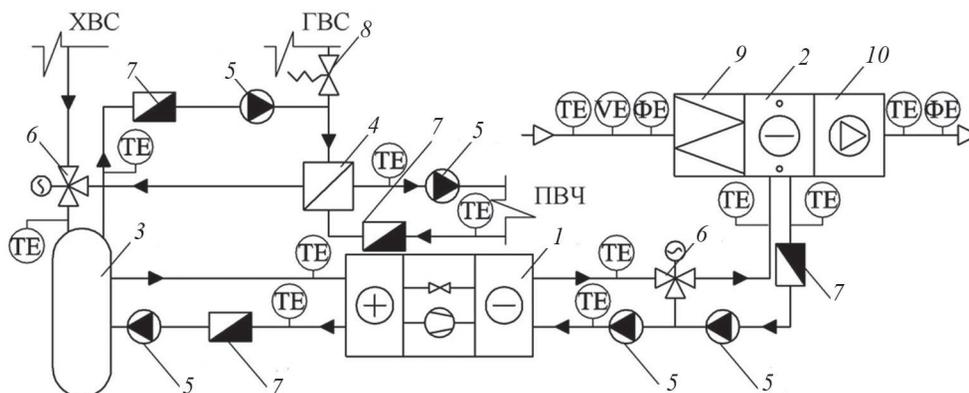


Рис. 9. Функциональная схема установки для исследования процессов утилизации теплоты вентиляционных выбросов на основе ТНУ в бассейне НИУ «МЭИ» [20]:

1 — теплонасосная установка; 2 — воздухоохладитель (трубчатый оребренный теплообменник); 3 — буферный бак-накопитель; 4 — промежуточный теплообменник (пластинчатый теплообменник); 5 — циркуляционный насос; 6 — смешивающий клапан с электроприводом; 7 — электромагнитный расходомер; 8 — соленоидный клапан; 9 — карманный фильтр; 10 — вентилятор; TE — термометр сопротивления платиновый (аналоговый датчик); VE — преобразователь скорости потока (аналоговый датчик); FE — емкостный аналоговый датчик относительной влажности воздуха

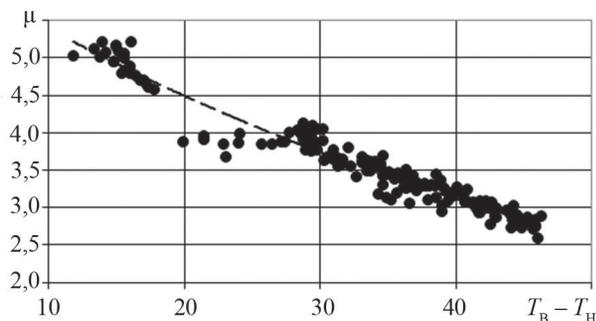


Рис. 10. Зависимость коэффициента трансформации теплоты  $\mu$  от разности температур конденсации и испарения по результатам испытания теплового насоса Nibe F1330-60

Для высокой эффективности систем теплоснабжения на основе ТНУ (СТ ТНУ) следует иметь источник низкопотенциальной теплоты с наиболее высокой температурой и по возможности более низкую температуру для потребителя теплоты. Наличие удобных источников низкопотенциальной теплоты, которые обладали бы зимой и летом достаточно высокой температурой, не требовали бы больших затрат на их перекачку и не вызывали бы коррозии теплообменных аппаратов и труб, — одно из важнейших условий применения ТНУ для теплоснабжения.

Вопросы применения СТ ТНУ в конкретных условиях требуют тщательного предварительного технико-экономического исследования. Коэффициент трансформации (преобразования) теплоты в ТНУ далеко не всегда является определяющим при оценке энергетической эффективности использования СТ ТНУ. Дополнительно стоит учитывать, что на привод компрессора ТНУ и транспорт низкопотенциальной теплоты от источника к испарителю ТНУ желательнее использовать наиболее дешевый вид энергии.

Для привода компрессора ТНУ в ряде случаев эффективны энергия избыточного давления энергоносителей (газа, пара, воды и т.п.), механическая энергия ДВС, ГТУ и т.п.

При использовании ТНУ с электроприводом, энергоэффективность применения ТНУ зависит от соотношения тарифов на электроэнергию и теплоту.

## Литература

1. Хайнрих Г. и др. Теплонасосные установки для отопления и горячего водоснабжения. М.: Стройиздат, 1985.
2. Гашо Е.Г. и др. Тепловые насосы в современной промышленности и коммунальной инфраструктуре. М.: Изд-во «Перо», 2017.
3. Распоряжение Правительства РФ № 1715-р. от 13.10.2009 г. «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года».
4. Постановление Правительства Российской Федерации № 600 от 17.06.2015 г. «Об утверждении перечня объектов и технологий, которые относятся к объектам и технологиям высокой энергетической эффективности».
5. Рудицер М.И., Шелгинский А.Я. Разработка систем теплоснабжения на основе комплексного использования теплонасосных установок и тепловых труб // Надежность и безопасность энергетики. 2013. № 2 (21). С. 34—36.
6. Бродянский В.М. и др. Эксергетический метод и его приложения. М.: Энергоатомиздат, 1986.
7. Мартыновский В.С. Циклы, схемы и характеристики термотрансформаторов. М.: Энергия, 1979.
8. Васильев Г.П. Энергоэффективный экспериментальный жилой дом в микрорайоне Никулино-2 // АВОК: вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2002. № 4. С. 10—18.
9. Васильев Г.П., Крундышев Н.С. Энергоэффективная сельская школа в Ярославской области // АВОК: вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2002. № 5. С. 22—26.
10. Васильев Г.П., Абуев И.М., Горнов В.Ф. Автоматизированная теплонасосная установка, утилизирующая тепло сточных вод г. Зеленограда // АВОК: вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2004. № 5. С. 50—52.
11. Гершкович В.Ф. Исследование работы теплового насоса // Энергосбережение. 2007. № 5. С. 32—41.
12. Мягков С.А., Шелгинский А.Я. Расчет активной системы солнечного теплоснабжения с использованием солнечной теплонасосной установки // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. XVI Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. С. 481—482.
13. Фролов В.П. и др. Анализ эффективности использования тепловых насосов в централизованных системах горячего водоснабжения // Энергосбережение. 2004. № 2. С. 50—53.
14. Васильев Г.П. Теплоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев земли. М.: Гранита, 2006.
15. Васильев Г.П. и др. Приточно-вытяжная вентиляционная установка с теплонасосной рекуперацией тепла вентиляционных выбросов // Энергобезопасность и энергосбережение. 2012. № 6. С. 14—21.
16. Кокорин О.Я., Товарец Н.В. Круглогодичное обеспечение жилых и общественных зданий теплом и холодом с помощью холодильных машин. Ч. 1 // Холодильная техника. 2010. № 6. С. 45—48.
17. Кокорин О.Я., Товарец Н.В. Круглогодичное обеспечение жилых и общественных зданий теплом и

холодом с помощью холодильных машин Ч. 2 // Холодильная техника. 2010. № 7. С. 34—37.

18. **Кокорин О.Я., Товаре Н.В.** Экономические преимущества применения холодильных машин для выработки тепла и холода в жилых зданиях // Холодильная техника. 2010. № 8. С. 39—42.

19. **Кокорин О.Я.** Современные системы кондиционирования воздуха. М.: Изд-во физ.-мат. лит.-ры, 2003.

20. **Яковлев И.В., Гаряев А.Б., Парехина И.В., Самойленко В.Ю.** Сопоставление теоретической и реальной эффективности теплонасосной установки в системе горячего водоснабжения // Промышленная энергетика. 2015. № 5. С. 45—50.

21. **Peng Sun, Jing Yi Wu, Ru Zhu Wang, Yu Xiong Xu.** Analysis of Indoor Environmental Conditions and Heat Pump Energy Supply Systems in Indoor Swimming Pools // Energy and Buildings. 2011. No. 43. Pp. 1071—1080.

22. **Johansson L., Westerlund L.** Energy Savings in Indoor Swimming Pools: Comparison Between Different Heat Recovery Systems // Appl. Energy. 2001. No. 70. Pp. 281—303.

23. **Chung-Kuan Kung, Wen-Shing Lee.** Optimization of Heat Pump System in Indoor Swimming Pool Using Particle Swarn Algorithm // Appl. Thermal Energy. 2008. No. 8. Pp. 1647—1653.

24. **Chua K.J., Chou S.K., Yang W.M.** Advances in Heat Pump Systems: a Review // Appl. Energy. 2010. No. 87. Pp. 3611—3624.

## References

1. **Haynrih G. i dr.** Teplonasosnye Ustanovki dlya Otopleniya i Goryachego Vodonasabzheniya. M.: Stroyizdat, 1985. (in Russian).

2. **Gasho E.G. i dr.** Teplovye Nasosy v Sovremennoy Promyshlennosti i Kommunal'noy Infrastrukture. M.: Izd-vo «Pero», 2017. (in Russian).

3. **Rasporyazhenie** Pravitel'stva RF № 1715-r. ot 13.10.2009 g. «Energeticheskaya Strategiya Rossii na Period do 2030 Goda». (in Russian).

4. **Postanovlenie** Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii № 600 ot 17.06.2015 g. «Ob Utverzhdenii Perechnya Ob'ektov i Tekhnologiy, Kotorye Otnosyatsya k Ob'ektam i Tekhnologiyam Vysokoy Energeticheskoy Effektivnosti». (in Russian).

5. **Ruditser M.I., Shelginskiy A.Ya.** Razrabotka Sistem Teplohadosnabzheniya na Osnove Kompleksnogo Ispol'zovaniya Teplonasosnyh Ustanovok i Teplovyh Trub. Nadezhnost' i Bezopasnost' Energetiki. 2013;2 (21):34—36. (in Russian).

6. **Brodyanskiy V.M. i dr.** Eksergeticheskyy Metod i Ego Prilozheniya. M.: Energoatomizdat, 1986. (in Russian).

7. **Martynovskiy V.S.** Tsikly, Skhemy i Harakteristiki Termotransformatorov. M.: Energiya, 1979. (in Russian).

8. **Vasil'ev G.P.** Energoeffektivnyy Eksperimental'nyy Zhiloy Dom v Mikrorayone Nikulino-2. AVOK: Ventilyatsiya, Otoplenie, Konditsionirovanie Vozduha, Teplosnabzhenie i Stroitel'naya Teplofizika. 2002;4:10—18. (in Russian).

9. **Vasil'ev G.P., Krundyshev N.S.** Energoeffektivnaya Sel'skaya Shkola v Yaroslavskoy Oblasti. AVOK: Ventilyatsiya, Otoplenie, Konditsionirovanie Vozduha, Teplosnabzhenie i Stroitel'naya Teplofizika. 2002;5:22—26. (in Russian).

10. **Vasil'ev G.P., Abuev I.M., Gornov V.F.** Avtomatizirovannaya Teplonasosnaya Ustanovka, Utiliziruyushchaya Teplo Stochnyh Vod g. Zelenograda. AVOK: Ventilyatsiya, Otoplenie, Konditsionirovanie Vozduha, Teplosnabzhenie i Stroitel'naya Teplofizika. 2004;5:50—52. (in Russian).

11. **Gershkovich V.F.** Issledovanie Raboty Teplovogo Nasosa. Energoberezhenie. 2007;5:32—41. (in Russian).

12. **Myagkov S.A., Shelginskiy A.Ya.** Raschet Aktivnoy Sistemy Solnechnogo Teplosnabzheniya s Ispol'zovaniem Solnechnoy Teplonasosnoy Ustanovki. Radioelektronika, Elektrotehnika i Energetika: Tez. Dokl. XVI Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf. Studentov i Aspirantov. T. 2. M.: Izdatel'skiy Dom MPEI, 2010: 481—482. (in Russian).

13. **Frolov V.P. i dr.** Analiz Effektivnosti Ispol'zovaniya Teplovyh Nasosov v Tsentralizovannyh Sistemah Goryachego Vodonasabzheniya. Energoberezhenie. 2004;2:50—53. (in Russian).

14. **Vasil'ev G.P.** Teplohadosnabzhenie Zdaniy i sooruzheniy s Ispol'zovaniem Nizkopotentsial'noy Teplovoy Energii Poverhnostnyh Sloev Zemli. M.: Granitsa, 2006. (in Russian).

15. **Vasil'ev G.P. i dr.** Pritochno-vytyazhnaya Ventilyatsionnaya Ustanovka s Teplonasosnoy Rekuperatsiyey Tepla Ventilyatsionnyh Vybrosov. Energobezopasnost' i Energoberezhenie. 2012;6:14—21. (in Russian).

16. **Kokorin O.Ya., Tovars N.V.** Kruglogodichnoe Obespechenie Zhilyh i Obshchestvennyh Zdaniy Teplom i Holodom s Pomoshch'yu Holodil'nyh Mashin. Ch. 1. Holodil'naya Tekhnika. 2010;6:45—48. (in Russian).

17. **Kokorin O.Ya., Tovars N.V.** Kruglogodichnoe Obespechenie Zhilyh i Obshchestvennyh Zdaniy Teplom i Holodom s Pomoshch'yu Holodil'nyh Mashin Ch. 2. Holodil'naya Tekhnika. 2010;7:34—37. (in Russian).

18. **Kokorin O.Ya., Tovars N.V.** Ekonomicheskie Preimushchestva Primeneniya Holodil'nyh Mashin Dlya Vyrabotki Tepla i Holoda v Zhilyh Zdaniyah. Holodil'naya Tekhnika. 2010;8:39—42. (in Russian).

19. **Kokorin O.Ya.** Sovremennyye Sistemy Konditsionirovaniya Vozduha. M.: Izd-vo Fiz.-mat. Lit.-ry, 2003. (in Russian).

20. **Yakovlev I.V., Garyaev A.B., Parekhina I.V., Samoylenko V.Yu.** Sopostavlenie Teoreticheskoy i

Real'noy Effektivnosti Teplonasosnoy Ustanovki v Sisteme Goryachego Vodosnabzheniya. Promyshlennaya Energetika. 2015;5:45—50. (in Russian).

21. **Peng Sun, Jing Yi Wu, Ru Zhu Wang, Yu Xiong Xu.** Analysis of Indoor Environmental Conditions and Heat Pump Energy Supply Systems in Indoor Swimming Pools. Energy and Buildings. 2011;43:1071—1080.

22. **Johansson L., Westerlund L.** Energy Savings in Indoor Swimming Pools: Comparison Between Different Heat Recovery Systems. Appl. Energy. 2001;70:281—303.

23. **Chung-Kuan Kung, Wen-Shing Lee.** Optimization of Heat Pump System in Indoor Swimming Pool Using Particle Swarn Algorithm. Appl. Thermal Energy. 2008;8:1647—1653.

24. **Chua K.J., Chou S.K., Yang W.M.** Advances in Heat Pump Systems: a Review. Appl. Energy. 2010;87:3611—3624.

---

### Сведения об авторах

---

**Шелгинский Александр Яковлевич** — доктор технических наук, профессор кафедры промышленных теплоэнергетических систем НИУ «МЭИ», e-mail: shelginskyay@yandex.ru

**Яковлев Игорь Васильевич** — кандидат технических наук, профессор кафедры теплообменных процессов и установок НИУ «МЭИ», e-mail: YakovlevIV@mpei.ru

---

### Information about authors

---

**Shelginsky Aleksandr Ya.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Industrial Heat Engineering Systems Dept., NRU MPEI, e-mail: shelginskyay@yandex.ru

**Yakovlev Igor V.** — Ph.D. (Techn.), Professor of Heat-and-Mass Exchange Processes and Installations Dept., NRU MPEI, e-mail: YakovlevIV@mpei.ru

*Статья поступила в редакцию 05.06.2017*