

УДК 658.264

DOI: 10.15587/1729-4061.2017.92495

Запропоновано ефективні схемні рішення альтернативної системи гарячого водопостачання. Виконано моделювання теплових процесів в акумуляторах теплоти при різних способах підключення генераторів теплоти та споживачів. Проведено експериментальні дослідження системи гарячого водопостачання на базі теплового насосу при різних температурних режимах

Ключові слова: акумулювання теплоти, геліосистема, тепловий насос, комбіновані системи теплостачання, фазовий перехід

Предложены перспективные схемные решения альтернативной системы горячего водоснабжения. Выполнено моделирование тепловых процессов в аккумуляторах теплоты при различных способах подключения генераторов теплоты и потребителей. Проведены экспериментальные исследования системы горячего водоснабжения на базе теплового насоса при различных температурных режимах

Ключевые слова: аккумулярование теплоты, гелиосистема, тепловой насос, комбинированные системы теплоснабжения, фазовый переход

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЕПЛОНАСОСНЫХ СИСТЕМ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ С ДВУХСТУПЕНЧАТЫМ АКУМУЛИРОВАНИЕМ ТЕПЛОТЫ

А. С. Мазуренко

Доктор технических наук, профессор, директор института
Институт энергетике и компьютерно-интегрированных систем управления**

E-mail: antmaz@i.ua

А. Е. Денисова

Доктор технических наук, профессор*
E-mail: alladenysova@gmail.com

Г. А. Баласаян

Доктор технических наук, профессор*
E-mail: bageal1@rambler.ru

А. А. Климчук

Кандидат технических наук, доцент*
E-mail: aklimchuk74@rambler.ru

К. И. Борисенко

Кандидат технических наук, доцент*
Кафедра водоснабжения

Одесская государственная академия
строительства и архитектуры
ул. Дидрихсона, 4, г. Одесса, Украина, 65029

E-mail: nefertichtvo@ukr.net

*Кафедра тепловых электрических станций и
энергосберегающих технологий**

**Одесский национальный политехнический университет
пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044

1. Введение

Одним из направлений решения стратегического вопроса снижения потребления ископаемых топлив является применение комбинированных систем теплоснабжения с использованием возобновляемых источников энергии [1]. В настоящее время правительством Украины стимулируются меры, направленные на снижение потребления природного газа [2].

Наибольшее развитие среди населения и предприятий малого и среднего бизнеса получили пеллетные котлы и электрические котлы, с использованием ночного тарифа на электроэнергию. Использование ночного тарифа на электроэнергию позволяет не только снизить потребление традиционного топлива, но и несколько выровнять нагрузку на энергосистему Украины [3].

Однако данные решения не используют в полной мере потенциал возобновляемых источников энергии,

в первую очередь тепловых насосов и солнечных коллекторов. Как известно, эффективное использование возобновляемых источников энергии невозможно без аккумуляторов теплоты, которые позволяют сгладить неравномерность генерации и потребления теплоты [4]. Например, для гелиосистем указанная неравномерность обусловлена несовпадением суточных пиков интенсивности солнечной радиации и потребности в горячей воде.

Следует отметить, что эффективное использование возобновляемых источников энергии в комбинированных системах теплоснабжения с применением аккумуляторов теплоты зависит от ряда факторов. В основном на эффективность использования влияют климатические условия, однако не последнюю роль играют и схемные системы теплоснабжения теплоносителей. Особый интерес представляют схемные решения, позволяющие максимально использовать энергию солнца и режимы

работы теплового насоса в диапазоне наибольшей его эффективности [5].

Поскольку разные возобновляемые источники низкопотенциальной энергии для теплового насоса имеют ограничения по применению, связанные с непостоянством энергетического потенциала, зависящего от климатических условий, актуальным является определение диапазона эффективной работы альтернативных систем теплоснабжения с применением аккумуляторов энергии.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Проблеме эффективного использования возобновляемых источников теплоты, в том числе и для приготовления горячей воды, уделяется большое внимание [4–8]. Основное внимание уделяется согласованию режимов работы генераторов теплоты и потребителей, а также особенностям использования возобновляемых источников теплоты совместно с традиционными системами теплоснабжения.

Следует отметить, что ведущие фирмы производители теплоэнергетического оборудования разработали рекомендации схемных решений использования возобновляемых источников теплоты [9], однако они, как правило, направлены на совершенствование гидравлических характеристик работы традиционных и альтернативных систем, а также на согласование системы автоматизации объекта исследования.

Из всего многообразия реализуемых на практике схемных решений комбинированных систем теплоснабжения наибольший интерес представляют:

1. Бивалентный водонагреватель-аккумулятор с двумя источниками теплоты – газового котла и солнечного коллектора (рис. 1).

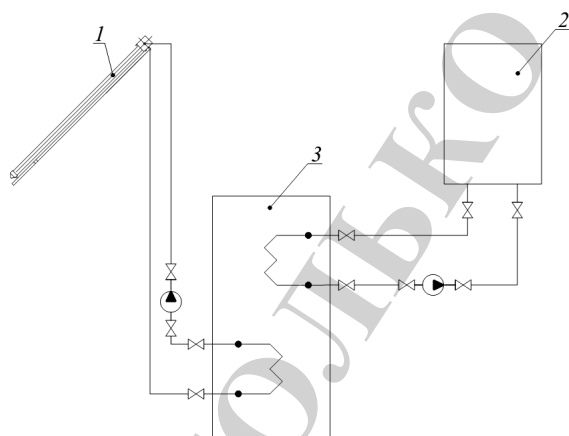


Рис. 1. Комбинированная схема приготовления горячей воды от двух источников теплоты с использованием бивалентного водонагревателя-аккумулятора:
1 – солнечный коллектор, 2 – газовый котел,
3 – бивалентный водонагреватель-аккумулятор

Схема на рис. 1 позволяет в одном баке готовить горячую воду, используя теплоту контура гелиосистемы в нижнем теплообменнике водонагревателя-аккумулятора, и далее догревать ее с помощью газового котла в верхнем теплообменнике.

Недостатками рассмотренной схемы является:

- низкая теплоотдача за счет преимущественно свободной конвекции в баке-аккумуляторе [10];
- неразвитая поверхность теплообмена змеевикового теплообменника водонагревателя-аккумулятора приводит к резкому снижению теплопроизводительности гелиосистемы при низких температурах в контуре солнечного коллектора [11];
- ограничение температуры теплоносителя контура гелиосистемы, что особенно сказывается в зимний период [10].

Интенсификацию теплообмена между теплоносителем гелиосистемы и горячей водой аккумулятора теплоты можно решить путем установки компактного выносного пластинчатого теплообменного аппарата с развитой поверхностью нагрева (рис. 2).

2. Комбинированная схема с интенсификацией процесса теплообмена за счет установки выносного пластинчатого теплообменного аппарата (рис. 2).

В комбинированной схеме приготовления горячей воды вопрос интенсификации теплообмена со стороны гелиосистемы решается путем применения выносного пластинчатого теплообменного аппарата и циркуляционного насоса. Однако недостатком этой схемы остается проблема ограничения температуры теплоносителя контура солнечных коллекторов.

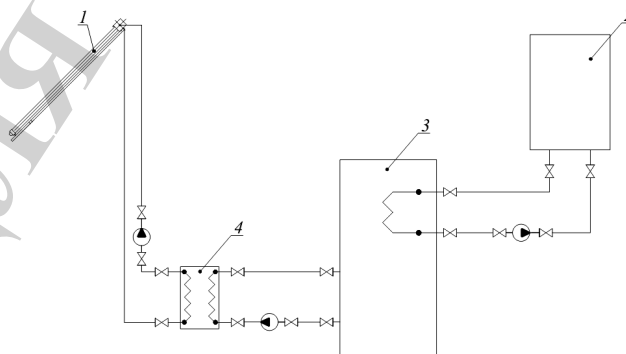


Рис. 2. Комбинированная схема приготовления горячей воды с использованием пластинчатого теплообменного аппарата и моновалентного водонагревателя-аккумулятора:
1 – солнечный коллектор, 2 – газовый котел,
3 – моновалентный водонагреватель-аккумулятор,
4 – пластинчатый теплообменный аппарат

3. Комбинированная схема приготовления горячей воды с использованием двух ступенчатого подогрева (рис. 3).

В рассматриваемой схеме предусмотрено использование двух ступеней приготовления горячей воды, предназначено для расширения температурного диапазона работы контура гелиосистемы.

В представленном схемном решении (рис. 3) реализуется возможность использования низкопотенциальной теплоты от контура солнечного коллектора для подогрева горячей воды в первой ступени бака-аккумулятора. При этом, температура теплоносителя может быть ниже 40 °С, что нельзя реализовать в схемах, представленных ранее (рис. 1, 2). Недостатком этой схемы является использование резервного источника энергии, при этом коэффициент замещения органического топлива составляет менее 50 %.

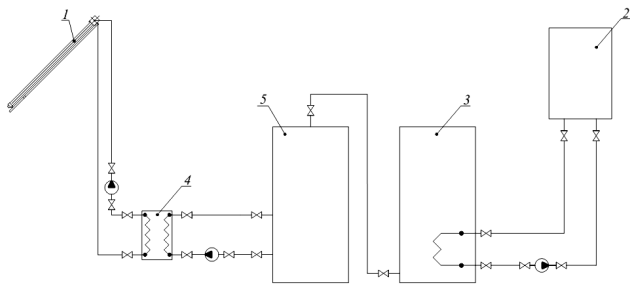


Рис. 3. Комбинированная схема приготовления горячей воды с использованием двух ступеней приготовления горячей воды: 1 — солнечный коллектор, 2 — газовый котел, 3 — моновалентный водонагреватель-аккумулятор (2-я ступень нагрева), 4 — пластинчатый теплообменный аппарат, 5 — аккумулятор горячей воды (1-я ступень нагрева)

Догрев горячей воды до требуемой температуры (не ниже $50\text{ }^{\circ}\text{C}$) производится в отдельном контуре, состоящем из моновалентного водонагревателя-аккумулятора 2-ой ступени и газового котла. К недостаткам рассмотренной схемы (рис. 3) можно отнести большое количество энергетического оборудования, и, как следствие, повышение стоимости системы, а также потребность в избыточных площадях помещений для его размещения.

4. Комбинированная система с использованием теплового насоса и солнечного коллектора (рис. 4), которая позволяет применять тепловой насос в зоне его наибольшей эффективности и, одновременно, уменьшить количество солнечных коллекторов для целей горячего водоснабжения [12]. При этом базовую нагрузку подогрева горячей воды обеспечивает тепловой насос (до температуры $35\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$), а температурный режим в подающей магистрали теплового насоса не превышает $40\text{--}45\text{ }^{\circ}\text{C}$, что обеспечивает энергоэффективность схемы.

Однако рассматриваемая схема обеспечивает среднегодовой коэффициент замещения традиционной энергии менее 50% [6], что делает невозможным обойтись без дублера энергии.

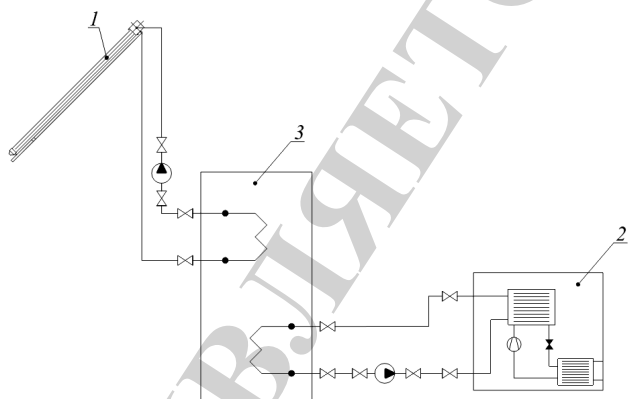


Рис. 4. Комбинированная схема приготовления горячей воды с использованием теплового насоса и геосистемы: 1 — солнечный коллектор, 2 — тепловой насос, 3 — бивалентный водонагреватель

5. Схема приготовления горячей воды от контура рекуперации теплоты конденсации холодильной машины (рис. 5).

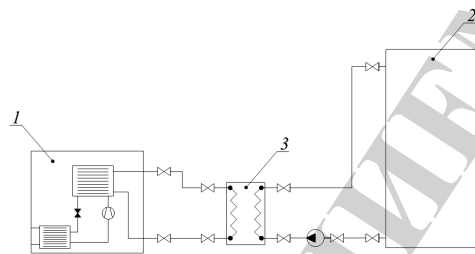


Рис. 5. Система приготовления горячей воды от контура рекуперации теплоты конденсации холодильной машины: 1 — холодильная машина, 2 — аккумулятор горячей воды, 3 — пластинчатый теплообменный аппарат

Одной из разновидностей схемы использования тепла конденсации холодильной машины в летний период для приготовления горячей воды является схема с рекуперацией теплоты конденсации в отдельном контуре [13]. При этом современные системы кондиционирования с использованием одноступенчатых парокомпрессионных холодильных машин могут комплектоваться контуром рекуперации тепла конденсации. При этом по располагаемой тепловой мощности указанные системы способны обеспечить потребности в горячем водоснабжении зданий. Температура конденсации холодильных машин систем кондиционирования может достигать $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, что позволяет приготавливать горячую воду требуемой температуры и обходиться в летний режим без дополнительных источников тепла.

Однако недостатком рассмотренной схемы является, то что холодильная машина работает вне диапазона энергоэффективности из-за повышенной температуры конденсации.

Для повышения эффективности работы системы горячего водоснабжения приготовления горячей воды от контура рекуперации теплоты конденсации холодильной машины можно использовать двухступенчатую систему.

6. Комбинированная схему приготовления горячей воды с использованием двух источников возобновляемой энергии: рекуператора теплоты конденсации холодильной машины и геосистемы (рис. 6).

Эта двухступенчатая схема приготовления горячей воды, в которой в качестве первого, низкопотенциального, источника теплоты (по ходу движения воды) используется контур рекуперации холодильной машины, в качестве второго, высокопотенциального, источника теплоты применяется геосистема.

Представленная схема (рис. 6) позволяет поддерживать энергоэффективный режим охлаждения холодильной машины для систем кондиционирования (температура конденсации не выше $45\text{ }^{\circ}\text{C}$). При этом можно обеспечить базовый режим нагрева воды на нужды ГВС, а также дополнительный, например, подогрев воды в бассейне.

Применение двух баков аккумуляторов горячей воды позволяет более эффективно использовать теплоту конденсации холодильной машины на подогрев горячей воды в период пиковой нагрузки системы охлаждения здания и максимальной нагрузки геосистемы.

Анализ показывает, что выбор эффективных схемных решений систем альтернативного теплоснабже-

ния зависит от ряда внешних и внутренних факторов, осуществляемого путем технико-экономического обоснования. При этом следует подчеркнуть, что выбор аккумулятора теплоты играют определяющую роль, соответствующую принципам энергосберегающих технологий. Отдельно стоит обратить внимание о схемах подключения теплоносителей к аккумулятору теплоты. Данное обстоятельство способно существенно влиять на эффективность работы комбинированной системы теплоснабжения. Вопросу эффективности аккумулирования теплоты при различных вариантах подключения теплоносителей уделено недостаточно внимания.

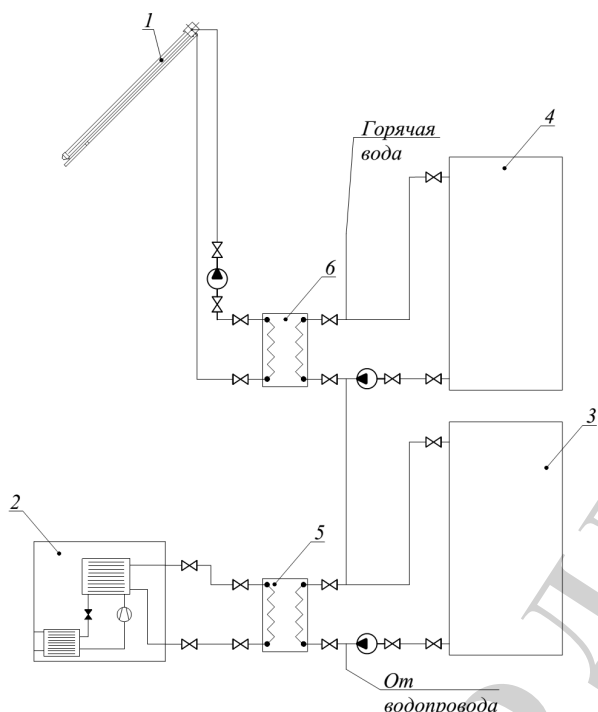


Рис. 6. Комбинированная схема приготовления горячей воды с использованием двух источников возобновляемой энергии: 1 – солнечный коллектор, 2 – холодильная машина, 3 – аккумулятор горячей воды (1-я ступень), 4 – аккумулятор горячей воды (2-я ступень), 5 – пластинчатый теплообменный аппарат (1-я ступень), 6 – пластинчатый теплообменный аппарат (2-я ступень)

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является определение рационального режима работы установки, что позволяет увеличить долю использования низкопотенциальной энергии за счет двухступенчатого аккумулирования для различных климатических условий.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить такие задачи:

- моделирование процессов для рассмотренных схем подключения источников теплоты при разных режимах генерации и отбора горячей воды;

- визуализацию процессов в аккумуляторе теплоты при разных режимах генерации и отбора горячей воды;

- экспериментальные исследования процессов зарядки аккумулятора горячей воды от теплового насоса при различных климатических условиях;

- определение условий эффективной работы альтернативных систем теплоснабжения с применением аккумуляторов энергии и тепловых насосов.

4. Материалы и методы исследований

Важным фактором, влияющим на эффективность использования аккумуляторов горячей воды, является способ подключения источников теплоты. Для анализа эффективности работы аккумулятора было произведено моделирование процессов для распространенных схем подключения при разных режимах генерации-отбора тепла.

Ниже (рис. 7–13) представлены результаты моделирования тепловых процессов для трех наиболее распространенных схем подключения теплоносителей к аккумулятору теплоты и двух режимов работы системы: равенства генерации и потребления тепла и аккумулирования теплоты при низком его потреблении.

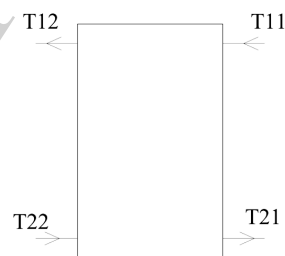


Рис. 7. Расчетная параллельная схема движения потоков подключения теплоносителей к баку-аккумулятору:

T11 – подающая магистраль источника тепла,
T12 – подающая магистраль потребителя тепла,
T21 – обратная магистраль источника тепла,
T22 – обратная магистраль потребителя тепла

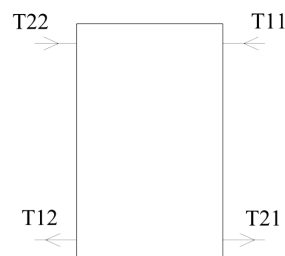


Рис. 8. Расчетная перекрестная схема движения потоков подключения теплоносителей к баку-аккумулятору:

T11 – подающая магистраль источника тепла,
T12 – подающая магистраль потребителя тепла,
T21 – обратная магистраль источника тепла,
T22 – обратная магистраль потребителя тепла

Для двух рассматриваемых режимов работы аккумулятора теплоты с помощью пакета программ Flow Simulation на основе программного обеспечения «SolidWorks» были получены результаты численного CFD-моделирования тепловых процессов в аккумуляторе теплоты с визуализацией поля температур (рис. 10, 13). В программу входят математический ап-

парат, позволяющий численным методом конечных элементов решать уравнения теплопередачи для определения расчетных параметров в том числе градиента температур по объему бака аккумулятора.

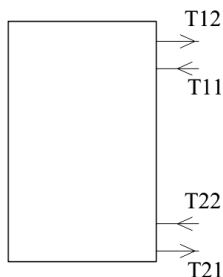


Рис. 9. Расчетная схема подключения теплоносителей к баку-аккумулятору совмещенная схема движения потоков:

- T11 – подающая магистраль источника тепла,
- T12 – подающая магистраль потребителя тепла,
- T21 – обратная магистраль источника тепла,
- T22 – обратная магистраль потребителя тепла

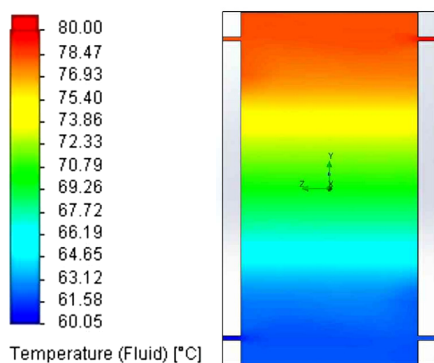


Рис. 10. Визуализация процессов в баке-аккумуляторе при зарядке аккумулятора при параллельной схеме движения потоков

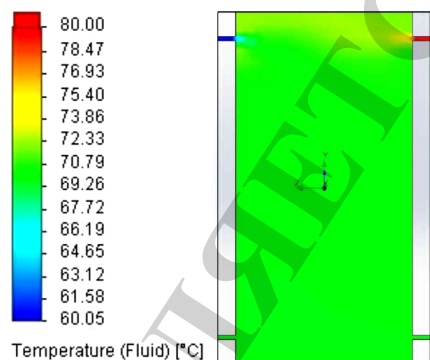


Рис. 11. Визуализация процессов в баке-аккумуляторе при зарядке аккумулятора при прекрестной схеме движения потоков

Как видно из результатов численного моделирования тепловых процессов в баке аккумулятора (рис. 10, 12, 14, 15), применение традиционных подключений теплоносителей к аккумулятору теплоты (параллельная схема движения потоков и совмещенная схема движения потоков) приводит к менее эффективному использованию объема бака-аккумулятора (расслоение

температур в баке во время зарядки и большой не задействованный объем бака при разрядке).

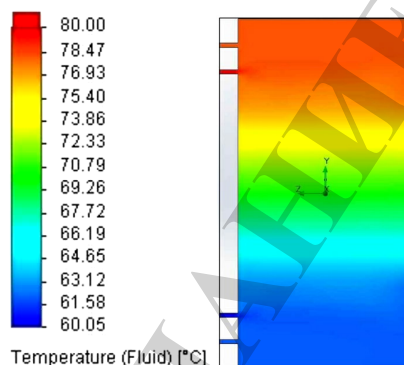


Рис. 12. Визуализация процессов в баке-аккумуляторе при зарядке аккумулятора при смешанной схеме движения потоков

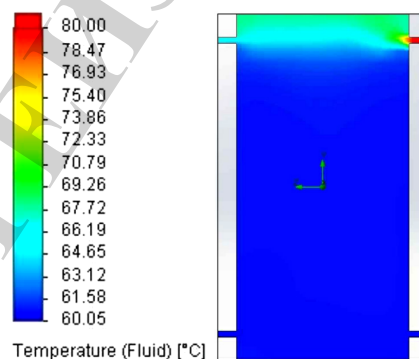


Рис. 13. Визуализация процессов в баке-аккумуляторе при разрядке аккумулятора при параллельной схеме движения потоков

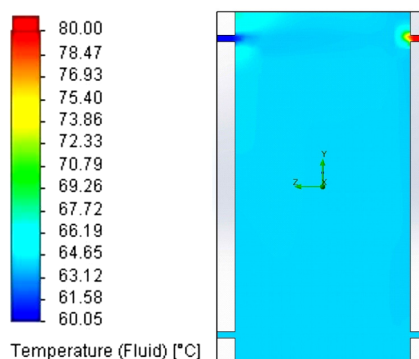


Рис. 14. Визуализация процессов в баке-аккумуляторе при разрядке аккумулятора при прекрестной схеме движения потоков

При использовании перекрёстной схемы движения потоков распределение теплоты по объему бака-аккумулятора более равномерное за счет перекрёстного течения теплоносителей и высокой степени смешивания потоков (рис. 11, 13). Это позволяет в полной мере задействовать для аккумуляции весь объем бака. Однако применение схемы перекрёстного движения потоков приводит к снижению температуры в подающей магистрали потребителя.

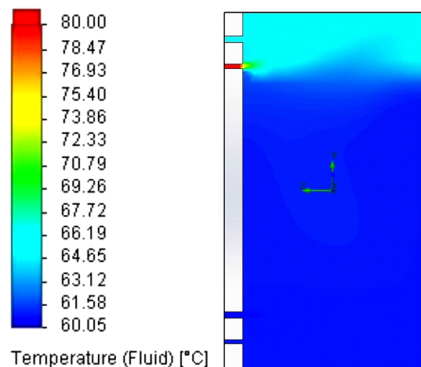


Рис. 15. Визуализация процессов в баке-аккумуляторе при разрядке аккумулятора для совмещенной схемы движения потоков

5. Экспериментальные исследования эффективности работы теплового насоса в режиме аккумулирования теплоты в летний период на нужды ГВС

В учебном корпусе № 10 Одесского национального политехнического университета (Украина) была реализована пилотная производственно-экспериментальная установка аккумуляции тепла с использованием теплового насоса фирмы Gree, Китай (рис. 16) сплит-типа «воздух-вода» (рис. 17), бивалентного водонагревателя аккумулятора AMCOR, Израиль (рис. 18).

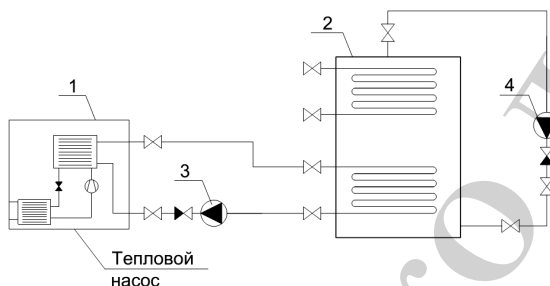


Рис. 16. Схема экспериментальной установки:
1 – тепловой насос сплит-типа,
2 – бивалентный водонагреватель-аккумулятор,
3, 4 – циркуляционные насосы

Для анализа эффективности использования теплового насоса в режиме приготовления горячей воды были установлены тепловой счетчик и счетчик учета электрической энергии (рис. 19).

Исследования проводились при различных температурах окружающей среды и переменных температурах теплоносителя. Результаты исследования представлены на рис. 20, 21.

Экспериментальные исследования процессов зарядки бака аккумулятора горячей воды показали температурные зоны эффективного использования теплового насоса для приготовления горячей воды. Как видно из графика (рис. 20), наибольший коэффициент трансформации тепла (COP) соответствует диапазону температур теплоносителя 35...45 °C. При этом повышение температуры теплоносителя выше 45 °C (рис. 21) приводит к снижению COP ниже 4.



Рис. 17. Внешний вид теплового насоса сплит-типа «воздух-вода» тепловой мощностью 6 кВт



Рис. 18. Бивалентный водонагреватель-аккумулятор емкостью 300 л



Рис. 19. Счетчики учета: а – тепловой энергии; б – электрической энергии

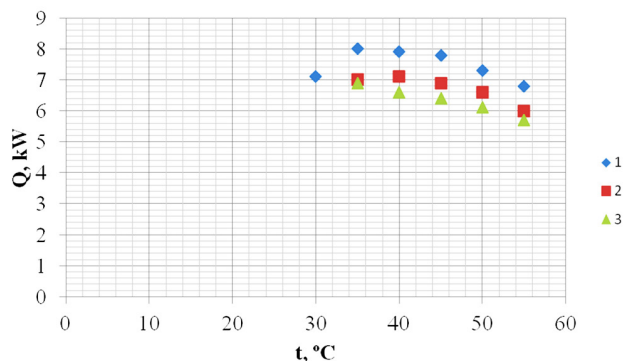


Рис. 20. График зависимости мощности теплового насоса от температуры наружного воздуха при изменении температуры теплоносителя: 1 – температура наружного воздуха 27 °C; 2 – температура наружного воздуха 23 °C; 3 – температура наружного воздуха 15 °C

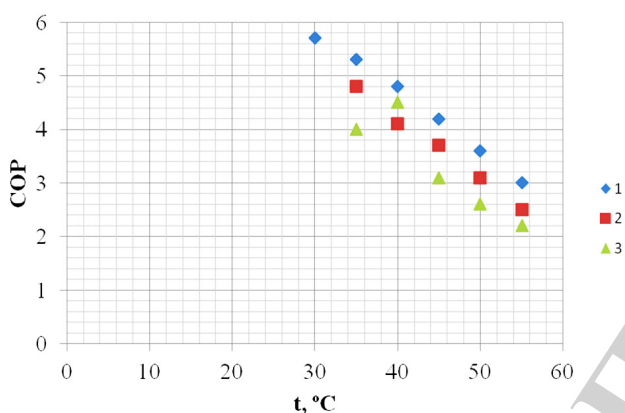


Рис. 21. График зависимости коэффициента трансформации (COP) теплового насоса от температуры наружного воздуха при изменении температуры теплоносителя: 1 – температура наружного воздуха 27 °C; 2 – температура наружного воздуха 23 °C; 3 – температура наружного воздуха 15 °C

6. Обсуждение результатов исследования режимов работы теплонасосных систем с использованием аккумуляторов теплоты

Проведенные исследования показали необходимость использования двухступенчатых аккумуляторов теплоты при приготовлении горячей воды. При этом низкопотенциальный источник теплоты должен иметь свой ак-

кумулятор в качестве первой ступени приготовления ГВС. Аккумуляторы теплоты для повышения эффективности их использования источников должны подключаться по перекрестной схеме движения теплоносителей. Данная схема подключения теплоносителей позволяет равномерно использовать объем аккумулятора и поддерживать равномерную температуру в процессе разрядке. Однако следует учитывать, что подобная схема приводит к снижению температуры теплоносителя в подающей магистрали.

Экспериментальные исследования режимов работы производственно-экспериментальной пилотной установки учебного корпуса № 10 ОНПУ (Украина) подтвердили эффективность двухступенчатых схем аккумуляции для приготовления горячей воды.

Результаты данного исследования актуальны для комбинированных систем теплоснабжения с использованием теплового насоса и солнечных коллекторов. Предложенные решения найдут широкое применение в жилищно-коммунальном секторе, а также для предприятий малого и среднего бизнеса.

Данные исследования являются продолжением работы над повышением эффективности использования возобновляемых источников энергии в комбинированных системах теплоснабжения и будут продолжены в дальнейшем.

7. Выводы

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований установлено, что:

- для повышения эффективности использования тепла от возобновляемых источников энергии необходимо применять двухступенчатую систему приготовления горячей воды;
- применение традиционного подключения теплоносителей к баку-аккумулятору приводит к снижению эффективности использования его объема, однако позволяет повышать температуры в подающей магистрали потребителя;
- применение альтернативного подключения теплоносителей к баку-аккумулятору (перекрестная схема движения теплоносителей) приводит к повышению эффективности использования его объема, однако снижает температуры в подающей магистрали потребителя;
- для эффективной работы теплового насоса (контура рекуперации холодильной машины) необходимо не превышать температуру теплоносителя выше 45 °C.

Литература

1. Закон України про енергозбереження: № 74/94 від 1.07.1994 р. Т. 7 [Текст]. – Закони України. – Київ, 1997. – С. 281–291.
2. Щегольков, А. В. Проблемы потребления и экономии тепловой энергии в жилом фонде [Текст] / А. В. Щегольков, М. А. Мишин // Ползуновский вестник. – 2011. – № 1. – С. 257–265.
3. Постанова «Про стимулювання споживачів природного газу і теплової енергії до переходу на електричне опалення та гаряче водопостачання» [Текст]. – Кабінет Міністрів України, 2014.
4. Кандеева, В. В. Пути рационального развития энергетики Украины [Текст]: XXIV Міжнар. наук.-прак. конф. / В. В. Кандеева, А. В. Лужанская, Н. О. Зайцев // Інформаційні технології: Наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD-2016). – 2016. – С. 306.
5. Богданов, А. Тепловой насос и теплофикация [Текст] / А. Богданов // Энергетика и ресурсосбережение. – 2002. – № 3. – С. 6–59.

6. Chwieduk, D. A. Solar-Assisted Heat Pumps [Text] / D. A. Chwieduk // Comprehensive Renewable Energy. – 2012. – P. 495–528. doi: 10.1016/b978-0-08-087872-0.00321-8
7. Алимгазин, А. Ш. Пути повышения энергетической эффективности теплонасосных технологий в РК [Текст] / А. Ш. Алимгазин, Ю. М. Петин, А. П. Кислов // Вестник ПГУ им. С. Торайгырова, серия «Энергетика». – 2010. – № 2. – С. 25–39.
8. Brumbaugh, J. E. Audel HVAC Fundamentals. Vol. 3 [Text] / J. E. Brumbaugh // Air Conditioning, Heat Pumps and Distribution Systems. – 4-th ed. – John Wiley & Sons, 2011. – 696 p.
9. Климчук, О. А. Альтернативні системи теплопостачання житлових будівель із використанням теплових насосів та акумуляторів тепла. Т. 2 [Текст]: матер. V Міжн. наук.-прак. конф. / О. А. Климчук, С. С. Титар, В. І. Шевчук, О. Д. Димитров // Управління проектами: інновації, не лінійність, синергетика. – Одеса: ОДАБА, 2014. – С. 102–105.
10. Сотникова, О. А. Акумуляторы теплоты теплогенерирующих установок систем теплоснабжения [Текст] / О. А. Сотникова, В. С. Турбин, В. А. Григорьев // АВОК. – 2003. – № 5. – С. 40–44.
11. Климчук, О. А. Використання теплоти фазового перетворення для сезонного акумулявання у геліосистемах [Текст] / О. А. Климчук, Р. В. Омеко, О. А. Роговенко // Строительство и техногенная безопасность. – 2014. – Вып. 49. – С. 170–173.
12. Бабаев, Б. Д. Сравнительные характеристики различных типов аккумуляторов тепла, перспективные направления разработок новых методов и устройств для аккумулярования тепловой энергии [Текст] / Б. Д. Бабаев // Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов. – 2013. – С. 125–137.
13. Chwieduk, D. Solar Energy in Buildings. Chap. 4 [Text] / D. Chwieduk. – Academic Press, 2014. – 382 p.

ТОЛЬКО ДЛЯ ЧТЕНИЯ

