

УДК 621.577

DOI: 10.24160/1993-6982-2022-2-45-55

Особенности применения теплоутилизационного оборудования на канализационных насосных станциях

В.И. Прохоров, М.А. Разаков

Рассмотрены особенности работы тепловых насосов на сооружениях системы водоотведения города. Приведены конкретные примеры установки тепловых насосов на различных объектах системы канализации в Российской Федерации. Исследованы альтернативные источники получения тепловой и электрической энергии для очистных сооружений. Изучены возможности использования теплоты от сточных вод для различных теплопотребляющих инженерных систем обеспечения микроклимата зданий или сооружений системы водоотведения. Проанализированы иные возможности использования теплоты от сточных вод для других инженерных систем жилищно-коммунального хозяйства. Проведена углубленная проработка возможностей монтажа тепловых насосов на канализационной насосной станции. Даны положительные и отрицательные особенности эксплуатации теплового насоса, зависящие от потенциального расположения оборудования конденсаторно-испарительных блоков теплового насоса на канализационной насосной станции. Освещены особенности устройства тепловых насосов на низковольтных и высоковольтных канализационных насосных станциях в различных населенных пунктах и городах. Представлены результаты изучения основных технологических проблем на реальных объектах системы городского хозяйства и описаны основные осложнения, возникающие в процессе монтажа и эксплуатации тепловых насосов на канализационных насосных станциях. Данное обследование проходило с 2019 по 2021 гг. на канализационных насосных станциях АО «Мосводоканал», где используются тепловые насосы. Выполнен анализ возможности снижения стоимости производства теплонасосного оборудования на базе существующих отраслей энергетики (например, геотермальной энергетики) и промышленного сектора экономики Российской Федерации. Работа может быть интересна для проектировщиков и инженеров, работающих в сфере энергетики, жилищно-коммунального хозяйства города, в частности, в системе городского водоотведения.

Ключевые слова: тепловой насос, канализационная насосная станция, система канализации, теплопотребляющие инженерные системы.

Для цитирования: Прохоров В.И., Разаков М.А. Особенности применения теплоутилизационного оборудования на канализационных насосных станциях // Вестник МЭИ. 2022. № 2. С. 45—55. DOI: 10.24160/1993-6982-2022-2-45-55.

Specific Features of Applying Heat Recovery Equipment at Sewage Pumping Stations

V.I. Prokhorov, M.A. Razakov

The specific features relating to the operation of heat pumps in urban wastewater disposal system structures are considered. Specific examples of installing heat pumps at various sewerage system facilities in the Russian Federation are given. Alternative heat and electricity generation sources for wastewater treatment plants are studied. The possibilities of using the wastewater heat for various heat-consuming engineering systems serving to maintain the microclimate conditions in the wastewater disposal system buildings or structures are considered. Other possibilities of using the wastewater heat for other engineering systems of housing and municipal services are analyzed. The possibilities of installing heat pumps at a sewage pumping station are elaborated in an in-depth manner. Both positive and negative features of heat pump operation are pointed out, which depend on the potential layout of the heat pump condensing-and-evaporating unit equipment at a sewage pumping station. The specific features relating to the design of heat pumps installed at low-voltage and high-voltage sewage pumping stations in settlements and cities are outlined. The results from studying the main process-related problems encountered at real municipal service system facilities are presented. The main difficulties encountered during installation of heat pumps and in the course of their operation at sewage pumping stations are described. The survey the results of which are presented in the article was carried out in the period from 2019 to 2021 at the JSC Mosvodokanal sewage pumping stations in which heat pumps are used. The possibility of reducing the cost of heat pump equipment manufacture based on the existing energy sector branches (for example, geothermal energy) and the Russian economy industrial sector has been analyzed. The article may be of interest for designers and engineers working in the energy sector and urban housing and municipal services, in particular, in the urban wastewater disposal system.

Key words: heat pump, sewage pumping station, sewerage system, heat-consuming engineering systems.

For citation: Prokhorov V.I., Razakov M.A. Specific Features of Applying Heat Recovery Equipment at Sewage Pumping Stations. Bulletin of MPEI. 2022;2:45—55. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2022-2-45-55.

Введение

Поскольку человек стремится быть в единении с природой, но одновременно желает удовлетворять свои потребности, широкое распространение получили возобновляемые источники энергии. Помимо систем энергообеспечения в городской среде необходимы и

иные поддерживающие жизнедеятельность инженерные системы. К ним можно отнести систему водоотведения, состоящую из большого количества сооружений. К сожалению, потребление данными системами энергии в большинстве отечественных и зарубежных работ анализируется лишь с позиции использования только электрической энергии [1 — 3]. Тем не менее,

упомянутые сооружения системы канализации потребляют и тепловую энергию для собственных инженерных систем поддержания микроклимата.

Цели настоящей работы:

- исследование энергосберегающих мероприятий на различных сооружениях системы водоотведения;
- изучение возможности использования теплового насоса на городской канализационной насосной станции.

Общая характеристика энергосберегающих мероприятий на сооружениях системы водоотведения

К основным объектам системы городского водоотведения относят очистные сооружения, насосные станции и транспортирующие сточные воды трубопроводы. Помимо сооружений самой системы следует упомянуть абонентские устройства, от которых идет отведение сточных вод, а также природную водную экосистему, куда сбрасываются очищенные сточные воды. В состав очистных сооружений, как правило, входят воздухоподъемные компрессорные станции. На рисунке 1 в качестве примера представлена принципиальная схема системы водоотведения города по данным АО «Мосводоканал».

Основными источниками электрической и тепловой энергии в сооружениях системы водоотведения города являются соответствующие городские энерге-

тические системы. Известно применение автономных мини-ТЭЦ на твердом или газообразном видах топлива. Однако необходимо соблюдение определенных технологических и подготовительных условий. В качестве твердого топлива, в первую очередь, используется высушенный осадок от сточных вод, а в качестве газообразного — сточный газ (газ, выделившийся от сточных вод или их осадка в результате химических реакций при избытке или недостатке кислорода (воздуха)), образующийся при анаэробных условиях очистки канализационных стоков. На рисунке 2 дана принципиальная схема устройства осушения осадка сточных вод на иловых площадках в очистных сооружениях, предложенного в [4].

Газообразное топливо по теплофизическим характеристикам схоже со свалочным газом (газ, выделившийся от твердых коммунальных отходов в результате химических реакций при избытке или недостатке кислорода (воздуха)), получаемым от твердых коммунальных отходов [5 — 7] но значительно выше его по теплоте сгорания. Теплофизические свойства иловых осадков сточных вод отличны от соответствующих характеристик газообразных образований [8, 9].

Определенное количество некоторых видов топлива для внутренних нужд на очистных сооружениях (ОС) получают лишь в специальных технических блоках. Также их можно выработать и в канализационных насосных станциях (КНС), или даже при использо-

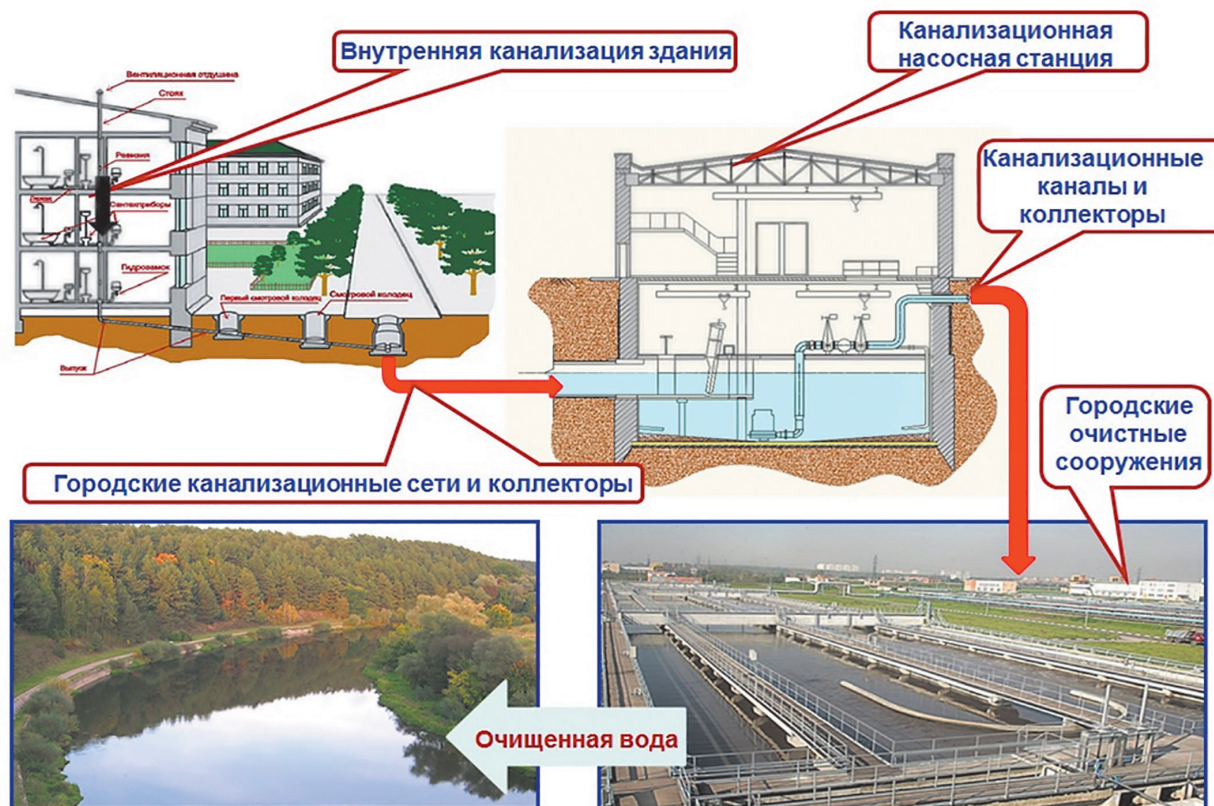


Рис. 1. Принципиальная схема системы водоотведения Москвы

Источник: официальный сайт АО «Мосводоканал» www.mosvodokanal.ru/sewerage/network.php

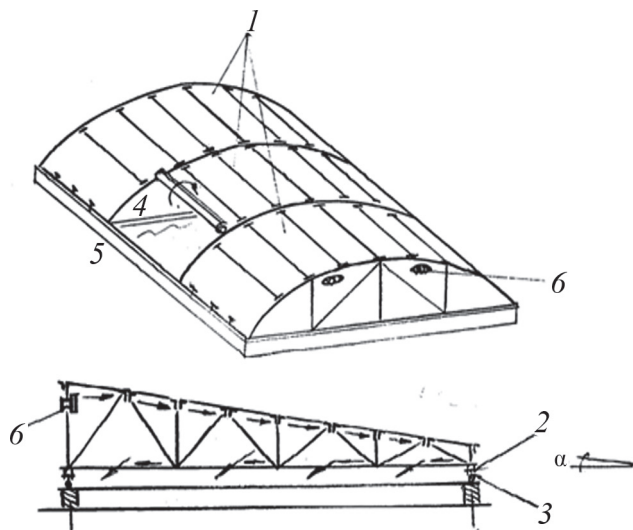


Рис. 2. Устройство для сушки осадка сточных вод на иловых площадках:

1 — модуль; 2 — ролики; 3 — направляющие; 4 — разъемные сцепки; 5 — сцепное устройство; 6 — вентиляторы

вании воздухоудовных станций (ВС). Энергодефицит КНС распространяется не только на тепловую, но и на электрическую энергии, поэтому на данных видах сооружений, как правило, целесообразно применение теплового насоса (ТН) с использованием канализационных стоков как источника низкопотенциального тепла и энергосберегающего регулирования работы электродвигателей насосных и вентиляционных агрегатов [10 — 14]. Однако потребуются каждый раз проводить соответствующее технико-экономическое обоснование с учетом всех возможных способов энергосбережения [15]. Следует иметь в виду, что охлаждение сточных вод в любом из указанных сооружений ухудшает естественное брожение стоков. Понижение температуры варьируется от 1 до 10 °С. На рисунке 3 изображена принципиальная схема работы теплового насоса [16].

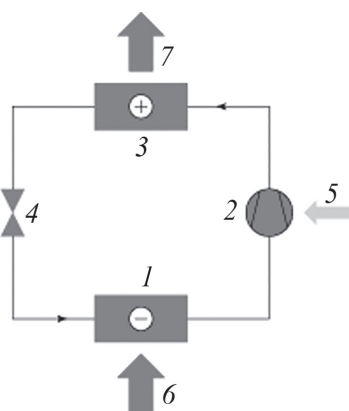


Рис. 3. Принципиальная схема теплового насоса:

1 — испаритель; 2 — компрессор; 3 — конденсатор; 4 — дроссельный вентиль; 5 — электрическая энергия; 6 — теплота от низкопотенциального источника тепловой энергии; 7 — теплота, отводимая от конденсатора

На рисунке 4 представлена принципиальная схема тепло/холодообеспечения приточной вентиляционной установки от теплоты очищенных сточных вод с помощью теплового насоса на воздухоудовной станции [17 — 20]. В ней очищенные сточные воды из резервуара 11 с помощью насосов 8 Н6, Н2 и Н3 подаются непосредственно в осушительный агрегат 9, приточную установку и тепловые насосы 6, 7. Воздух в приточной установке охлаждается или нагревается с помощью рабочего тела от тепловых насосов и вытяжного вент-агрегата. Также на рис. 4 выделен отдельный контур с фреоном и насосом Н1: приточная установка — вытяжной агрегат, не связанный с контуром, использующим очищенные сточные воды.

Многие факторы при работе ТН, включая пожаро-взрывобезопасность, зависят от используемых хладагентов, некоторые характеристики которых представлены в [21].

Помимо очищенных сточных вод, в тепловом насосе возможно применение и неочищенных сточных вод [22]. Последние в основном присутствуют на городских канализационных насосных станциях, что создает определенные трудности во время монтажа и эксплуатации. Во-первых, это связано непосредственно с тем, что твердые фракции неочищенных сточных вод засоряют внутреннюю поверхность трубопроводов в теплообменных устройствах. Несмотря на установку перед тепловым насосом грабельных решеток, при эксплуатации необходимо предусматривать периодическое проведение внутренней и внешней прочисток теплообменного устройства (при использовании как кожухотрубных, так и иных поверхностных теплообменных аппаратов). Во-вторых, многое зависит от расположения конденсаторно-испарительных блоков ТН. На рисунке 5 представлена принципиальная схема КНС [23].

Энергосбережение городской канализационной насосной станции

В конце 1970-х гг. прошлого века в начале массовой эксплуатации теплонасосных установок от сточных вод на различных предприятиях жилищно-коммунального хозяйства ТН работали только по регенеративному принципу работы, т. е. происходило переменное омывание сточными водами теплообменного устройства. На данный момент теплообменники могут работать как по регенеративному, так и по рекуперативному принципам работы с баком-аккумулятором. На высоковольтных КНС, в основном, используют ТН с рекуперативным принципом работы, а на низковольтных — с регенеративным. На рисунке 6 дана принципиальная схема применения теплового насоса с коллектором в резервуаре со сточными водами на низковольтной КНС [24].

Теплообменный блок от теплового насоса, через который идет отбор теплоты от сточных вод (или газовой фазы от сточных вод) в промышленном блоке канали-

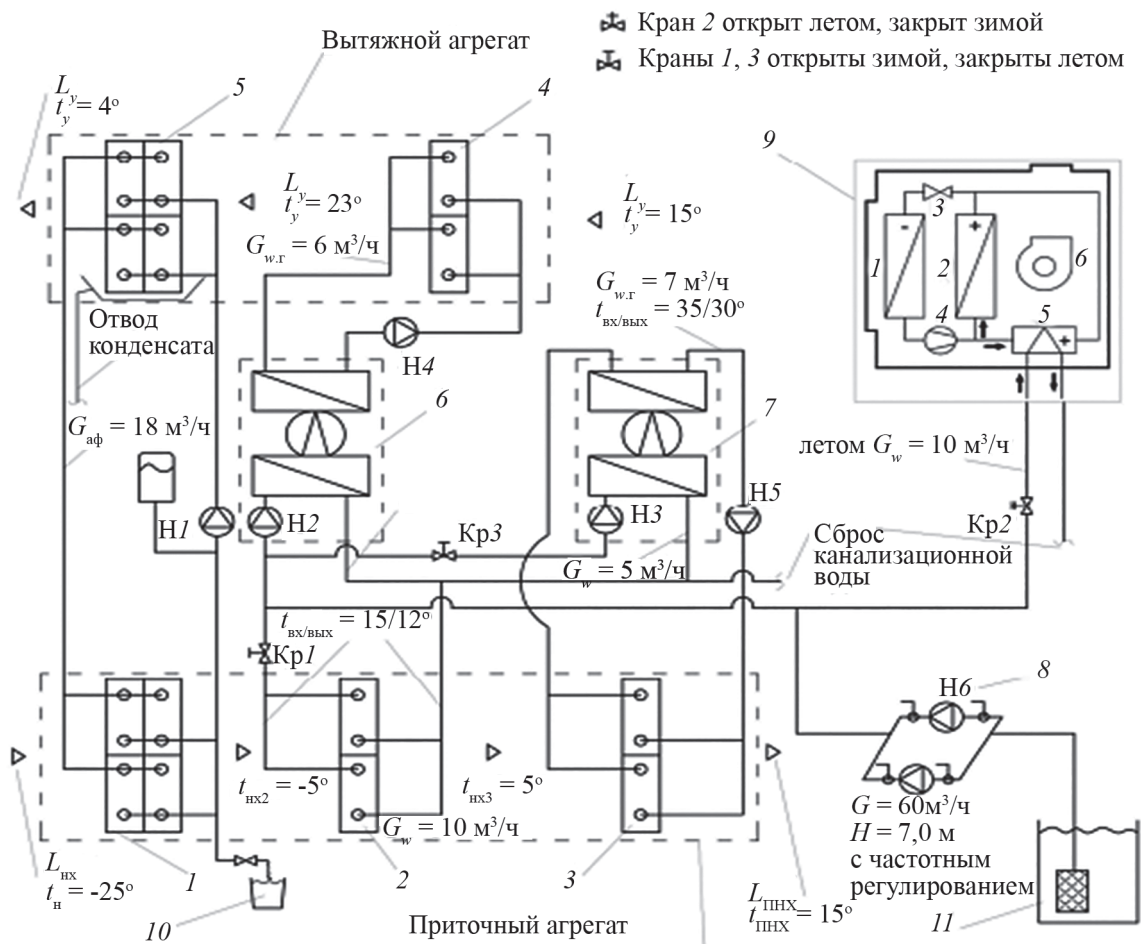


Рис. 4. Принципиальная схема теплоснабжения системы вентиляции:

Н1 — Н5 — насосы; 1 — 3 — теплообменники в составе приточного агрегата первой, второй и третьей ступени подогрева приточного воздуха; 4, 5 — теплообменники в вытяжном агрегате подогрева перед сорбционным фильтром 4 и теплоутилизации выбросного воздуха 5; 6, 7 — ТН (холодильные машины); 8 — насосы подачи очищенной сточной воды; 9 — осушительный агрегат; 10 — бак для антифриза; 11 — резервуар очищенной сточной воды

зационной насосной станции, можно расположить в восьми точках. На рисунках 7 — 10 изображены места отбора теплоты от сточных вод на ГКНС [25].

Самыми эффективными местами отбора теплоты от сточных вод в грабельном отделении являются: расположение теплообменника в горизонтальном (1, рис. 7) или в вертикальном (3, рис. 7) потоках сточных вод. Указанные позиции самые энергоэффективные, потому что в данных точках сточные воды текут с несколько повышенной скоростью (более 0,1 м/с) [23]. Это ускоряет процесс теплообмена с рабочим телом в контуре теплового насоса (см. рис. 3). Кроме того, они находятся в низкопотенциальном теплоисточнике, что, в свою очередь, снижает дополнительные тепловые потери для ТН. Помимо положительных моментов у приведенных позиций есть и отрицательные стороны. Так, при расположении теплообменника в канале (1, рис. 7) конструкция теплообменника может задерживать твердые фракции от сточных вод. Это понизит теплообмен, приведет

к дополнительным затратам для его очистки, а также снизит срок эксплуатации из-за эрозийного и коррозионного воздействий фракций. Теплообменник также можно установить в виде втопленного в канал устройства, но при этом к уже перечисленным недостаткам добавятся осложнения со снижением теплообмена из-за уменьшения площади омывания и проблема с очисткой места установки устройства для теплообмена.

При размещении теплообменника в вертикальном потоке сточных вод (3, рис. 7) отрицательные факторы схожи с вариантом его установки в канале (1 на рис. 7), но при этом добавляются трудности при эксплуатации теплообменника, который надо будет периодически извлекать для проведения ремонтно-восстановительных работ. Это довольно сложно сделать, поскольку требуется дополнительная установка подъемных устройств или изменение конструкции самого теплообменника.

Варианты устройства подвесного теплообменника в газовой подушке сточных вод (2, рис. 7) или его установка с попеременным омыванием сточными водами

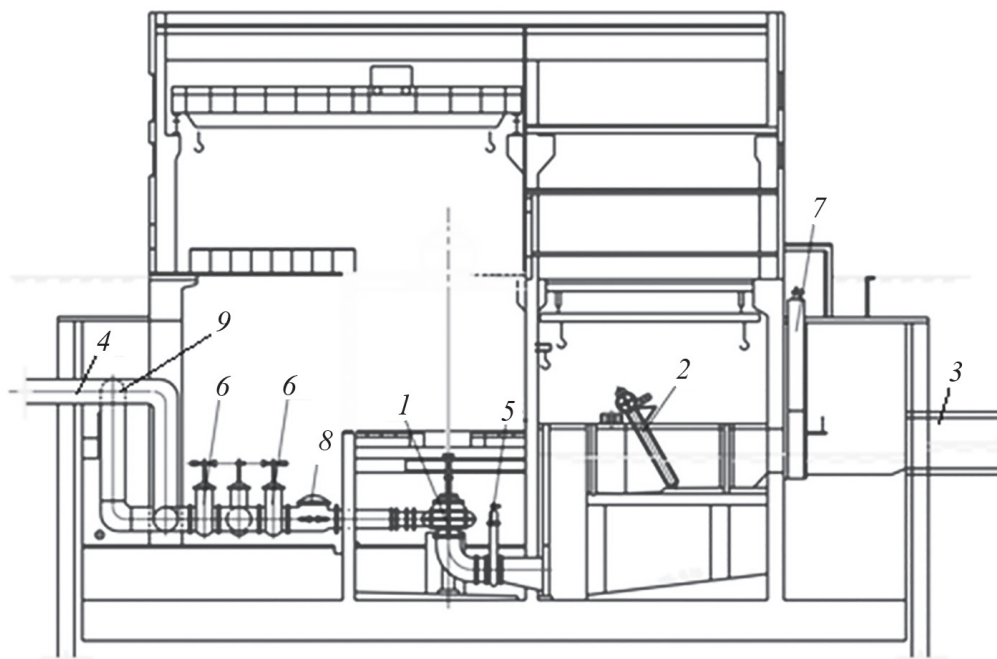


Рис. 5. Принципиальный вид канализационной насосной станции:

1 — насос канализационный вертикальный; 2 — грабельная решетка мелкопрозорная (5...50 мм); 3, 4 — подающий и отводящий трубопроводы; 5, 6 — задвижки на подающем и отводящем трубопроводах; 7 — щитовой затвор с электрическим приводом; 8 — обратный клапан; 9 — выходящий из КНС нагнетательный трубопровод

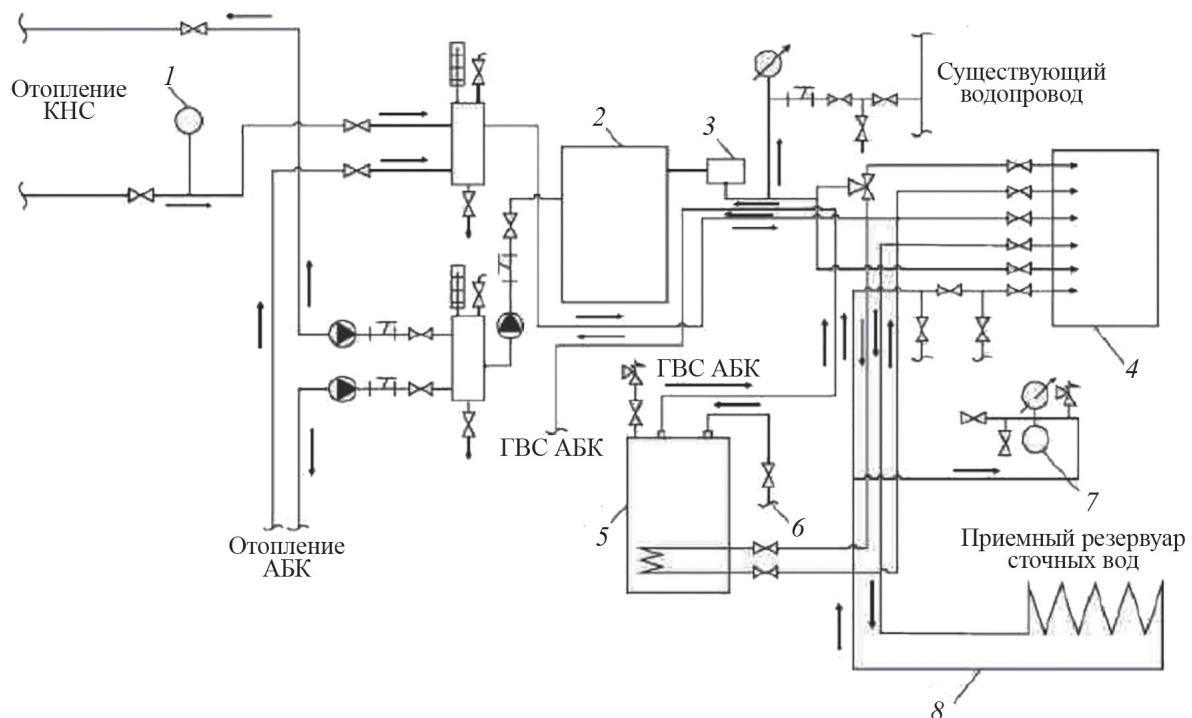


Рис. 6. Принципиальная схема теплового узла:

АБК — административно-бытовой комплекс; 1, 7 — расширительный бак; 2, 5 — буферный бак; 3 — дополнительный электрокотёл; 4 — тепловой насос; 6 — запитка сетевой водой; 8 — коллектор с рассолом

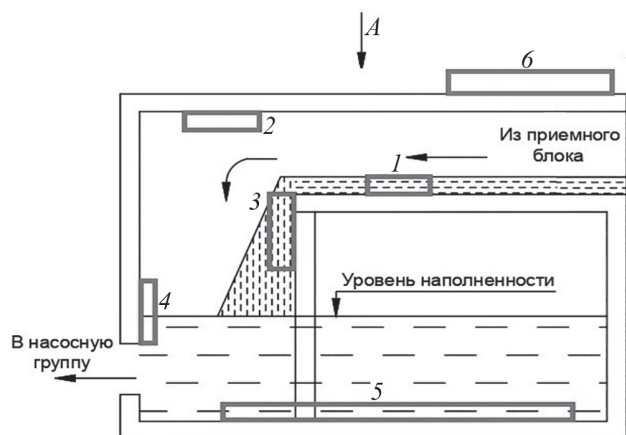


Рис. 7. Расположение теплообменников ТН от сточных вод в грабельном отделении КНС. Разрез камеры-резервуара со сточными водами:

1 — теплообменник в канале и горизонтальном потоке сточных вод; 2 — подвесной теплообменник в газовой подушке от сточных вод; 3 — теплообменник в вертикальном ниспадающем потоке сточных вод; 4 — теплообменник с попеременным омыванием сточными водами и газовой фазой сточных вод; 5 — теплообменник на дне резервуара; 6 — проточный теплообменник без внешнего омывания сточными водами в рабочей зоне грабельного отделения

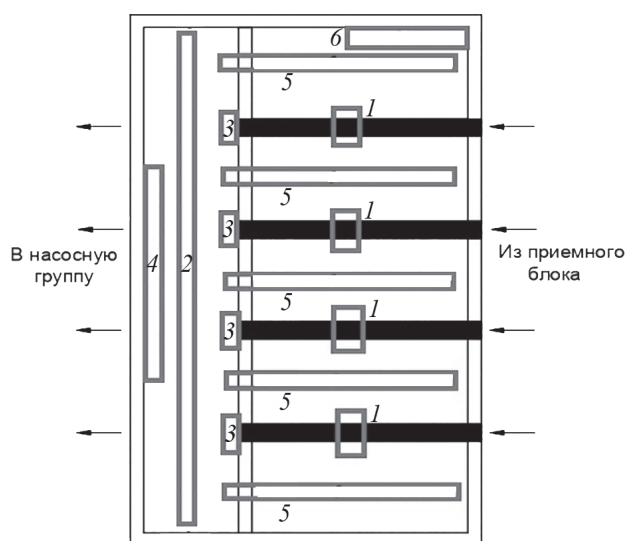


Рис. 8. План помещения камеры-резервуара со сточными водами в грабельном отделении:

1 — теплообменники в канале и горизонтальном потоке сточных вод; 2 — подвесной теплообменник в газовой подушке от сточных вод; 3 — теплообменники в вертикальном ниспадающем потоке сточных вод; 4 — теплообменник с попеременным омыванием сточными водами и газовой фазой сточных вод; 5 — теплообменники на дне резервуара; 6 — проточный теплообменник без внешнего омывания сточными водами в рабочей зоне грабельного отделения

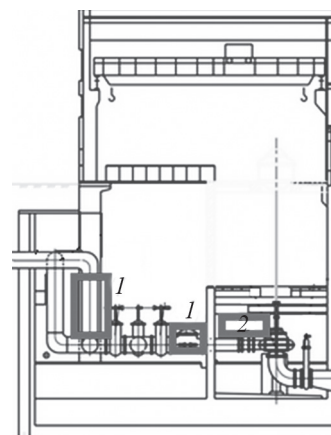


Рис. 9. Расположение теплообменников ТН в машинном зале КНС. Разрез машинного зала:

1 — теплообменник-змеевик на трубопроводе со сточными водами; 2 — проточный теплообменник без внешнего омывания сточными водами в рабочей зоне машинного зала

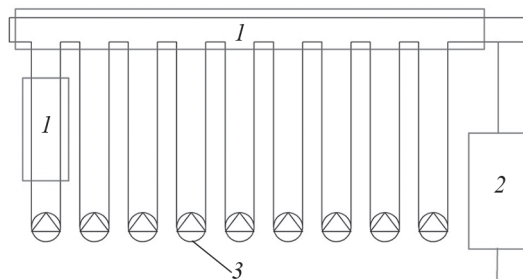


Рис. 10. План помещения машинного зала:

1 — теплообменник-змеевик на трубопроводе со сточными водами; 2 — проточный теплообменник без внешнего омывания сточными водами в рабочей зоне машинного зала; 3 — насосный агрегат

и газовой фазой сточных вод (4, рис. 7) имеют ряд преимуществ перед постановкой теплообменников в потоке со сточными водами (1, 3, рис. 7). К самым важным (2, 4, рис. 7) относят увеличенные площади теплообменника и возможность попеременного омывания сточными водами и сточным газом теплообменного устройства (2, рис. 7). Площадь возрастает за счет конструкции камеры-резервуара со сточными водами. Каналы и поддерживающие их конструкции, на которых возможна установка теплообменников (1, 3, рис. 7), имеют сравнительно небольшие площади и несущую способность, поэтому устройства, расположенные в потоке со сточными водами (1, 3, рис. 7), должны быть компактными и иметь небольшой вес. При установке теплообменников на позициях 2 и 4, устройства крепят не на конструкции каналов и сопутствующие конструкции, а на пол грабельного отделения и разделительную стенку, которая отгораживает машинный зал от грабельного отделения. К отрицательным характеристикам (2, 4, рис. 7) следует отнести сложность монтажа, эксплуатации и проведения технических осмотров

данных устройств. Также, в данном случае теплообмен будет ниже, чем при позициях установки 1, 3, 5 (на дне резервуара) и 6 (проточный теплообменник без внешнего омывания сточными водами и расположением в рабочей зоне) в грабельном отделении. При подвешенном расположении устройства (2, рис. 7) сточные воды совсем не омывают теплообменное устройство. Оно омывается смесью сточного газа и воздуха. Температуру данной смеси для первоначальных расчетов можно принять равной температуре сточных вод. При размещении теплообменника с попеременным омыванием сточными водами (4, рис. 7) устройство может омываться как воздушной смесью так и сточными водами.

При размещении теплообменника на дне резервуара (5, рис. 7) площадь теплообмена также имеет одно из самых больших значений. Скорость сточных вод будет ниже, чем при установке устройства в потоке со сточными водами, но выше, чем при расположении на позициях 2 и 4. Однако есть и отрицательные факторы, связанные с усложнением монтажа и эксплуатации. Теплообменник на дне резервуара со сточными водами (5, рис. 7) можно выполнить во втопленном виде. Недостатки во время эксплуатации будут схожи со втопленным вариантом при установке устройства в канале и потоке со сточными водами (1, рис. 7).

При нахождении теплообменника в рабочей зоне грабельного отделения (6, рис. 7) эффективность выработки теплоты от сточных вод схожа с эффективностью выработки при расположении устройства в потоке со сточными водами (1, 3, рис. 7), но при этом образуются дополнительные тепловые и электрические потери. Они связаны с потерей теплоты при доставке сточных вод в теплообменное устройство и расходами электрической энергии на транспортировку сточных вод из резервуара в теплообменное устройство в грабельном отделении.

Теплообменник-змеевик на трубопроводе со сточными водами (1, рис. 9) и проточный теплообменник без внешнего омывания сточными водами в рабочей зоне (2, рис. 9) находятся в машинном зале. Место возможной установки теплообменника-змеевика на позиции 1 считается одним из самых неэффективных в КНС, поскольку не вся площадь поверхности трубопровода со сточными водами может быть использована для теплообмена. Конструкция данного устройства состоит из трубопровода со сточными водами и змеевика на внешней поверхности трубопровода. Помимо монтажа теплообменных поверхностей требуется установка поддерживающих опорных конструкций, которые необходимы для восприятия дополнительно приложенной нагрузки от змеевика. Проточный теплообменник без внешнего омывания сточными водами в рабочей зоне (2, рис. 9) — наиболее распространенный вид установки теплообменника для ТН в высоковольтных КНС. Положительные и отрицательные свойства схожи с установкой теплообменного устройства на позициях 5 и 6 в грабельном отделении за исключением

того, что проточному теплообменнику в машинном зале (2, рис. 9) нет необходимости в использовании насоса для подачи сточных вод в теплообменник, поскольку он подсоединен к напорной линии трубопровода со сточными водами после основных насосов. Также преимуществом данной установки устройства является тот факт, что теплообменник находится на открытом пространстве, где возможно проведение ремонтно-восстановительных и профилактических работ. Следует уточнить, что в качестве проточных устройств теплообмена (6, рис. 7; 2, рис. 9) установлены кожухотрубные, а на остальных позициях — иные виды поверхностных теплообменников.

На рисунке 11 представлен внешний вид теплообменника, расположенного в машинном зале на высоковольтной КНС (2, рис. 10; 7, рис. 3) [26].

Все рассмотренные способы подключения теплового насоса на КНС даны при использовании теплоты от сточных вод на тепловые нужды самой станции (для систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха и горячего водоснабжения). Альтернативным способом является подогрев воды в системе теплоснабжения города [27, 28], но при этом необходимо увеличение размера теплообменника, поскольку у системы теплоснабжения довольно большие расходы воды. В г. Зеленоград Московской области был реализован такого рода проект, в котором теплота от неочищенных сточных вод с помощью уличного теплообменника-утилизатора подогревает воду для системы теплоснабжения города [29, 30]. На рисунках 12, 13 изображены тепловая схема и внешний вид теплообменника используемой системы [29].

Возможности применения тепловых насосов на объектах системы водоотведения разнообразны и требуют творческого подхода при проектировании. После снижения стоимости используемого оборудования они будут востребованы как для самой системы водоотведения, так и для смежных инженерных систем, например, системы теплоснабжения города. Этот процесс возможен при переходе на оборудование отечественного производства [31], но при этом все предприятия должны получить гарантию поддержки местными ре-



Рис. 11. Внешний вид теплообменника на высоковольтной КНС

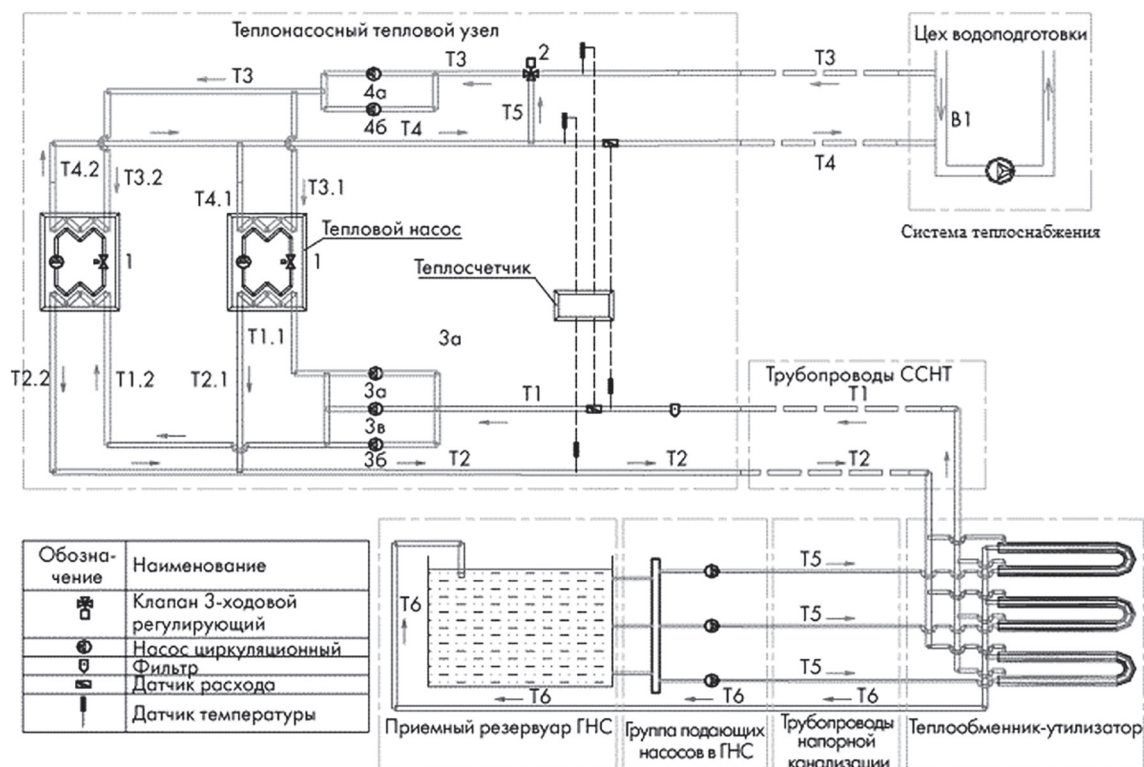


Рис. 12. Принципиальная схема теплового узла



Рис. 13. Внешний вид теплообменника-утилизатора, установленного на улице

гиональными органами государственной власти с помощью инструмента субсидий и инвестиций. Анализируемая отрасль не находится на стадии становления, она уже сформирована, но под другие цели, а именно — производство тепловых насосов для выработки теплоты от геотермальных источников [32]. Низкопотенциальные источники находятся в основном в Восточной части нашей страны (Камчатском крае и Сахалинской области) и Южных регионах (Краснодарском крае), следовательно, в остальных федеральных округах развитие производства ТН необходимо осуществлять с учётом особенностей предприятий жилищно-коммунального комплекса и промышленности.

Заключение

Наиболее перспективными энергосберегающими мероприятиями на очистных сооружениях системы водоотведения являются использование теплоты от сточных вод и теплового потенциала выбросного вентиляционного воздуха для теплопотребляющих инженерных систем обеспечения микроклимата.

В канализационной насосной станции эффективным местом установки теплообменного оборудования от теплового насоса при отсутствии внешнего омывания сточными водами является рабочая зона машинного зала.

Литература

References

1. **Bakman I.** High-efficiency Predictive Control of Centrifugal Multi-pump Stations with Variable-speed Drives. Tallinn: TUT Press, 2016.

2. **Venkatesh G.** Systems Performance Analysis of Oslo's Water and Wastewater System. Trondheim: NTNU, 2011.

3. **Николаев В.Г., Махров С.В.** Потенциал энергосбережения и его практическая реализация для насосов и воздухоудувных машин систем водоотведения // Водоснабжение и канализация. 2013. № 1—2. С. 100—115.

4. **Пат. № 2094397 РФ.** Устройство для сушки осадка сточных вод на иловых площадках / В.И. Прохоров, И.И. Горбатов // Бюл. изобрет. 1997. № 10.

5. **Makisha N., Shevchenko-Enns E.** Review of Energy Saving and Energy Efficiency Approaches Applied in Water Sector in Russia // Proc. XXII Intern. Sci. Conf. Construction the Formation of Living Environment. 2019. P. 01040.

6. **Бабаев В.Н., Горох Н.П., Коринько И.В.** Энергетический потенциал метанообразования при мезофильном анаэробном разложении органической составляющей отходов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2011. № 4(6). С. 59—65.

7. **Chernova R. e. a.** Analysis of Landfill Gas Thermophysical Properties for Communal Services // Proc. Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering Conf. Krasnoyarsk, 2019. P. 62044.

8. **Shcherbakov V.I., Pomogaeva V.V., Chizhik K., Koroleva E.** Biomass Resource of Domestic Sewage Sludge // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. V. 983. Pp. 361—372.

9. **Rudenko R.R., Vasilevich E.E., Stom D.I., Zhdanova G.O., Topchiy I.A., Chizhick K.I.** The Use of Urban Sewage Sludge as a Substrate in a Microbial Fuel Cell // Intern. J Eng. and Technol. 2018. V. 7. No. 2. Pp. 277—280.

10. **Bakman I., Gevorkov L., Vodovozov V.** Optimization of Method of Adjustment of Productivity of Multi-Pump System Containing Directly Connected Motors // Proc IX Intern. Electric Power Quality and Supply Reliability Conf., 2014. Pp. 209—214.

11. **Khohlov V. e. a.** Energy Saving in Municipal Sewage Pumping Station // Proc. III Conf. Problems of Thermal Physics and Power Engineering — Energy Saving — Theory and Practice. 2020. P. 052003.

12. **Баженов В.И., Устюжанин А.В., Королева Е.А.** Установки когенерации для компенсации потребности станций аэрации в энергетических ресурсах // Водоснабжение и санитарная техника. 2021. № 4. С. 40—49.

13. **Битиев А.В. и др.** Прогнозирование энергосберегающего эффекта управляемой подачи воздуха для Ново-Люберецких очистных сооружений // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 9. С. 47—56.

14. **Усачев А.П.** Методика оценки эффективности частотного регулирования производительности насосных агрегатов КНС // Водоснабжение и санитарная техника. 2020. № 1. С. 42—51.

1. **Bakman I.** High-efficiency Predictive Control of Centrifugal Multi-pump Stations with Variable-speed Drives. Tallinn: TUT Press, 2016.

2. **Venkatesh G.** Systems Performance Analysis of Oslo's Water and Wastewater System. Trondheim: NTNU, 2011.

3. **Nikolaev V.G., Makhrov S.V.** Potentsial Energosberezheniya i Ego Prakticheskaya Realizatsiya dlya Nasosov i Vozdukhoduvnykh Mashin Sistem Vodootvedeniya. Vodospabzhenie i Kanalizatsiya. 2013;1—2:100—115. (in Russian).

4. **Pat № 2094397 RF.** Ustroystvo dlya Sushki Osadka Stochnykh Vod na Ilovykh Ploshchadkakh. V.I. Prokhorov, I.I. Gorbatov. Byul. izobret. 1997;10. (in Russian).

5. **Makisha N., Shevchenko-Enns E.** Review of Energy Saving and Energy Efficiency Approaches Applied in Water Sector in Russia. Proc. XXII Intern. Sci. Conf. Construction the Formation of Living Environment. 2019:01040.

6. **Babaev V.N., Gorokh N.P., Korin'ko I.V.** Energeticheskiy Potentsial Metanoobrazovaniya pri Mezofil'nom Anaerobnom Razlozhenii Organicheskoy Sostavlyayushchey Otkhodov. Vostochno-Evropeyskiy Zhurnal Peredovykh Tekhnologiy. 2011;4(6):59—65. (in Russian).

7. **Chernova R. e. a.** Analysis of Landfill Gas Thermophysical Properties for Communal Services. Proc. Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering Conf. Krasnoyarsk, 2019:62044.

8. **Shcherbakov V.I., Pomogaeva V.V., Chizhik K., Koroleva E.** Biomass Resource of Domestic Sewage Sludge. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019;983:361—372.

9. **Rudenko R.R., Vasilevich E.E., Stom D.I., Zhdanova G.O., Topchiy I.A., Chizhick K.I.** The Use of Urban Sewage Sludge as a Substrate in a Microbial Fuel Cell. Intern. J Eng. and Technol. 2018;7;2:277—280.

10. **Bakman I., Gevorkov L., Vodovozov V.** Optimization of Method of Adjustment of Productivity of Multi-Pump System Containing Directly Connected Motors. Proc IX Intern. Electric Power Quality and Supply Reliability Conf., 2014:209—214.

11. **Khohlov V. e. a.** Energy Saving in Municipal Sewage Pumping Station. Proc. III Conf. Problems of Thermal Physics and Power Engineering — Energy Saving — Theory and Practice. 2020:052003.

12. **Bazhenov V.I., Ustyuzhanin A.V., Koroleva E.A.** Ustanovki Kogeneratsii dlya Kompensatsii Potrebnosti Stantsiy Aeratsii v Energeticheskikh Resursakh. Vodospabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika. 2021;4:40—49. (in Russian).

13. **Bitiev A.V. i dr.** Prognozirovanie Energosberegayushchego Effekta Upravlyaemoy Podachi Vozdukha dlya Novo-Lyuberetskikh Ochistnykh Sooruzheniy. Vodospabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika. 2018;9:47—56. (in Russian).

14. **Usachev A.P.** Metodika Otsenki Effektivnosti Chastotnogo Regulirovaniya Proizvoditel'nosti Nasosnykh Agregatov KNS. Vodospabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika. 2020;1:42—51. (in Russian).

15. **Темеров А. и др.** Обзор реальных проектов ВИЭ в регионах. М.: Изд-во Российской инженерной академии, 2019.
16. **Шилкин Н.В.** Утилизация тепла канализационных стоков // Сантехника. 2003. № 1. С. 12—14.
17. **Кокорин О.Я., Волков В.** Применение теплового насоса с целью энергосбережения и повышения экологичности работы систем вентиляции помещений для ванн очистки сточных вод // Холодильная техника. 2012. № 6. С. 29—31.
18. **Волков В.В.** Повышение энергетической и экологической эффективности систем вентиляции в помещениях с емкостями для очистки сточных вод: автореф. ... канд. тех. наук. М.: НИИСФ РААСН, 2020.
19. **Khavanov P., Volkov V.** Ensuring Energy Efficiency and Environmental Friendliness of the Ventilation Systems with Baths Wastewater Treatment // Proc. Intern. Multi-conference Industrial Eng. and Modern Technol. 2019. P. 8934406.
20. **Кокорин О.Я., Волков В.В.** Повышение эффективности станций очистки сточных вод // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2012. № 7(127). С. 22—25.
21. **Fu H.D., Pei G., Ji J. e. a.** Experimental Study of a Photovoltaic Solar-Assisted Heat-pump/Heat-pipe System // Appl. Thermal Eng. 2012. V. 40. Pp. 343—350.
22. **Похил Ю.Н. и др.** Использование теплоты неочищенных сточных вод в качестве теплоносителя // Водоснабжение и санитарная техника. 2004. № 3. С. 25—27.
23. **Рымаров А. е. а.** Specialized Method of Calculating Heat Input from Wastewater in the Premises of the Sewage Pumping Stations // IOP Conference Series: Materials Sci. and Eng. 2018. V. 463. P. 032073.
24. **Дубровский С.В.** Отопление удаленной канализационной насосной станции тепловым насосом // Энергосовет. 2013. № 1(26). С. 30—31.
25. **Прохоров В.И., Белоглазов А.Р., Разаков М.А.** Качественная и количественная оценка теплопоступлений от сточных вод в помещение канализационной насосной станции // Естественные и технические науки. 2017. № 7(109). С. 143—146.
26. **Разаков М.А.** Особенности расхода сточных вод в канализационных насосных станциях // Сб. докл. XVI Междунар. науч.-техн. конф., посвященной памяти академика РАН С.В. Яковлева. М.: Мир науки, 2020. С. 189—192.
27. **Яковлев И.В., Попов А.И.** Использование тепловых сбросов на энергетические потребности города // Перспективные энергетические технологии. Экология, экономика, безопасность и подготовка кадров: Материалы науч.-практ. конф. Екатеринбург: Изд-во Уральского федерального ун-та им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2016. С. 102—104.
15. **Temerov A. i dr.** Obzor Real'nykh Proektov VIE v Regionakh. M.: Izd-vo Rossiyskoy Inzhenernoy Akademii, 2019. (in Russian).
16. **Shilkin N.V.** Utilizatsiya Tepla Kanalizatsionnykh Stokov. Santechnika. 2003;1:12—14. (in Russian).
17. **Kokorin O.Ya., Volkov V.** Primenenie Teplovogo Nasosa s Tsel'yu Energoberezheniya i Povysheniya Ekologichnosti Raboty Sistem Ventilyatsii Pomescheniy dlya Vann Ochistki Stochnykh Vod. Kholodil'naya Tekhnika. 2012;6:29—31. (in Russian).
18. **Volkov V.V.** Povyshenie Energeticheskoy i Ekologicheskoy Effektivnosti Sistem Ventilyatsii v Pomescheniyakh s Emkostyami dlya Ochistki Stochnykh Vod: Avtoref. ... Kand. Tekh. Nauk. M.: NIISF RAASN, 2020. (in Russian).
19. **Khavanov P., Volkov V.** Ensuring Energy Efficiency and Environmental Friendliness of the Ventilation Systems with Baths Wastewater Treatment. Proc. Intern. Multi-conference Industrial Eng. and Modern Technol. 2019:8934406.
20. **Kokorin O.Ya., Volkov V.V.** Povyshenie Effektivnosti Stantsiy Ochistki Stochnykh Vod. Santechnika, Otoplenie, Konditsionirovanie. 2012;7(127):22—25. (in Russian).
21. **Fu H.D., Pei G., Ji J. e. a.** Experimental Study of a Photovoltaic Solar-Assisted Heat-pump/Heat-pipe System. Appl. Thermal Eng. 2012;40:343—350.
22. **Pokhil Yu.N. i dr.** Ispol'zovanie Teploty Neochishchennykh Stochnykh Vod v Kachestve Teplonositelya. Vodosnabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika. 2004;3:25—27. (in Russian).
23. **Rymarov A. e. a.** Specialized Method of Calculating Heat Input from Wastewater in the Premises of the Sewage Pumping Stations. IOP Conference Series: Materials Sci. and Eng. 2018;463:032073.
24. **Dubrovskiy S.V.** Otoplenie Udalennoy Kanalizatsionnoy Nasosnoy Stantsii Teplovyim Nasosom. Energosovet. 2013;1(26):30—31. (in Russian).
25. **Prokhorov V.I., Beloglazov A.R., Razakov M.A.** Kachestvennaya I Kolichestvennaya Otsenka Teplopostupleniy ot Stochnykh Vod v Pomeschenie Kanalizatsionnoy Nasosnoy Stantsii. Estestvennye i Tekhnicheskie Nauki. 2017;7(109):143—146. (in Russian).
26. **Razakov M.A.** Osobennosti Raskhoda Stochnykh Vod v Kanalizatsionnykh Nasosnykh Stantsiyakh. Sb. Dokl. XVI Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf., Posvyashchennoy Pamyati Akademika RAN S.V. Yakovleva. M.: Mir Nauki, 2020:189—192. (in Russian).
27. **Yakovlev I.V., Popov A.I.** Ispol'zovanie Teplovykh Sbrosov na Energeticheskie Potrebnosti Goroda. Perspektivnye Energeticheskie Tekhnologii. Ekologiya, Ekonomika, Bezopasnost' i Podgotovka Kadrov: Materialy Nauch.-prakt. Konf. Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo Federal'nogo Un-ta Im. Pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina, 2016:102—104. (in Russian).

28. Шелгинский А.Я., Яковлев И.В. Анализ применения теплонасосных установок в системах теплоснабжения // Вестник МЭИ. 2018. № 2. С. 42—52.

29. 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.

30. Васильев Г.П. и др. 12-летний опыт эксплуатации теплонасосной установки на районной тепловой станции // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2016. № 4. С. 30—32.

31. Слесаренко В.В., Князев В.В., Вагнер В.В., Слесаренко И.В. Перспективы применения тепловых насосов РПИ утилизации теплоты городских стоков // Энергосбережение и водоподготовка. 2012. № 3(77). С. 28—31.

32. Бутузов В.А., Амерханов Р.А., Григораш О.В. Геотермальное теплоснабжение в России // Теплоэнергетика. 2020. № 3. С. 3—14.

28. Shelginskiy A.Ya., Yakovlev I.V. Analiz Primeneniya Teplonasosnykh Ustanovok v Sistemakh Teplonasabzheniya. Vestnik MEI. 2018;2:42—52. (in Russian).

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

30. Vasil'ev G.P. i dr. 12-letniy Opyt Ekspluatatsii Teplonasosnoy Ustanovki na Rayonnoy Teplovoy Stantsii. Santekhnika, Otoplenie, Konditsionirovanie. 2016;4:30—32. (in Russian).

31. Slesarenko V.V., Knyazev V.V., Vagner V.V., Slesarenko I.V. Perspektivy Primeneniya Teplovykh Nasosov RPI Utilizatsii Teploty Gorodskikh Stokov. Energoberezhenie i Vodopodgotovka. 2012;3(77):28—31. (in Russian).

32. Butuzov V.A., Amerkhanov R.A., Grigorash O.V. Geotermal'noe Teplonasabzhenie v Rossii. Teploenergetika. 2020;3:3—14. (in Russian).

Сведения об авторах:

Прохоров Виталий Иванович — доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Московского государственного строительного университета, e-mail: Prohorovvi@mgsu.ru

Разаков Мухаммет Азатович — ассистент кафедры энергетических и гидротехнических сооружений НИУ «МЭИ», аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Московского государственного строительного университета, e-mail: RazakovMA@mpei.ru

Information about authors:

Prokhorov Vitaliy I. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Heat and Gas Supply and Ventilation Dept., Moscow State University of Civil Engineering, e-mail: Prohorovvi@mgsu.ru

Razakov Mukhammet A. — Assistant of Energy Structures and Hydro-Technical Utilities Dept., NRU MPEI, Ph.D.-student of Heat and Gas Supply and Ventilation Dept., Moscow State University of Civil Engineering, e-mail: RazakovMA@mpei.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 12.10.2021

The article received to the editor: 12.10.2021