УДК 620.97
DOI 10.23968/1999-5571-2026-23-4-123-137

© *А. С. Невгень*, аспирант
© *С. В. Лукин*, д-р техн. наук, профессор
(Вологодский государственный университет,
Вологда, Россия)
E-mail: nac6@list.ru, s.v.luk@yandex.ru

© *A. S. Nevgen*, post-graduate student
© *S. V. Lukin*, Dr. Sci. Tech., Professor
(Vologda State University,
Vologda, Russia)
E-mail: nac6@list.ru, s.v.luk@yandex.ru

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ТЕПЛОТЫ СТОЧНЫХ ВОД, ОТВОДИМЫХ ОТ ЖИЛОГО МНОГОКВАРТИРНОГО ДОМА

ASSESSMENT OF ENERGY POTENTIAL OF HEAT OF WASTEWATER DISCHARGED FROM RESIDENTIAL APARTMENT BUILDING

Представлена оценка энергетического потенциала теплоты бытовых сточных вод, отводимых от многоквартирного жилого дома, и рассмотрена возможность его использования для целей локального снегоплавления. На основе нормативных данных о водопотреблении и результатов суточного мониторинга расхода и температуры сточных вод разработана математическая модель формирования температурного режима бытовых стоков с учетом интегральных теплопотерь в системе водоотведения здания. Построены суточные профили расхода, температуры и теплового потенциала сточных вод, выполнена оценка взаимосвязи между расходом и количеством потенциально извлекаемой теплоты. Для сопоставления располагаемого теплового потенциала с потребностями системы снегоплавления введен коэффициент обеспеченности, характеризующий достаточность теплоты для плавления расчетного снежного покрова. Установлено, что тепловой потенциал сточных вод многоквартирного жилого дома в отдельные периоды суток может быть достаточным для локального снегоплавления на ограниченной площади придомовой территории при условии циклического режима работы системы и дополнительной проверки температурного режима внутриплощадочной канализационной сети.

Ключевые слова: сточные воды, тепловой потенциал, снегоплавление, рекуперация тепла.

This article presents an assessment of the energy potential of domestic wastewater discharged from an apartment building and examines the feasibility of using it for localized snow melting. Based on regulatory water consumption data and daily monitoring of wastewater flow and temperature, there was developed a mathematical model for shaping the temperature regime of domestic wastewater, taking into account the integral heat losses in the building's drainage system. Daily profiles of effluent flow rate, temperature and thermal potential were constructed, and the relationship between flow rate and amount of potentially recoverable heat was assessed. To compare the available thermal potential with the snow melting system's needs, a supply factor was introduced, characterizing the sufficiency of heat for melting the estimated snow cove. It was established that the thermal potential of wastewater from an apartment building during certain periods of the day may be sufficient for localized snow melting in a limited area of the adjacent territory, provided that the system operates cyclically and the temperature regime of the on-site sewer network is additionally verified.

Keywords: wastewater, thermal potential, snowmelting, heat recovery.

Введение

Проблема утилизации снега в городских условиях является одной из актуальных задач для городов с холодным климатом. Значительные объемы снега, накапливающиеся на улицах и прилегающих территориях, приводят к повышению риска дорожно-транспортных происшествий и требуют постоян-

ной ручной или механической уборки. Кроме того, снежный покров в течение зимнего периода аккумулирует широкий спектр загрязняющих веществ от взвешенных частиц и тяжелых металлов до нефтепродуктов и поверхностно-активных веществ [1–4]. При наступлении весеннего снеготаяния загрязняющие вещества, накопленные в снежном покрове за зимний период, переходят в талый сток, формирующийся на значительной площади городской территории и характеризующийся выраженной неравномерностью по расходу и составу. В период интенсивного снеготаяния это приводит к увеличению нагрузки на системы водоотведения и водные объекты и может сопровождаться кратковременным повышением концентраций загрязняющих компонентов в поверхностном стоке [5].

В связи с вышеизложенным актуальной представляется задача создания инженерных решений, которые позволяют повысить управляемость процесса утилизации снежных масс и одновременно использовать вторичные энергетические ресурсы городской инфраструктуры. Одним из перспективных направлений является технология рекуперации низкопотенциальной теплоты сточных вод для нужд локального снегоплавления. Следует отметить, что локальное снегоплавление не является самостоятельным способом очистки талого стока, поскольку при плавлении снега загрязняющие вещества, накопленные в снежной массе, переходят в водную фазу. Экологическое значение такого решения заключается не в исключении необходимости очистки талого стока, а в переводе процесса образования талых вод из неконтролируемого сезонного режима в управляемый технологический процесс, предусматривающий организованный сбор, отвод, контроль расхода и последующую очистку талого стока. Дополнительным преимуществом является использование низкопотенциальной теплоты сточных вод, что снижает потребность во внешних источниках энергии при утилизации снежных масс.

В системах канализации выделяются четыре основных уровня рекуперации тепла сточных вод, каждый из которых характеризуется определенными термическими условиями и техническими возможностями для отбора тепловой энергии. На уровне компонентов (сантехнических устройств) стоки обладают наибольшей температурой (30–40 °С) [6, 7]. На уровне здания температура сточных вод может достигать 25 °С, что подтверждается экспериментальными замерами на многоквартирных жилых зданиях [5, 8]. В канализационной сети температура может варьироваться в диапазоне 10–20 °С, в зависимости от длины трубопровода, глубины залегания и внешних климатических условий. Согласно данным натурных наблюдений, выполненных на очистных сооружениях канализации (далее — ОСК) города Вологды, температура сточных вод изменялась в диапазоне 12,4–15,1 °С при среднем уровне 13–14 °С. Результаты измерений представлены в табл. 1.

С учетом высокого потенциала теплоты сточных вод, особенно на уровне зданий, актуальной задачей становится оценка динамики температурного режима сточных вод с целью прогнозирования объема доступной тепловой энергии. Как отмечается в работе [9], тепловой потенциал на уровне всего здания может быть выше, чем при рекуперации на уровне отдельных сантехнических устройств. Данное утверждение объясняется тем, что на уровне здания накапливаются объемы сточных вод от множества водозаборов и создается более стабильный суммарный поток с температурой 10–25 °С. Важным преимуществом также является минимизация тепловых потерь: при локальном отборе тепло не успевает рассеяться в трубопроводной сети. Согласно ряду исследований [10, 11], в городских канализационных сетях температура сточной воды падает примерно на 0,1–4 °С на каждый километр трубы.

Таблица 1

Температура сточных вод на ОСК г. Вологды (2025 г.)

Дата	10 янв	13 янв	14 янв	15 янв	16 янв	17 янв	20 янв	22 янв	23 янв	24 янв	27 янв	28 янв	29 янв	30 янв	31 янв
t, °C	14,6	13,4	13,7	13,4	14,4	13,2	13,3	12,7	13,9	15,1	12,4	13,1	12,4	12,6	12,6

Таким образом, определение температурного профиля сточных вод на уровне здания, где сохраняется наибольший тепловой потенциал, представляет собой важную научную и прикладную задачу, особенно актуальную в контексте разработки энергоэффективных решений для вторичного использования низкопотенциальной теплоты, в том числе для экологически более контролируемой утилизации снежных масс в городской среде.

Методы

Для определения почасовых расходов ХВС и ГВС используются нормативы водопотребления, приведенные в СП 30.13330.2020[1]. Согласно нормативному документу среднесуточный расход воды на одного жителя многоквартирного дома с централизованным горячим водоснабжением, оборудованного умывальниками, мойками и душами, составляет $q_{\text{сут}} = 130$ л/сут, из них $q_{\text{ГВС}} = 50$ л/сут.

Уточнение фактической почасовой структуры водопотребления осуществлялось по результатам суточного анализа данных общедомового прибора учета. Температура сточных вод определялась с использованием датчиков температуры, установленных в канализационном трубопроводе перед выпуском сточных вод в наружную канализационную сеть. Датчики были подключены к системе сбора данных, обеспечивавшей передачу результатов измерений по каналу сотовой связи с использованием SIM-модуля. На основе проведенного суточного мониторинга и научных исследований водопотребления многоквартирных жилых домов был сформирован график. Каждому часу суток присвоен безразмерный коэффициент f_i, характеризующий долю от общего суточного потребления. Коэффициенты нормированы по условию

$$\sum_{i=1}^{24} f_i = 1.$$

Почасовые значения объемов ХВС и ГВС были получены по следующим формулам:

$$v_{\text{хвс},i} = v_{\text{хвс,сут}} \cdot f_i; \quad (1)$$

$$v_{\text{гвс},i} = v_{\text{гвс,сут}} \cdot f_i. \quad (2)$$

Для построения математической модели формирования температурного режима бытовых сточных вод были приняты следующие допущения:

1. Сточные воды дома формируются в основном за счет смеси холодной и горячей воды, поступающей от жильцов (прочие примеси представлены в виде поправочного коэффициента).

2. Процесс в канализационном стояке и выпуске к колодцу квазистационарный на принятом часовом расчетном шаге. Температура стоков в данный час определяется мгновенным расходом и температурами притоков.

3. Потери тепла в трубопроводе учитываются одним коэффициентом $k_{\text{пот}} \in (0;1)$.

Температура смеси при мгновенном смешении двух потоков принималась по формуле

$$T^*_{\text{ст}} = \frac{v_{\text{гвс},i} T_{\text{г}} + v_{\text{хвс},i} T_{\text{х}}}{v_{\text{гвс},i} + v_{\text{хвс},i}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{г}}$ — температура горячей воды; $T_{\text{х}}$ — температура холодной воды.

С поправкой на теплопотери в трубах

$$T_{\text{ст}} = T_{\text{х}} + k_{\text{пот}}[T^*_{\text{ст}} - T_{\text{х}}], \quad (4)$$

где $k_{\text{пот}}$ — коэффициент теплопотерь в диапазоне 0–1, учитывающий теплоотдачу в грунт

[1] СП 30.13330.2020 «СНиП 2.04.01–85*. Внутренний водопровод и канализация зданий».

и воздух, а также возможное охлаждение во внутридомовой сети канализации.

Коэффициент теплопотерь $k_{\text{пот}}$ подбирался методом наименьших квадратов по критерию

$$J(k_{\text{пот}}) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(T_i^{\text{изм}} - T_{\text{ст},i}(k_{\text{пот}}))^2, \qquad (5)$$

где n — число часовых интервалов.

Минимизация функционала (5) при ограничении $0 < k_{\text{пот}} \le 1$ обеспечивает согласование расчетных и натурных значений температуры стоков с учетом интегральных теплопотерь в системе канализации. В простейшем случае, когда остальные параметры модели зафиксированы, оптимальное значение коэффициента может быть найдено в аналитическом виде либо численным перебором в допустимом диапазоне.

Валидация модели проводилась путем сопоставления формы расчетного суточного профиля температуры $T_{\text{ст},i}$ с натурным профилем $T_{\text{изм},i}$ (графическое сравнение) и анализа статистических показателей ошибки. Особое внимание уделялось воспроизведению утреннего и вечернего максимумов температуры сточных вод, а также минимальных ночных значений, поскольку именно эти участки профиля определяют потенциальную эффективность систем рекуперации тепла.

Для количественной оценки качества аппроксимации использовались среднеквадратичное отклонение σ и коэффициент детерминации:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(T_{i\text{изм}} - T_{\text{ст},i})^2}; \qquad (8)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(T_{\text{изм},i} - T_{\text{ст},i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(T_{\text{изм},i} - \overline{T}_{\text{изм}})^2}. \qquad (9)$$

Количество потенциально извлекаемой теплоты со сточными водами в i-й час рассчитывалось по выражению [14]:

$$Q_i = m_i c_p (T_{\text{ст},i} - T_{\min}), \qquad (10)$$

где Q_i — количество теплоты в i-й час, кДж; m_i — масса сточных вод за час, кг; c_p — удельная теплоемкость воды; $T_{\text{ст},i}$ — температура сточных вод; $T_{\min}$ — температура, используемая в качестве нижней границы для оценки теплового потенциала сточных вод (принята равной температуре холодной водопроводной воды на вводе в здание, +10 °С). Данное значение согласуется с требованиями к режиму работы очистных сооружений канализации (при температуре сточных вод ниже +10 °С эффективность биологических процессов очистки существенно снижается, поэтому дополнительный отбор теплоты не должен приводить к понижению температуры стоков на входе в ОСК ниже этого уровня [15]). Поскольку объектом исследования является отдельный многоквартирный жилой дом с ограниченным расходом сточных вод, снижение температуры стока после отбора теплоты на уровне здания не должно оказывать существенного влияния на среднюю температуру сточных вод, поступающих на очистные сооружения канализации. Однако при масштабировании подобных решений на группу зданий, квартал или городской район оценка допустимой глубины охлаждения должна выполняться дополнительно с учетом суммарного расхода, условий смешения в сети и требований к устойчивости биологических процессов очистки.

В настоящей работе тепловой потенциал сточных вод для целей локального снеготаяния определялся в предполагаемом месте установки теплообменного оборудования — на выпуске сточных вод из исследуемого многоквартирного здания перед их поступлением во внутриплощадочную канализационную сеть. Выбор данной расчетной точки обусловлен тем, что на уровне здания сохраняется более высокий температурный потенциал сточных вод до их последующего охлаждения по длине наружной канализационной сети. Такой подход позволяет выполнить принципиальную технико-энергетическую оценку применимости решения на примере конкретного объекта.

Вместе с тем указанное ограничение необходимо рассматривать применительно не только к очистным сооружениям канализации, но и к внутриплощадочной канализационной сети. При отборе теплоты непосредственно у выпуска здания температура сточных вод, поступающих в начальные участки дворовой канализации, может снижаться, что при малых расходах и неблагоприятных грунтово-климатических условиях повышает риск охлаждения трубопровода. Поэтому расчетный отбор теплоты должен выполняться при условии сохранения температуры сточных вод после теплообменного оборудования не ниже принятой нижней температурной границы T_{min} = 10 °С. При размещении теплообменного оборудования ниже по течению внутриплощадочной канализационной сети располагаемый тепловой потенциал должен уточняться с учетом охлаждения сточных вод по длине трубопровода и фактической температуры стоков в точке установки оборудования. В настоящей работе расчет промерзания и температурной устойчивости внутриплощадочной канализационной сети не выполнялся, поскольку исследование направлено на оценку энергетического потенциала сточных вод на выпуске здания. Данная проверка должна выполняться на последующей стадии проектной проработки с учетом конструктивных параметров сети, глубины заложения трубопроводов, протяженности участка, фактических расходов сточных вод и грунтово-климатических условий.

Полная экономическая оценка в настоящей работе не выполнялась, поскольку ее результаты зависят от конкретных проектных решений: типа теплообменного оборудования, места установки, объема строительно-монтажных работ, режима эксплуатации снегоплавильного пункта и условий подключения к канализационной сети. В рамках исследования выполнена принципиальная технико-энергетическая оценка, направленная на определение располагаемого теплового потенциала сточных вод в предполагаемой точке установки оборудования. Полученные результаты могут быть использованы как исходные данные для последующего технико-экономического обоснования.

Доля расхода сточных вод исследуемого здания в общем притоке на ОСК определяется выражением

$$\varphi = \frac{Q_д}{Q_{ОСК}}, \quad (11)$$

где φ — доля расхода сточных вод здания в суммарном притоке на очистные сооружения; $Q_д$ — расход сточных вод исследуемого здания, м³/сут; $Q_{ОСК}$ — суммарный расход сточных вод, поступающих на очистные сооружения, м³/сут.

Тогда изменение средней температуры суммарного потока на ОСК вследствие охлаждения сточных вод одного здания может быть определено по выражению

$$\Delta T_{ОСК} = \varphi \cdot \Delta T_д, \quad (12)$$

где $\Delta T_{ОСК}$ — изменение средней температуры притока на очистные сооружения, °С; $\Delta T_д$ — снижение температуры сточных вод исследуемого здания после отбора теплоты, °С.

Для оценки применимости теплового потенциала сточных вод к снегоплавлению на придомовой территории дополнительно учитывался циклический режим работы локального снегоплавильного пункта. Такой подход обусловлен тем, что выпадение и уборка снега не являются непрерывными и равномерными процессами в течение суток. В практических условиях снег, убираемый с дворовых проездов и тротуаров, может временно накапливаться и подаваться в снегоплавильный пункт в отдельные интервалы времени, соответствующие графику работы коммунальных служб и периодам повышенного водоотведения здания.

Суммарное количество потенциально извлекаемой теплоты сточных вод за рассматриваемый период работы снегоплавильного пункта определяется выражением

$$Q_\tau = \sum_{i=1}^{n} Q_i, \quad (13)$$

где Q_τ — суммарное количество потенциально извлекаемой теплоты за период работы системы, кДж; Q_i — тепловой потенциал сточных вод в i-й час, кДж.

Максимальная площадь территории, с которой может быть расплавлен расчетный снежный покров за рассматриваемый период, определяется по выражению

$$A_{\max,\tau} = \frac{Q_\tau}{Q_{\text{сп}}}, \quad (14)$$

где $A_{\max,\tau}$ — максимальная обеспечиваемая площадь снегоплавления за период работы системы, м^2; $Q_{\text{сп}}$ — удельное количество теплоты, необходимое для плавления расчетного снежного покрова с 1 м^2 территории, кДж/м^2.

Результаты

Суточный профиль расхода показан на рис. 1, температуры сточных вод — на рис. 2. По данным натурного эксперимента суммарный суточный расход сточных вод здания составил 15,58 м^3/сут, при этом почасовое распределение расхода имеет ярко выраженные утренние и вечерние пики: максимальные значения (1,1–1,2 м^3/ч) наблюдаются в интервалы 7:00–8:00 и 18:00–22:00, тогда как минимальные значения (0,10–0,21 м^3/ч) приходятся на ночные часы — 2:00–5:00. Температура сточных вод на выпуске здания изменялась в диапазоне от 9,6 до 24,6 °С: наименьшие значения фиксировались в ночной период, а максимальные — в вечерние часы (21:00–22:00). Среднесуточная температура сточных вод по результатам измерений составила около 18,5 °С, что коррелирует с данными других исследований [8, 12, 13].

На основе результатов суточного мониторинга сточных вод, представленных на рис. 1, были определены безразмерные коэффициенты суточного профиля водопотребления f_i для многоквартирного жилого дома (табл. 2).

Для проверки работоспособности разработанной модели был выполнен сравнительный анализ измеренных температур $T_{\text{изм},i}$ и расчетных значений $T_{\text{ст},i}$. Расчет проводился по уравнениям (3) и (4). На рис. 3 представлено графическое сопоставление суточных профилей температуры: синей линией показаны натурные измерения на выпуске здания, оранжевой — расчетные значения температуры.

Из рис. 3 видно, что модель корректно воспроизводит общий характер суточной неравномерности температуры сточных вод: ночное понижение температуры до 10–12 °С,

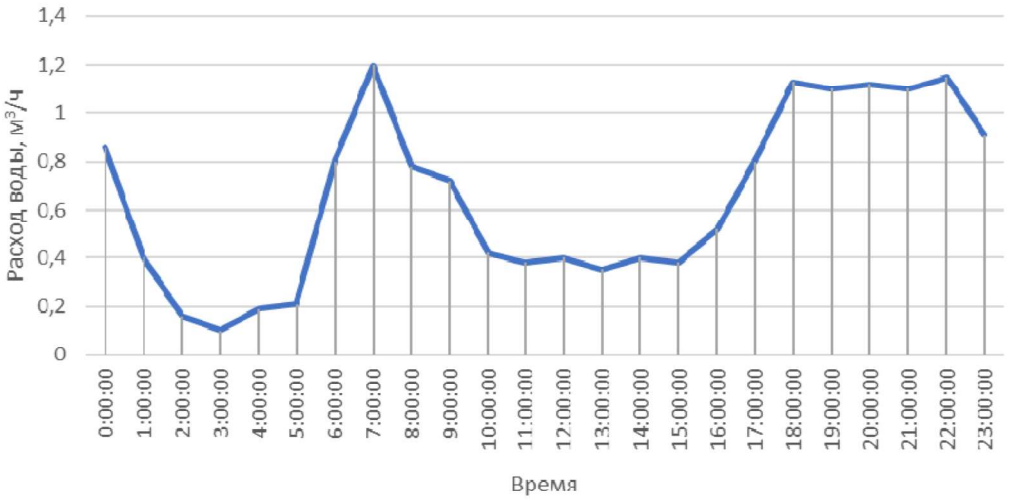

Рис 1. Суточный профиль расхода сточных вод по данным натурных измерений, м^3/ч

Таблица 2

Безразмерные коэффициенты суточного профиля водопотребления f_i

Время	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00
f_i	0,057	0,026	0,011	0,007	0,013	0,014	0,053	0,079	0,051	0,047	0,028	0,025
Время	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
f_i	0,026	0,023	0,026	0,025	0,034	0,053	0,074	0,046	0,074	0,072	0,076	0,06

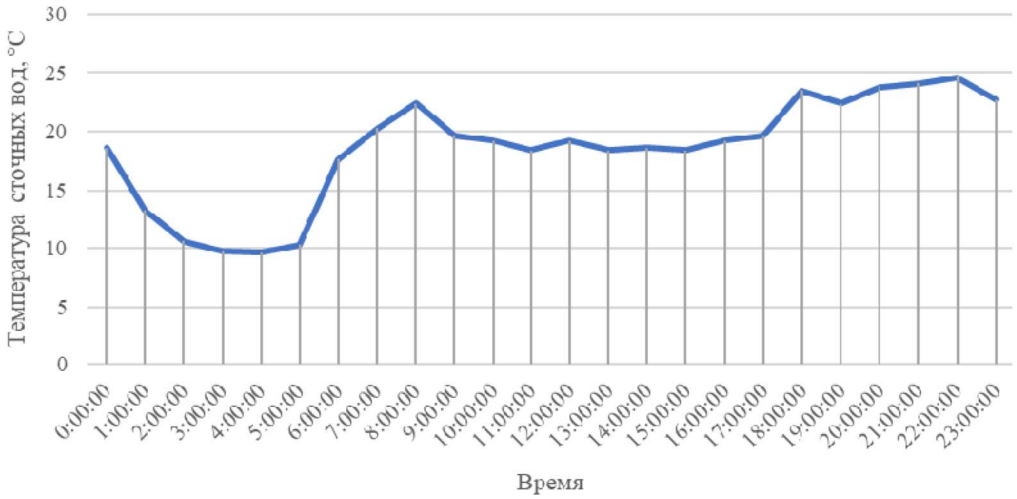

Рис 2. Суточный профиль температуры сточных вод (натурные измерения), °С

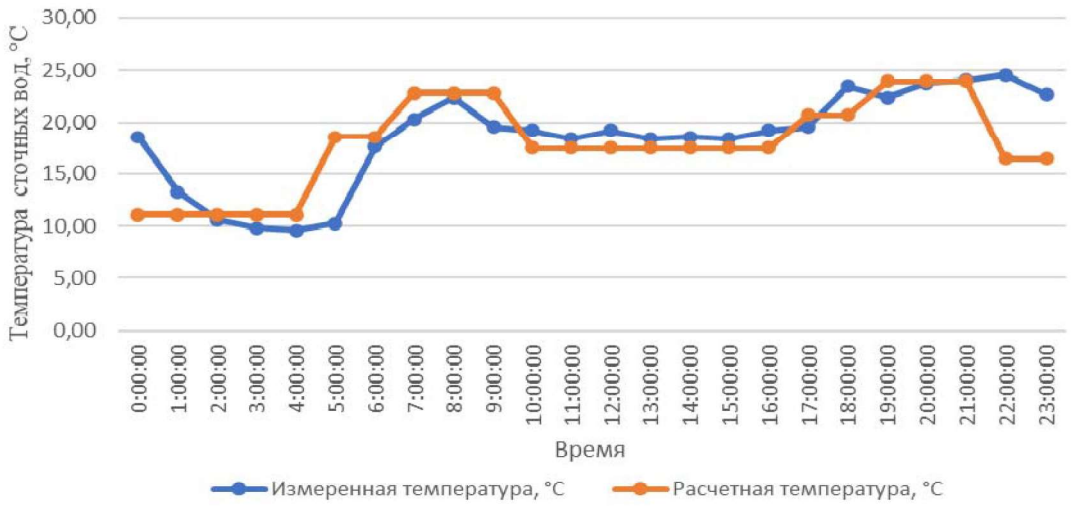

Рис 3. Сравнение измеренной и расчетной температуры сточных вод

утренний подъем в интервале 6:00–8:00, дневное плато с температурами около 19–21 °С и выраженный вечерний максимум порядка 23–25 °С. Расчетная кривая сглаживает локальные колебания измеренных данных, однако хорошо передает положение и величину основных экстремумов, которые определяют потенциальную эффективность систем рекуперации тепла (утренний и вечерний пики, а также минимальные ночные значения).

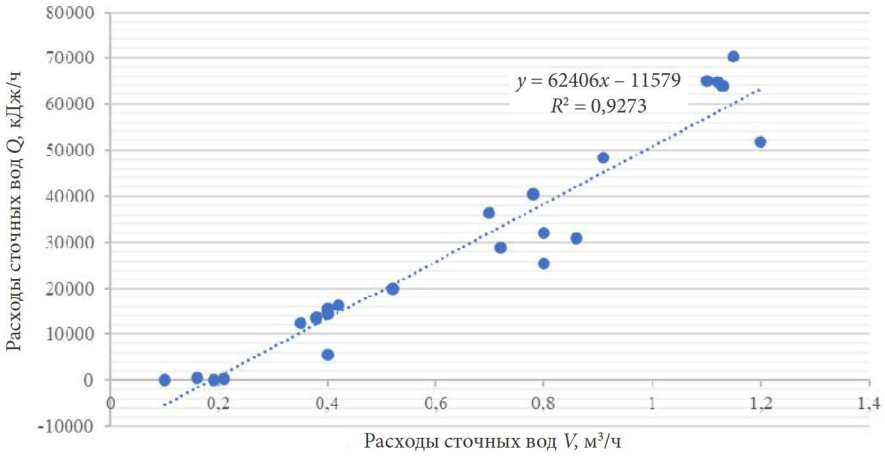

Рис. 4. Зависимость теплового потенциала сточных вод от их расхода

Среднеквадратичное отклонение расчетной температуры от натурных данных составило порядка σ = 3,4 °C, коэффициент детерминации $R^2 \approx 0{,}4$, что указывает на удовлетворительное качество аппроксимации при учете лишь одного интегрального коэффициента теплопотерь ($k_{пот}$). В целом, сопоставление профилей и полученные статистические показатели подтверждают применимость предложенной модели для инженерной оценки температурного режима и теплового потенциала сточных вод многоквартирного жилого дома.

Дополнительно была исследована взаимосвязь между расходом сточных вод и их тепловым потенциалом. Взаимосвязь между тепловым потенциалом сточных вод и расходом задается выражением (10). На рис. 4 представлена диаграмма рассеяния, иллюстрирующая зависимость теплового потенциала сточных вод Q_i от их расхода V_i по результатам суточных измерений.

Экспериментальные точки (рис. 4) образуют компактное облако, вытянутое вдоль регрессионной прямой, что указывает на выраженную линейную тенденцию. Коэффициент детерминации $R^2 \approx 0{,}93$, то есть около 93 % вариации теплового потенциала объясняется изменением расхода сточных вод, а вклад прочих факторов не превышает 7 %. Линейный коэффициент корреляции Пирсона дополнительно подтверждает наличие тесной положительной связи между расходом и тепловым потенциалом сточных вод.

Для характеристики взаимосвязи между тепловым потенциалом сточных вод и требований к снегоплавлению (под требованиями к снегоплавлению в настоящей работе понимается обеспечение полного таяния расчетного количества свежевыпавшего снега на площади 1 м² без накопления снежно-ледяного покрова) введен коэффициент обеспеченности:

$$k_i = \frac{Q_i}{Q_{сп}}. \qquad (15)$$

Коэффициент k_i показывает, во сколько раз располагаемый тепловой потенциал сточных вод в i-й час превышает требуемое количество теплоты на плавление снежного покрова на площади 1 м². Для поддержания поверхности полностью чистой в максимально возможный снегопад (без учета заноса) принимаем суточное количество снега 199 мм [16–18]. Плотность свежевыпавшего снега принимаем 200 кг/м³. Расчетная температура окружающего воздуха принималась[2] равной –8 °C. Исходя из введенных условий

[2] СП 131.13330.2025. Свод правил. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01.99*.

количество тепла, требуемого для плавления снега, $Q_{сп} = 1407$ кДж / (ч · м²).

На диаграмме, представленной на рис. 5, приведены значения коэффициента обеспеченности k_i; области, где $k_i \geq 1$, соответствуют часам, в которые теплового потенциала сточных вод достаточно для полного таяния расчетного снегопада на 1 м² поверхности, тогда как при $k < 1$ наблюдается дефицит теплоты и возможное накопление снежного покрова.

Для уточнения вывода о возможности использования теплоты сточных вод для снеготаяния на придомовой территории выполнен дополнительный расчет на примере того же многоквартирного жилого дома, для которого осуществлялся суточный мониторинг расхода и температуры сточных вод.

Площадь земельного участка, относящегося к исследуемому многоквартирному жилому дому, составляет 838,4 м². Площадь застройки принята равной 694,3 м². Тогда площадь территории, свободной от пятна застройки, составляет

$$A_{св} = 838,4 - 694,3 = 144,1 \text{ м}^2.$$

Полученное значение рассматривается как верхняя ориентировочная оценка площади придомовой территории, включающей дворовые проезды, тротуары и иные свободные покрытия. Фактическая площадь проездов и тротуаров может быть меньше указанного значения, поскольку часть свободной территории может приходиться на озелененные участки и элементы благоустройства.

Количество теплоты, необходимое для плавления расчетного снежного покрова с площади 144,1 м², составляет

$$Q_{сн,144} = Q_{сп} \cdot A_{св} = 1407 \cdot 144,1 = 202748,7 \text{ кДж}.$$

Поскольку снегопад, уборка и транспортирование снежных масс с придомовой территории имеют неравномерный и периодический характер, работа локального снеготаявильного пункта может быть организована в циклическом режиме, при котором максимальная производительность системы достигается в часы повышенного водоотведения, а в периоды снижения теплового потенциала работа осуществляется при уменьшенной нагрузке или за счет предварительного накопления снежной массы в приемной зоне. Для оценки достаточности теплоты сточных вод рассмотрены альтернативные режимы работы системы, соответствующие различным интервалам суточного графика водоотведения, результаты расчета приве-

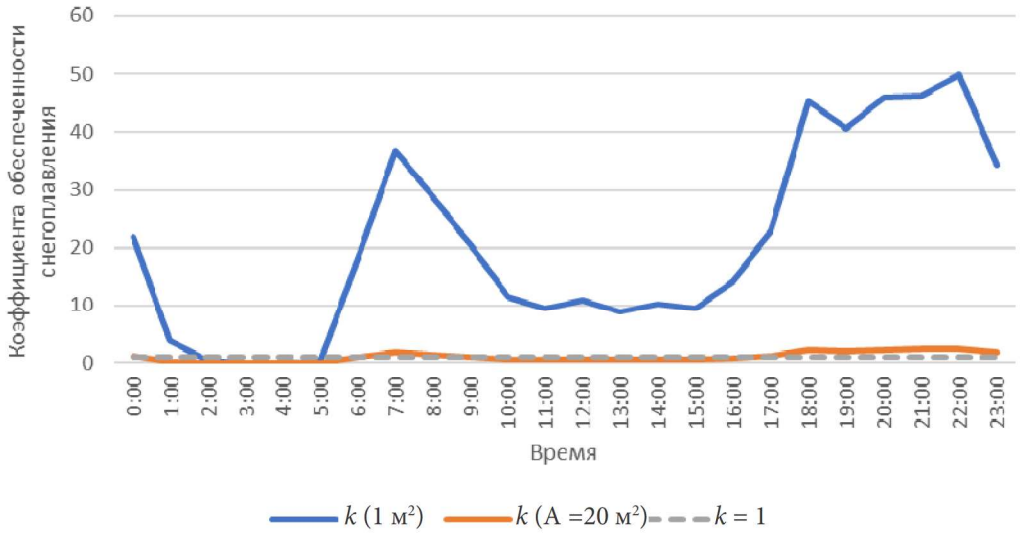

Рис. 5. Часовые значения коэффициента обеспеченности снеготаявления k_i для сточных вод многоквартирного дома (горизонтальная линия $k = 1$ соответствует границе достаточности тепла для плавления расчетного снежного покрова на площади 1 м²)

Таблица 3

Оценка обеспечиваемой площади снегоплавления при различных режимах работы локального снегоплавильного пункта*

Режим работы системы	Период работы	Продолжительность τ, ч	Средневзвешенная разность температур	Суммарный тепловой потенциал Q_τ, кДж	Обеспечиваемая площадь $A_{max,\tau}$, м²	Коэффициент обеспеченности k_τ	Вывод
Утренний режим	07:00–10:00	3	10,5	121 188,5	86,1	0,6	Недостаточно
Дневной режим	08:00–16:00	8	9,4	154 466,8	109,8	0,76	Недостаточно
Вечерний режим	18:00–22:00	4	14,4	250 638,0	178,1	1,24	Достаточно
Суточный режим	00:00–24:00	24	10,6	690 348,4	490,7	3,4	Достаточно

* Требуемое количество теплоты для $A_{св}$ = 144,1 м² равно 202 748,7 кДж.

дены в табл. 3. Расчетная разность температур при определении теплового потенциала сточных вод принималась переменной по часам суток:

$$\Delta T_i = T_{ст,i} - T_{min},$$

где $T_{ст,i}$ — температура сточных вод на выпуске здания в i-й час, °С; T_{min} —минимально допустимая температура сточных вод после отбора теплоты, °С.

В расчете принято T_{min} = 10 °С. Следовательно, потенциально извлекаемая теплота определялась при условии охлаждения сточных вод до 10 °С.

Для периода работы системы средневзвешенная разность температур определяется выражением

$$\Delta T_\tau = \frac{Q_\tau}{\rho \cdot c_p \cdot V_\tau},$$

где Q_τ — суммарное количество потенциально извлекаемой теплоты за период работы системы, кДж; ρ — плотность сточных вод, кг/м³; c_p — удельная теплоемкость воды, кДж/(кг · °С); V_τ — объем сточных вод за период, м³.

Для дополнительной оценки допустимости отбора теплоты от сточных вод исследуемого здания рассмотрено его возможное влияние на общий температурный режим сточных вод, поступающих на очистные сооружения канализации. Согласно официальным данным[3], общая производительность очистных сооружений канализации города Вологды составляет 150 тыс. м³/сут, из них биологической очистки — 120 тыс. м³/сут. При принятом в расчете расходе сточных вод здания $Q_д$ = 15,58 м³/сут доля стоков данного многоквартирного дома в общем притоке на ОСК составляет

$$\varphi = \frac{15,58}{150000} = 1,039 \cdot 10^{-4}.$$

В процентном выражении

$$\varphi = 0,01039\ \%.$$

Следовательно, доля сточных вод одного многоквартирного дома в общем притоке на ОСК является пренебрежимо малой. Если принять, что после отбора теплоты температура сточных вод здания снижается на 8,5 °С, то расчетное изменение средней температуры суммарного потока на ОСК составит

$$\Delta T_{ОСК} = 1,039 \cdot 10^{-4} \cdot 8,5 = 8,83 \cdot 10^{-4}\ °С.$$

Полученные значения находятся на уровне тысячных долей градуса, что свидетельствует о практически незначимом влиянии отбора теплоты сточных вод одного многоквартирного жилого дома на общий температурный режим стоков, поступающих на очистные сооружения канализации. Однако

[3] Программа комплексного развития систем коммунальной инфраструктуры муниципального образования «Город Вологда» на 2015–2035 годы: утв. решением Вологодской городской Думы от 28.05.2015 № 354.

Таблица 4

Сценарная оценка влияния масштабирования отбора теплоты сточных вод на температуру притока на ОСК

Сценарий масштабирования, N аналогичных зданий	Расход этих зданий, м³/сут	Доля от притока ОСК	Снижение средней температуры на ОСК, °С	Расчетная зимняя температура притока на ОСК после отбора теплоты, °С
1	15,58	0,01	0,0009	12,40
100	1558,0	1,04	0,09	12,31
500	7790,0	5,19	0,44	11,96
1000	15 580,0	10,39	0,88	11,52
2000	31 160,0	20,77	1,77	10,63

данный вывод относится только к суммарному потоку на ОСК. Для проектного применения системы требуется отдельная проверка температурного режима внутриплощадочной канализационной сети. Поэтому результаты, полученные по температуре сточных вод на выпуске здания, следует рассматривать как верхнюю оценку доступного теплового потенциала. Выбор места отбора теплоты должен выполняться с учетом риска охлаждения начальных участков дворовой канализации и снижения теплового потенциала по длине сети.

Для оценки возможного влияния масштабирования предлагаемого решения на температурный режим сточных вод, поступающих на ОСК, выполнен сценарный расчет. Снижение средней температуры суммарного притока на ОСК определялось по выражению

$$\Delta T_{\text{ОСК}} = \frac{N \cdot Q_{\text{д}}}{Q_{\text{ОСК}}} \Delta T_{\text{д}},$$

где N — количество зданий, на которых условно реализуется отбор теплоты; $Q_{\text{д}}$ — суточный расход сточных вод одного исследуемого здания, м³/сут; $Q_{\text{ОСК}}$ — суммарный расход сточных вод, поступающих на ОСК, м³/сут; $\Delta T_{\text{д}}$ — снижение температуры сточных вод одного здания после отбора теплоты, °С.

Расчетная зимняя температура притока на ОСК после отбора теплоты определялась по выражению

$$T_{\text{ОСК,после}} = T_{\text{ОСК,зим}} - \Delta T_{\text{ОСК},N},$$

где $T_{\text{ОСК,зим}} = 12,4$ °С — минимальная зимняя температура сточных вод на ОСК по данным табл. 1.

Расчет табл. 4 выполнен для условных сценариев внедрения системы отбора теплоты на различном количестве аналогичных многоквартирных зданий. Под аналогичным зданием в настоящей оценке понимается объект с суточным расходом сточных вод $Q_{\text{д}}$ = 15,58 м³/сут, соответствующим исследуемому многоквартирному дому. Суммарный расход сточных вод, поступающих на ОСК, принят равным $Q_{\text{ОСК}}$ = 150 000 м³/сут. Снижение температуры сточных вод после отбора теплоты для одного здания принято равным $\Delta T_{\text{д}}$ = 8,5 °С, что соответствует охлаждению стоков от среднесуточной температуры 18,5 °С до расчетной температуры после отбора теплоты 10 °С (фактическое снижение температуры сточных вод должно уточняться при проектировании и установке теплообменного оборудования с учетом его теплотехнических характеристик, режима водоотведения здания, температуры сточных вод в зимний период и допустимой глубины отбора теплоты).

Доля от притока ОСК характеризует отношение суммарного расхода сточных вод от рассматриваемого количества зданий к общему суточному расходу сточных вод, поступающих на очистные сооружения. Снижение средней температуры притока на ОСК определялось пропорционально этой доле

и принятому снижению температуры сточных вод одного здания после отбора теплоты.

Из результатов сценарного расчета следует, что при одиночном применении системы снижение средней температуры притока на ОСК составляет 0,0009 °С, что является практически незначимым. При условном внедрении системы на 1000–2000 аналогичных зданий снижение температуры может составить 0,88–1,77 °С. Следовательно, при использовании решения на уровне одного здания риск влияния на температурный режим ОСК отсутствует, однако при массовом внедрении требуется отдельная проверка температурного режима внутриплощадочной и городской канализационной сети в зимний период.

Обсуждение

Полученные результаты подтверждают, что сточные воды многоквартирного дома представляют собой устойчивый и достаточно концентрированный источник низкопотенциальной теплоты. Расчетный и фактический суточные тепловые потенциалы отличаются не более чем на несколько процентов, что свидетельствует о применимости принятой математической модели для инженерных оценок. Выявленная тесная линейная связь между тепловым потенциалом и расходом сточных вод, а также высокий коэффициент детерминации при аппроксимации экспериментальных данных регрессионной зависимостью позволяют использовать модель в расчетах для зданий аналогичного типа. Несмотря на то что выбранный подход позволяет выявить общие закономерности, он накладывает определенные рамки на экстраполяцию полученных данных. В этой связи перспективным представляется расширение выборки модельных объектов и повышение сезонной представительности наблюдений, уточнение часовых профилей потребления холодной и горячей воды, введение в модель переменной температуры горячей воды, а также более детальное математическое описание процессов теплопередачи в канализационных стоках.

Использование коэффициента обеспеченности снегоплавления позволяет перейти от общей оценки теплового потенциала к оценке его применимости для конкретной инженерной задачи. При этом результаты расчета следует рассматривать как предварительную энергетическую оценку, а не как готовое проектное решение. Практическое применение такой системы требует дополнительной проверки температурной устойчивости внутриплощадочной канализационной сети, выбора рационального места отбора теплоты, а также организации сбора, отвода и очистки талого стока.

Выводы

На основе нормативов водопотребления, суточных профилей расхода и температуры сточных вод разработана математическая модель формирования температурного режима бытовых стоков многоквартирного жилого дома. Модель учитывает почасовую неравномерность водопотребления и интегральные теплопотери в системе водоотведения.

Сопоставление расчетных и натурных суточных профилей показало, что модель удовлетворительно описывает характер изменения температуры сточных вод во времени и может применяться для инженерной оценки температурного режима и теплового потенциала бытовых стоков.

Введен коэффициент обеспеченности снегоплавления, характеризующий отношение располагаемого теплового потенциала сточных вод к требуемому количеству теплоты для плавления расчетного снежного покрова. Анализ показал, что в периоды повышенного водоотведения тепловой потенциал сточных вод может быть использован для локального снегоплавления при циклической организации работы системы.

Выполненная оценка носит энергетический характер и не является технико-эконо-

мическим обоснованием строительства локального снегоплавильного пункта на придомовой территории. Вопрос экономической целесообразности должен рассматриваться на следующем этапе исследования с учетом капитальных затрат на теплообменное оборудование, приемную камеру или снегоплавильный узел, дополнительные участки трубопроводов, насосное и регулирующее оборудование, строительные работы, а также эксплуатационных затрат на обслуживание системы. Отдельно должны учитываться возможное сокращение объемов механизированного вывоза снега, уменьшение транспортных затрат и повышение управляемости отвода талых вод.

Принципиальная техническая оценка показала, что в пределах рассмотренных сценариев масштабирование локальных снегоплавильных пунктов на основе отбора теплоты сточных вод не приводит к снижению расчетной температуры суммарного притока ниже принятой нижней температурной границы. Однако данный вывод справедлив только для принятых исходных условий и должен уточняться по фактической температуре сточных вод, поступающих непосредственно на стадию биологической очистки. При проектном масштабировании необходимо проверять условие сохранения температуры притока на биологическую очистку, поскольку именно этот параметр определяет риск нарушения устойчивости биологических процессов очистки.

Библиографический список

1. *Невгень А. С.* Оценка влияния водосборной территории на формирование качества водного объекта // XVI Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых: материалы Всерос. науч. конф. Вологда, 29 ноября 2022 г. В 3 т. Вологда: Вологодский гос. ун-т, 2023. Т. 1. С. 408–412. EDN WWQAHY.

2. *Невгень А. С.* Исследование процессов механической очистки талого стока с территории автомобильных дорог города Вологды // Яковлевские чтения — 2023. Системы водоснабжения и водоотведения. Современные проблемы и решения: сб. докл. участников XVIII Междунар. науч.-техн. конф., посв. памяти академика РАН С. В. Яковлева. Москва, 16–17 марта 2023 г. М.: Нац. исслед. Московский гос. строит. ун-т, 2023. С. 33–37. EDN REGNIJ.

3. *Лабузова О. М., Носкова Т. В., Лысенко М. С., Овчаренко Е. А., Папина Т. С.* Снежный покров городской территории как источник техногенного загрязнения поверхностных вод в период снеготаяния // Принципы экологии. 2016. № 4 (20). С. 33–41. EDN ZNLUKP.

4. *Федорук Н. А., Кирпичев И. А.* Исследование снежного покрова правобережной части г. Дубна и вод рек Волга и Дубна // Успехи современного естествознания. 2022. № 2. С. 76–83.

5. *Невгень А. С., Лукин С. В.* Тепловой потенциал сточных вод для плавления снега // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2024. № 4 (48). С. 76–82. DOI 10.22227/2311-1518.2024.4.76-82. EDN SAJPTQ.

6. *Aleksić N., Šušteršič V., Jurišević N., Kowalik R., Ludynia A.* Reduction of wastewater pollution using the technologies for heat recovery from wastewater in buildings — a review of available cases // Desalination and Water Treatment. 2023. Vol. 301. Pp. 242–255.

7. *Spriet J., McNabola A.* Decentralized drain water heat recovery: A probabilistic method for prediction of wastewater and heating system interaction // Energy and Buildings. 2019. Vol. 183. Pp. 684–696.

8. *Бежан А. В.* Оценка потенциала тепла сточных вод в многоквартирных жилых зданиях (на примере г. Апатиты) // Труды Кольского научного центра РАН. 2013. № 2 (15). С. 33–40. EDN SASKGH.

9. *Słyś D., Kordana S.* Financial analysis of the implementation of a Drain Water Heat Recovery unit in residential housing // Energy and Buildings. 2014. Vol. 71. Pp. 1–11.

10. *Deng Z., Mol S., van der Hoek J. P.* Shower heat exchanger: reuse of energy from heated drinking water for CO_2 reduction // Drink Water Engineering and Science. 2016. Vol. 9 (1). Pp. 1–8.

11. *Hepbasli A., Biyik E., Ekren O., Gunerhan H., Araz M.* A key review of wastewater source heat pump (WWSHP) systems // Energy Conversion and Management. 2014. Vol. 88. Pp. 700–722.

12. *Sievers J., Londong J., Stübler A., Bestenlehner D., Drück H., Schönfelder W.* Heat recovery potential of domestic grey water in the pilot project Jenfelder Au in Hamburg // Proceedings of 17th International EWA Symposium “WatEnergyResources — Water, Energy and Resources: Innovative Options and Sustainable Solutions” during IFAT, 5–9 May 2014. Hennef: European Water Association, 2014. Pp. 5–9.

13. *Alnahhal S., Spremberg E.* Contribution to exemplary in-house wastewater heat recovery in Berlin, Germany // Procedia CIRP. 2016. Vol. 40. Pp. 35–40.

14. *Рей Д., Макмайкл Д.* Тепловые насосы. М.: Энергоиздат, 1982. 224 с.

15. *Head M. A., Oleszkiewicz J. A.* Bioaugmentation for nitrification at cold temperatures // Water Research. 2004. Vol. 38 (3). Pp. 523–530.

16. *Голубев В. Н., Семенов В. А., Фролов Д. М.* Вариации водозапаса снежного покрова и интенсивности его таяния как фактор весеннего половодья на реках России // Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей: труды VIII Междунар. науч.-практ. конф. В 2 т. М.: РУДН, 2014. Т. 1. С. 365–377.

17. *Фролов Д. М.* Влияние интенсивности снегопадов и строения и структуры снежной толщи на водотоках на её теплопроводности и интенсивности намерзания льда и вероятности заторов на этих водотоках // Морские исследования и образование: тр. VII Междунар. науч.-практ. конф. М.: ООО «Поли-ПРЕСС», 2019. Т. I (IV). С. 229–238.

18. *Булавина Е. В.* Применение региональных метеорологических рядов наблюдений при проектировании схем утилизации снега на территории города Вологды // Геология в развивающемся мире: сб. науч. тр. (по материалам X Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых). В 2 т. Пермь, 18–21 апреля 2017 г. Пермь: Пермский гос. нац. исслед. ун-т, 2017. Т. 2. С. 252–253. EDN YJUZCL.

References

1. Nevgen' A. S. *Otsenka vliyaniya vodosbornoy territorii na formirovanie kachestva vodnogo ob"ekta* [Assessment of the influence of the catchment area on the formation of the quality of the water body]. *Trudy KhVI Ezhegodnoy nauchnoy sessii aspirantov i molodykh uchenykh. Trudy Vseros. nauch. konf. Vologda, 29 noyabrya 2022 g.* [Proceedings of the XVI Annual Scientific Session of Graduate Students and Young Scientists. Proceedings of the All-Russia scientific. conf. Vologda, November 29, 2022]. In 3 vols. Vologda, Vologodskiy gos. un-t Publ., 2023, vol. 1, pp. 408–412.

2. Nevgen' A. S. *Issledovanie protsessov mekhanicheskoy ochistki talogo stoka s territorii avtomobil'nykh dorog goroda Vologdy* [Study of the processes of mechanical cleaning of melt runoff from the territory of the roads of the city of Vologda]. *Yakovlevskie chteniya — 2023. Sistemy vodosnabzheniya i vodootvedeniya. Sovremennye problemy i resheniya. Trudy XVIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashchennoy pamyati akademika RAN S. V. Yakovleva. Moskva, 16–17 marta 2023 g.* [Yakovlevsky Readings – 2023. Water supply and sewerage systems. Contemporary problems and solutions. Proceedings of the XVIII International scientific and technical conf., dedicated to the memory of Academician of the Russian Academy of Sciences S. V. Yakovlev. Moscow, March 16-17, 2023]. Moscow, Moscow State University of Building Publ., 2023, pp. 33–37.

3. Labuzova O. M., Noskova T. V., Lysenko M. S., Ovcharenko E. A., Papina T. S. *Snezhniy pokrov gorodskoy territorii kak istochnik tekhnogennogo zagryazneniya poverkhnostnykh vod v period snegotayaniya* [The snow cover of the urban area as a source of technogenic pollution of surface water during snow melting]. *Printsipy ekologii – Principles of Ecology*, 2016, no. 4 (20), pp. 33–41.

4. Fedoruk N. A., Kirpichev I. A. *Issledovanie snezhnogo pokrova pravoberezhnoy chasti g. Dubna i vod rek Volga i Dubna* [Study of the snow cover of the right-bank part of Dubna city and the waters of the Volga and Dubna rivers]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya – Achievements of Modern Natural Science*, 2022, no. 2, pp. 76–83.

5. Nevgen' A. S., Lukin S. V. *Teplovoy potentsial stochnykh vod dlya plavleniya snega* [Thermal potential of wastewater for snow melting]. *Biosfernaya sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii – Biosphere compatibility: human, region, technology*, 2024, no. 4 (48), pp. 76–82. DOI 10.22227/2311-1518.2024.4.76-82.

6. *Aleksić N., Šušteršič V., Jurišević N., Kowalik R., Ludynia A.* Reduction of wastewater pollution using the technologies for heat recovery from wastewater in buildings — a review of available cases. *Desalination and Water Treatment*, 2023, vol. 301, pp. 242–255.

7. *Spriet J., McNabola A.* Decentralized drain water heat recovery: A probabilistic method for prediction of wastewater and heating system interaction. *Energy and Buildings*, 2019, vol. 183, pp. 684–696.

8. Bezhan A. V. *Otsenka potentsiala tepla stochnykh vod v mnogokvartirnykh zhilykh zdaniyakh (na primere g. Apatity)* [Assessment of the heat potential of wastewater in multi-apartment residential buildings (on the example of Apatity city)]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN – Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2013, no. 2 (15), pp. 33–40.

9. *Słyś D., Kordana S.* Financial analysis of the implementation of a Drain Water Heat Recovery unit in residential housing. *Energy and Buildings*, 2014, vol. 71, pp. 1–11.

10. *Deng Z., Mol S., van der Hoek J. P.* Shower heat exchanger: reuse of energy from heated drinking water for CO_2 reduction. *Drink Water Engineering and Science*, 2016, vol. 9 (1), pp. 1–8.

11. *Hepbasli A., Biyik E., Ekren O., Gunerhan H., Araz M.* A key review of wastewater source heat pump (WWSHP) systems. *Energy Conversion and Management*, 2014, vol. 88, pp. 700–722.

12. *Sievers J., Londong J., Stübler A., Bestenlehner D., Drück H., Schönfelder W.* Heat recovery potential of domestic grey water in the pilot project Jenfelder Au in Hamburg. *Proceedings of 17th International EWA Symposium "WatEnergyResources — Water, Energy and Resources: Innovative Options and Sustainable Solutions" during IFAT*, 5–9 May 2014. Hennef, European Water Association, 2014, pp. 5–9.

13. *Alnahhal S., Spremberg E.* Contribution to exemplary in-house wastewater heat recovery in Berlin, Germany. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 40, pp. 35–40.

14. Rey D., Makmaykl D. *Teplovye nasosy* [Heat Pumps]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982, 224 p.

15. *Head M. A., Oleszkiewicz J. A.* Bioaugmentation for nitrification at cold temperatures. *Water Research*, 2004, vol. 38 (3), pp. 523–530.

16. Golubev V. N., Semenov V. A., Frolov D. M. *Variatsii vodozapasa snezhnogo pokrova i intensivnosti ego tayaniya kak faktor vesennego polovod'ya na rekakh Rossii* [Variations in the water reserve of the snow cover and the intensity of its melting as a factor in spring floods on the rivers of Russia]. *Dinamika i termika rek, vodokhranilishch i pribrezhnoy zony morey. Trudy VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Dynamics and thermals of rivers, reservoirs and coastal zone of seas. Proceedings of the VIII International scientific-practical. conf.]. In 2 vols. Moscow, RUDN Publ., 2014, vol. 1, pp. 365–377.

17. Frolov D. M. *Vliyanie intensivnosti snegopadov i stroeniya i struktury snezhnoy tolshchi na vodotokakh na ee teploprovodnosti i intensivnosti namerzaniya l'da i veroyatnosti zatorov na etikh vodotokakh* [Influence of snowfall intensity and structure and structure of snow strata on watercourses on its thermal conductivity and ice freezing intensity and probability of congestion on these watercourses]. *Morskie issledovaniya i obrazovanie. Trudy VII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Marine research and education. Proceedings of the VII International scientific-practical conf.]. Moscow, OOO PoliPRESS Publ., 2019, vol. I (IV), pp. 229–238.

18. Bulavina E. V. *Primenenie regional'nykh meteorologicheskikh ryadov nablyudeniy pri proektirovanii skhem utilizatsii snega na territorii goroda Vologdy* [Application of regional meteorological series of observations in the design of snow utilization schemes in the city of Vologda]. *Geologiya v razvivayushchemsya mire. Trudy X Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh), Perm', 18–21 aprelya 2017 g.* [Geology in the developing world. Proceedings of the X International scientific-practical conf. of students, graduate students and young scientists, Perm, April 18–21, 2017]. In 2 vols. Perm', Permskiy gos. nats. issled. un-t Publ., 2017, vol. 2, pp. 252–253.