



А.С. Невгень, С.В. Лукин, В.А. Селиванова
Вологодский государственный университет

РЕКУПЕРАЦИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ИЗ СТОЧНЫХ ВОД: ПОТЕНЦИАЛ ВНЕДРЕНИЯ В СОЦИАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ

Статья посвящена исследованию потенциала рекуперации тепловой энергии из сточных вод как вторичного ресурса для повышения энергоэффективности зданий. На примере анализа суточной динамики водопотребления социальных объектов (четырёх школ) выявлены пиковые нагрузки (до 1100 кг/ч) в дневные часы (11:00–13:00) и значительная вариативность расхода (коэффициент неравномерности до 110). Проведен расчет теплового потенциала при охлаждении сточных вод с 15 до 5 °С. Установлено, что эффективность систем зависит от стабильности потока и соблюдения температурных ограничений. Результаты подчеркивают необходимость адаптивных технологий для оптимизации использования тепловой энергии в условиях нестабильного водопотребления. Исследование подтверждает технико-экономическую целесообразность внедрения рекуперационных систем в социальных объектах для снижения энергозатрат.

Рекуперация, тепловой потенциал, сточные воды, канализация, динамика водопотребления.

Повышение энергоэффективности зданий и использование возобновляемых и вторичных источников энергии приобретают все большее значение. Одним из перспективных решений является рекуперация тепловой энергии из сточных вод. Потенциал рекуперации тепла из сточных вод часто недооценивается и недостаточно изучен на практике, особенно на уровне бытовых и многоквартирных зданий.

Сточные воды в бытовых, промышленных или коммерческих зданиях сохраняют значительное количество тепловой энергии, которая сбрасывается в канализационную систему при температуре от 10 до 25 °С [1–4]. Данный ресурс может быть использован с помощью теплообменников и технологий тепловых насосов, применяемых в различных точках канализационной системы, от конечного потребителя до очистки воды, то есть на уровне компонентов, в зда-

ниях, в общественных коллекторах и на очистных сооружениях.

В канализационной системе согласно [5–8] существуют четыре основных места для рекуперации энергии из сточных вод (рис. 1):

1. На уровне компонентов – рекуперация тепла интегрирована непосредственно в сантехнические приборы.
2. На уровне здания – рекуперация тепла осуществляется до выброса стока в канализационный коллектор.
3. В системе канализации – рекуперация тепла осуществляется в системе канализации и возвращается в близлежащие здания.
4. На очистных сооружениях – рекуперации тепла сточных вод происходит на очистных сооружениях канализации.

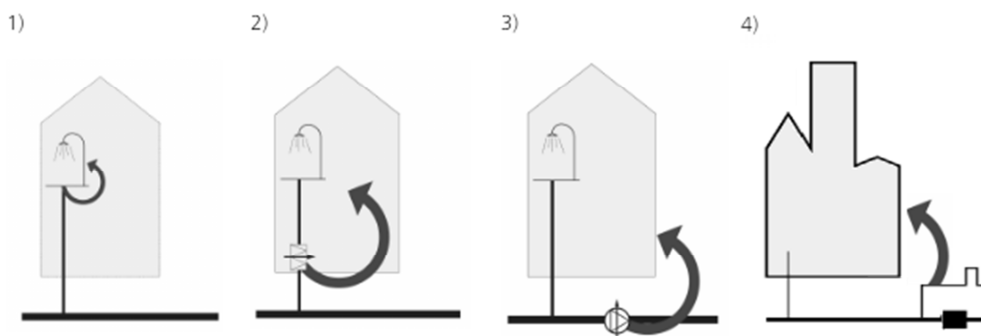


Рис. 1. Возможные варианты рекуперации тепла из сточных вод [4]



Рис. 2. Динамика водопотребления в наблюдаемых школах на протяжении суток

Сточные воды представляют собой ограниченный, но значимый источник энергии, потенциал рекуперации тепла из которых определяется не только их температурными характеристиками, но и объемом расхода. Чем выше объем сточных вод, тем больше тепловой энергии может быть извлечено и использовано для подогрева холодной воды или отопления.

Однако эффективность рекуперации тепла зависит от стабильности потока сточных вод и их температурного режима, которые варьируются в зависимости от времени суток, сезонности и характера водопользования в здании. Таким образом, для максимизации потенциала рекуперации тепла необходимо учитывать как температурные параметры, так и динамику расхода сточных вод.

В связи с этим анализ динамики водопотребления является важным этапом для оценки возможностей рекуперации тепла.

Для начала рассмотрим динамику водопотребления социальных объектов (школ). На представленной диаграмме (рис. 2) отражена динамика водопотребления в четырех школах (Школа № 1, Школа № 2, Школа № 3 и Школа № 4) в течение суточного цикла, что позволяет оценить потенциал рекуперации тепла сточных вод. Ось абсцисс (горизонтальная ось) представляет временной интервал с шагом в один час, начиная с 00:00 и заканчивая 23:00. Ось ординат (вертикальная ось) отображает количество стока в кг с шагом 200 кг/ч, достигая максимального значения 1100 кг/ч.

Анализ суточной динамики водопотребления в четырех школах показал, что пиковые нагрузки (до 1100 кг/ч у Школы № 3) приходятся на дневные часы (11:00–13:00), что коррелирует с учебным расписанием и активным использованием воды в столовых и санузлах, тогда как минимальные значения (0–10 кг/ч) наблюдаются ночью. Среднесуточное потребление варьируется от 200 кг (Школа № 4) до 400 кг (Школа № 3), при этом коэффициент неравномерности (макс/мин) достигает 94–110, что подчеркивает высокую вариативность расхода.

Динамика водопотребления в школах демонстрирует четкую зависимость от режима работы учреждений. Пиковые значения расхода воды приходятся на середину дня, что указывает на высокий потенциал рекуперации тепла в этот период. Однако для эффективного использования тепловой энергии сточных вод

необходимо учитывать нестабильность потока в утренние и вечерние часы.

Таблица 1

Общие статистические показатели водопотребления (кг/ч)

Показатель	Школа № 1	Школа № 2	Школа № 3	Школа № 4
Среднее за сутки	250 кг/ч	300 кг/ч	400 кг/ч	200 кг/ч
Максимум	640 кг/ч	940 кг/ч	1100 кг/ч	910 кг/ч
Минимум	10 кг/ч	10 кг/ч	0 кг/ч	0 кг/ч
Стандартное отклонение	~214 кг/ч	~287 кг/ч	~404 кг/ч	~314 кг/ч

Определим тепловой потенциал Q – количество теплоты, которое можно получить при извлечении низкопотенциального тепла из стоков, определяющееся по формуле:

$$Q = G \cdot \Delta T \cdot c, \quad (1)$$

где Q – количество теплоты, кДж/ч; G – количество стоков, кг/ч; ΔT – допустимое изменение температуры сточных вод, °С; c – теплоемкость воды, $c=4,18$ кДж/(кг·К).

Допустимое изменение температуры сточных вод $\Delta T=10$ °С принимаем как разность температуры стоков на выходе из здания 15 °С и минимальной температуры сбрасываемых стоков 5 °С.

Скорость биологических и химических реакций в некоторых элементах очистки сточных вод сильно зависит от температуры [3]. Обязательным условием использования сточных вод в зданиях для получения тепла является проверка воздействия сточных вод после рекуперации тепла на систему отвода сточных вод и работу очистных сооружений.

Согласно СП 32.13330.2018 «СНиП 2.04.03-85 Канализация. Наружные сети и сооружения» температура сбрасываемых сточных вод не должна превышать 40 °С. Однако минимальная температура обычно не регламентируется напрямую, но на практике она должна быть выше 0 °С, чтобы избежать замерзания стоков в зимний период. Поэтому в расчете теплового потенциала принимаем минимальную температуру сбрасываемых стоков 5 °С. Результаты расчетов представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2
**Максимальный тепловой потенциал
(пиковые значения)**

Школа	Расход (кг/ч)	Тепловой потенциал (кДж/ч)	Тепловой потенциал (кВт·ч)
№ 1	640	26 752	7,43
№ 2	940	39 292	10,91
№ 3	1100	45 980	12,77
№4	910	38 038	10,57

Таблица 3
Среднесуточный тепловой потенциал

Школа	Средний расход (кг/ч)	Тепловой потенциал (кДж/ч)	Тепловой потенциал (кВт·ч)
№ 1	250	10 450	2,90
№ 2	300	12 540	3,48
№ 3	400	16 720	4,64
№ 4	200	8360	2,32

Выводы

1. Анализ суточной динамики водопотребления в школах выявил значительный потенциал рекуперации тепла, особенно в дневные часы (11:00–13:00), когда расход достигает пиковых значений (до 1100 кг/ч). Тепловой потенциал при охлаждении воды с 15 до 5 °С составляет от 7,43 до 12,77 кВт·ч в пиковые периоды.

2. Эффективность рекуперации зависит от стабильности расхода и температурного режима. Высокая вариативность водопотребления (коэффициент неравномерности до 110) требует внедрения адаптив-

ных систем, таких как буферные накопители и регулируемые тепловые насосы, для работы в условиях переменной нагрузки.

Литература

1. Бежан, А. В. Оценка потенциала тепла сточных вод в многоквартирных жилых зданиях (на примере г. Апатиты) / А. В. Бежан // Труды Кольского научного центра РАН. – 2013. – № 2 (15). – С. 33–40.
2. Schmid F. Sewage Water: Interesting Source for Heat Pumps. – 2008.
3. Cipolla, S. S. Heat recovery from urban wastewater: analysis of the variability of flow rate and temperature in the sewer of Bologna, Italy / S. S. Cipolla, M. Maglionico // Energy procedia. – 2014. – Vol. 45. – P. 288–297.
4. Невгень, А. С. Исследование теплового потенциала сточных вод в многоквартирном жилом доме / А. С. Невгень // Молодые исследователи – регионам : Материалы Международной научной конференции (Вологда, 23 апреля 2024 г.). – Вологда : Вологодский государственный университет, 2024. – С. 1301–1303. – EDN DAGMFI.
5. Выборнов, Д. Исследование проблем утилизации теплоты канализационных стоков жилых зданий / Д. Выборнов, З. Удовиченко, Н. Долгов // Энергетические системы. – 2021. – Т. 6. – № 1. – С. 70–80.
6. Schmid F. Sewage Water: Interesting Source for Heat Pumps. – 2008.
7. Arnell M., Lundin E., Jeppsson U. Sustainability Analysis for Wastewater Heat Recovery-Literature Review. – 2017.
8. Słyś D. Financial analysis of the implementation of a Drain Water Heat Recovery unit in residential housing / D. Słyś, S. Kordana // Energy and Buildings. – 2014. – Т. 71. – С. 1–11.

*A.S. Nevgen, S.V. Lukin, V.A. Selivanova
Vologda State University*

RECOVERY OF THERMAL ENERGY FROM WASTEWATER: POTENTIAL FOR IMPLEMENTATION IN SOCIAL INFRASTRUCTURE

The article is devoted to the study of the potential of thermal energy recovery from wastewater as a secondary resource for improving the energy efficiency of buildings. Using the example of an analysis of the daily dynamics of water consumption in social facilities (four schools), peak loads (up to 1100 kg/hour) during daytime hours (11:00-13:00) and significant variability in consumption (coefficient of unevenness up to 110) were revealed. The calculation of the thermal potential during wastewater cooling from 15°C to 5°C was made. It is established that the effectiveness of the systems depends on the stability of the flow and compliance with temperature restrictions. The results highlight the need for adaptive technologies to optimize the use of thermal energy in conditions of unstable water consumption. The study confirms the feasibility of implementing recuperation systems in social facilities to reduce energy consumption.

Recovery, thermal potential, waste water, sewerage, dynamics of water consumption.