



Оценка тепловой эффективности подраковинного рекуператора сточных вод

Рецензия эксперта на статью получена 17.03.2026 [The expert review of the article was received on March 17, 2026]

Вопросы энергосбережения в системах горячего водоснабжения зданий сохраняют высокую актуальность как для нового строительства, так и для модернизации существующего жилищного фонда. Одним из перспективных направлений повышения энергетической эффективности является использование низкопотенциальной теплоты сточных вод, образующихся в процессе бытового водопотребления. Значительная часть тепловой энергии, затраченной на подготовку горячей воды, после использования отводится в канализацию и в большинстве случаев не используется повторно.

Одним из способов снижения этих потерь является применение локальных рекуператоров, обеспечивающих предварительный подогрев холодной воды за счёт теплоты сточных вод непосредственно вблизи санитарно-технического прибора [1]. Такие решения особенно интересны благодаря компактности, возможности автономного применения и отсутствию необходимости в масштабной реконструкции инженерных сетей здания [2]. Вместе с тем существующие исследования в данной области в большей степени ориентированы на режимы водоразбора со сравнительно длительным временем работы [3], при которых тепло-

обменное устройство успевает выйти на квазистационарный режим.

Для обычных раковин и умывальников характерен иной режим эксплуатации. Водоразбор здесь, как правило, имеет кратковременный, прерывистый и переменный характер. В результате тепловая эффективность подраковинного рекуператора определяется не только площадью теплообменной поверхности и температурным напором, но и соотношением между продолжительностью отдельного цикла водоразбора и временем выхода аппарата на рабочий режим. При малой длительности цикла значительная часть процесса может протекать в переходной области.

Таким образом, задача оценки тепловой эффективности подраковинного рекуператора в условиях кратковременного водоразбора требует отдельного рассмотрения. Прямой перенос результатов, полученных для более длительных режимов эксплуатации, в данном случае представляется недостаточно обоснованным. Необходимо разработать расчётного подхода, позволяющего учитывать особенности нестационарной работы компактного теплообменного устройства и определять условия, при которых его применение является технически и энергетически оправданным.

УДК 662.99. Научная специальность: 2.4.5.

Оценка тепловой эффективности подраковинного рекуператора сточных вод

Валерий Игоревич Рудой, аспирант, кафедра энергетики, Забайкальский государственный университет (ЗабГУ, г. Чита); **Михаил Владимирович Кобылкин**, к.т.н., доцент, кафедра энергетики, ЗабГУ; **Юлия Олеговна Риккер**, старший преподаватель, кафедра энергетики, ЗабГУ

Представлены результаты оценки тепловой эффективности подраковинного рекуператора сточных вод, предназначенного для предварительного подогрева холодной воды. Цель работы — определить влияние кратковременного водоразбора на эффективность рекуперации. Методика включала балансовое моделирование и экспериментальное уточнение расчётных параметров. Установлено, что эффективность опытного образца составляет около 19 %. Результаты применимы при проектировании компактных устройств утилизации теплоты сточных вод. Показана необходимость учёта нестационарности процесса.

Ключевые слова: рекуперация теплоты, сточные воды, подраковинный рекуператор, тепловая эффективность, кратковременный водоразбор, нестационарный теплообмен, утилизация низкопотенциальной теплоты.

UDC 662.99. Scientific specialty: 2.4.5.

Evaluation of the thermal efficiency of a subcellular wastewater recuperator

Valery I. Rudoy, postgraduate student, the Department of Energy, Zabaikalsky State University (ZabGU, Chita); **Mikhail V. Kobylkin**, PhD (Engineering), Associate Professor, the Department of Energy, ZabGU; **Yulia O. Rikker**, Senior Lecturer, the Department of Energy, ZabGU

The results of the evaluation of the thermal efficiency of a subcellular wastewater recuperator designed for preheating cold water are presented. The purpose of the work is to determine the effect of short-term water intake on the efficiency of recovery. The methodology included balance modeling and experimental refinement of the calculated parameters. It was found that the efficiency of the prototype is about 19%. The results are applicable in the design of compact waste water heat recovery devices. The necessity of taking into account the nonstationarity of the process is shown.

Key words: heat recovery, waste water, subcellular heat recovery, thermal efficiency, short-term water collection, non-stationary heat exchange, utilization of low-potential heat.

Целью настоящей работы является оценка тепловой эффективности подраковинного рекуператора сточных вод при кратковременном водоразборе и выявление факторов, в наибольшей степени влияющих на полезную утилизацию теплоты.

Для решения поставленной задачи было проведено математическое моделирование с последующей верификацией модели путём проведения физического моделирования.

Тепловая эффективность рекуператора может быть выражена как отношение количества теплоты на ГВС в режиме рекуперации к количеству теплоты на ГВС без рекуператора в тех же условиях. Математическое моделирование процесса теплообмена при рекуперации сводится к ряду классических балансовых уравнений:

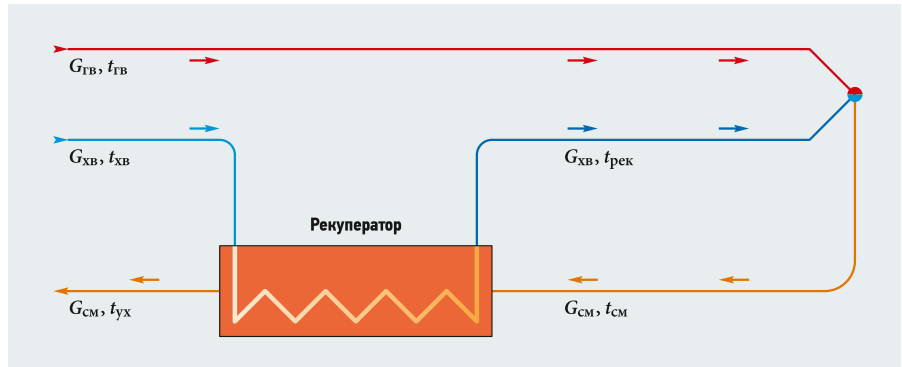
$$\begin{aligned} Q &= \pi K_l \Delta t; \\ Q &= G_{\text{хв}} c_p (t_{\text{рек}} - t_{\text{хв}}); \\ Q &= G_{\text{см}} c_p (t_{\text{см}} - t_{\text{ух}}) \eta_{\text{то}}; \\ G_{\text{см}} &= G_{\text{хв}} + G_{\text{гв}}; \\ t_{\text{см}} &= \frac{G_{\text{хв}} t_{\text{рек}} + G_{\text{гв}} t_{\text{гв}}}{G_{\text{см}}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где Q — количество теплоты, переходящее от сточных вод к холодной воде, Вт; K_l — линейный коэффициент теплопередачи, Вт/(м·К); l — длина теплообменной поверхности, м; Δt — температурный напор, °С; $G_{\text{хв}}$, $G_{\text{гв}}$ и $G_{\text{см}}$ — расход холодной, горячей воды и их смеси соответственно, кг/с; c_p — средняя массовая теплоёмкость воды при постоянном давлении, Дж/(кг·°С); $t_{\text{хв}}$, $t_{\text{гв}}$, $t_{\text{см}}$, $t_{\text{рек}}$ и $t_{\text{ух}}$ — температуры холодной, горячей воды, смеси, температура воды на выходе из рекуперативного теплообменника и температура уходящей в стоки воды, соответственно, °С [4].

На схеме расположение данных величин выглядит так, как указано на рис. 1.

При решении системы балансовых уравнений (1) относительно температуры подогретой воды на выходе из рекуператора трек возникает необходимость определения коэффициента теплоотдачи от стоков к трубке при помощи формулы А. А. Жукаускаса с поправкой на наличие искусственной турбулизации потока. Данная поправка не может быть определена аналитически и требует уточнения на физической модели. Физическая модель для эксперимента по определению поправочного коэффициента к формуле А. А. Жукаускаса представлена на рис. 2.

Результаты проведённого моделирования на физической модели приведены в графическом виде на рис. 3. В процессе обработки полученных данных проводится определение требуемого поправочного коэффициента.



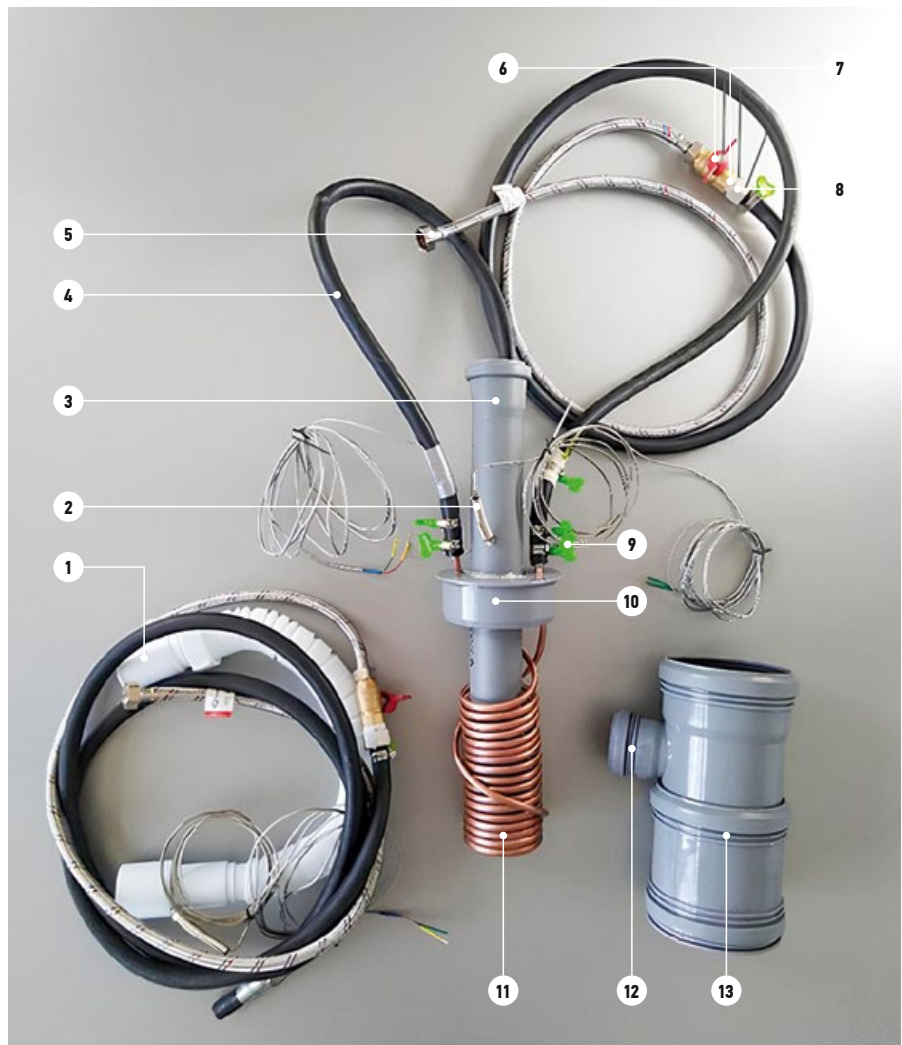
:: Рис. 1. Схема подключения рекуператора

Мгновенное значение тепловой эффективности в данном случае будет определяться по следующей зависимости:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{рек}} &= \frac{G_{\text{хв}} (t_{\text{рек}} - t_{\text{хв}})}{G_{\text{гв}} (t_{\text{гв}} - t_{\text{хв}}) + G_{\text{хв}} (t_{\text{рек}} - t_{\text{хв}})} 100 \% = \\ &= \frac{1}{1 + \frac{G_{\text{гв}} (t_{\text{гв}} - t_{\text{хв}})}{(G_{\text{см}} - G_{\text{гв}}) (t_{\text{рек}} - t_{\text{хв}})}} 100 \%, \quad (2) \end{aligned}$$

где $\eta_{\text{рек}}$ — коэффициент тепловой эффективности, %.

Таким образом, эффективность зависит от температур и расходов теплоносителей. Сопоставление условий по качественным характеристикам ГВС с рекуператором и без него обязывает проводить изменение расходов теплоносителей. Это, в свою очередь, вносит корректировки в систему балансов (1). От начального момента времени до полной стабилизации процесса может проходить различное количество времени, которое зависит от нескольких факторов: температура окружающей сре-



:: Рис. 2. Физическая модель для эксперимента по определению поправочного коэффициента к формуле А. А. Жукаускаса [1 — гибкая гофрированная труба $\varnothing 50$ мм; 2 — датчик температуры (термопара) ТХА (тип К) $\varnothing 6$ мм; 3 — канализационная труба $\varnothing 50$ мм, $L = 450$ мм; 4 — резиновый рукав (шланг) для газа $D_u = 9$ мм, $L = 160 / 160 / 80$ см; 5 — подводка для воды с латунной гайкой; 6 — кран ВН «бабочка» $D_u = 15$ мм; 7 — латунный ниппель $D_u = 15$ мм; 8 — штуцер $D_u = 15$ мм; 9 — металлический хомут; 10 — канализационная заглушка $\varnothing 110$ мм; 11 — медная труба $\varnothing 1/4"$, $L = 420$ см; 12 — канализационный тройник $\varnothing 110 \times 50/90$ мм; 13 — канализационная муфта $\varnothing 110$ мм]

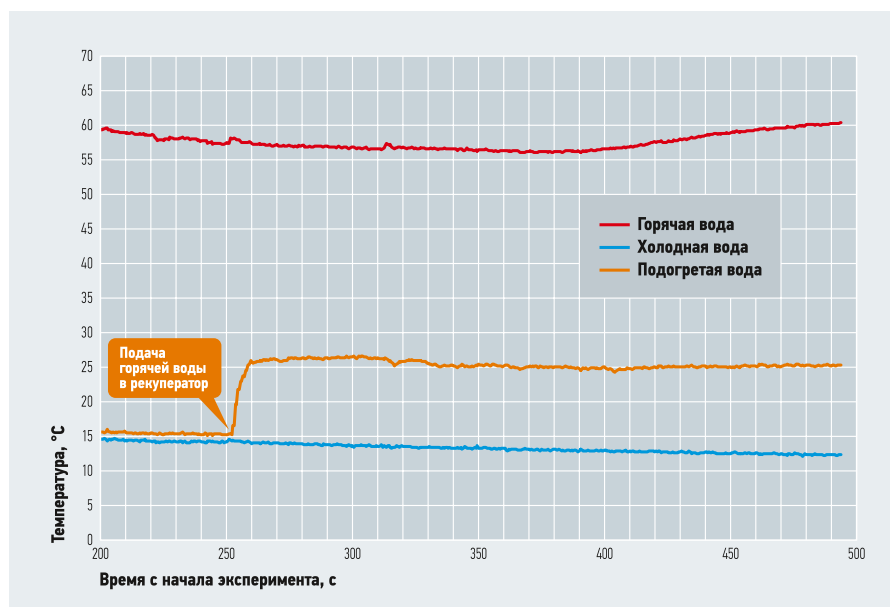


Рис. 3. Результаты физического моделирования

ды, тепловая инерция материалов теплообменника, характеристики корпуса теплообменника и величина потерь теплоты в процессе. На практике дополнительно возникает корректировка по температуре горячей и холодной воды из-за необходимости пропуска застоявшейся воды в системе водоснабжения.

Главная же особенность рекуператоров, располагаемых под раковинами, заключается в режиме их работы. То есть при кратковременном использовании не всегда можно выйти в стационарный или квазистационарный режим. Раковины в офисных помещениях чаще всего используются разово не более трёх минут, в то время как мойки в учреждениях общепита могут эксплуатироваться достаточно длительное время.

Проведённые опытные испытания на базе раковины в помещении вуза показывают, что эффективность рекуператора конкретной конструкции [5] составляет примерно 19 %, что подтверждает принци-

пиальную работоспособность рассматриваемого технического решения. Данный показатель можно рассматривать как базовый для возможной модернизации конструкции по двум направлениям: во-первых, сокращение потерь, во-вторых, оптимизация конструкции под конкретный режим водоразбора.

В работе выполнена оценка тепловой эффективности подраковинного рекуператора сточных вод, предназначенного для работы в условиях кратковременного водоразбора, характерного для эксплуатации раковин и умывальников. В отличие от ранее рассмотренных режимов более продолжительного водоразбора, показано, что для подраковинных устройств определяющим фактором является не только площадь теплообменной поверхности, но и нестационарный характер процесса, обусловленный малой длительностью отдельных циклов использования.

Новым результатом работы является предложенный подход к оценке тепловой

эффективности подраковинного рекуператора, основанный на системе балансовых уравнений и учитывающий особенности реального режима эксплуатации устройства. Установлено, что при расчёте подобных рекуператоров необходимо учитывать не только температурный напор и расходы теплоносителей, но и влияние переходных режимов, тепловой инерции конструкции, тепловых потерь в окружающую среду, а также особенности теплоотдачи со стороны сточных вод. Тем самым показано, что использование стационарных представлений для оценки эффективности подраковинных рекуператоров при кратковременном водоразборе является недостаточным.

Дополнительным результатом работы является экспериментальное уточнение расчётной модели на физической установке. Получены опытные данные, позволяющие корректировать расчёт теплоотдачи со стороны сточных вод и использовать модель для дальнейшего анализа и совершенствования конструкции.

Теоретическое значение полученных результатов заключается в развитии подхода к расчёту компактных локальных устройств рекуперации теплоты сточных вод, работающих в нестационарных режимах. Практическое значение состоит в возможности использования полученных зависимостей и экспериментальных данных при дальнейшей оптимизации конструкции подраковинного рекуператора, снижении тепловых потерь и адаптации параметров аппарата к конкретным условиям эксплуатации. Полученные результаты могут служить основой для разработки инженерной методики расчёта и проектирования компактных систем утилизации теплоты сточных вод для зданий различного назначения. ●



1. Wehbi Z., Taher R., Faraj J., Ramadan M., Castelain C., Khaled M. A short review of recent studies on wastewater heat recovery systems: Types and applications. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. Suppl. 9. Pp. 896–907.
2. Kordana-Obuch S., Starzec M. Horizontal shower heat exchanger as an effective domestic hot water heating alternative. *Energies*. 2022. Vol. 15. Suppl. 13. No. 4829.
3. Куницкий В.А., Лукин С.В. Определение эффективности локальной утилизации теплоты сточных вод на основе теплообменного аппарата // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*, 2024. Т. 26. №4. С. 136–149.
4. Кобылкина А.В., Кобылкин М.В., Риккер Ю.О. Математическое моделирование работы рекуператора теплоты «серых» стоков / Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: Сб. науч. статей V Межд. науч. конф. (30–31.05.021, Казань). Ч. 1 / НПП «МедПромДеталь»; ООО «Газпром трансгаз Казань». — Казань: ООО «Конверт», 2021. С. 89–91.
5. Патент РФ №216381 U1. МПК E03C 1/22, F28D 7/02. Рекуператор теплоты сточных вод / А.В. Кобылкина, М.В. Кобылкин, Ю.О. Риккер. №2022111237. Заявл. 25.04.2022; опубл. 31.01.2023.

References — see page 78.

Evaluation of the thermal efficiency of a subcellular wastewater recuperator. Pp. 27–29.

Valery I. Rudoy, postgraduate student, the Department of Energy, Zabaikalsky State University (ZabGU, Chita city); **Mikhail V. Kobylkin**, PhD (Engineering), Associate Professor, the Department of Energy, ZabGU; **Yulia O. Rikker**, Senior Lecturer, the Department of Energy, ZabGU

1. Z. Wehbi, R. Taher, J. Faraj, M. Ramadan, C. Castelain, M. Khaled. A short review of recent studies on wastewater heat recovery systems: Types and applications. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. Suppl. 9. Pp. 896–907.
2. S. Kordana-Obuch, M. Starzec. Horizontal shower heat exchanger as an effective domestic hot water heating alternative. *Energies*. 2022. Vol. 15. Suppl. 13. No. 4829.
3. V.A. Kunitskij, S.V. Lukin. *Opredelenie effektivnosti lokal'noj utilizatsii teploty stochnykh vod na osnove teploobmennogo apparata* [Determining the efficiency of local wastewater heat recovery based on a heat exchanger]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki* [News of Higher Educational Institutions. Series: Problems of Energy]. 2024. Vol. 26. No. 4. Pp. 136–149. [In Russian]
4. A.V. Kobylkina, M.V. Kobylkin, Yu.O. Rikker. *Matematicheskoe modelirovanie raboty rekuperatora teploty "serykh" stokov* [Mathematical modeling of the operation of a heat recuperator for "gray" wastewater]. *Prioritetnye napravleniya innovatsionnoj deyatel'nosti v promyshlennosti: Sb. nauch. statej V Mezhd. nauch. konf.* [Priority areas of innovative activity in industry: Coll. of scientific articles of the V International Scientific Conference]. Part 1. May 30–31, 2021. Kazan. NPP "MedPromDetal" ["MedPromDetal" Research and Production Enterprise]; OOO "Gazprom transgaz Kazan" ["Gazprom transgaz Kazan", LLC]. OOO "Konvert" ["Konvert", LLC]. 2021. Pp. 89–91. [In Russian]
5. Patent of the Russian Federation (RU) 216381 U1. International Patent Classification (IPC): E03C 1/22, F28D 7/02. *Rekuperator teploty stochnykh vod* [Wastewater heat recovery unit]. A.V. Kobylkina, M.V. Kobylkin, Yu.O. Rikker. No. 2022111237. Decl.: April 25, 2022. Publ.: January 31, 2023. [In Russian]