



Научная статья

УДК 66.045

DOI: 10.52957/2782-1900-2026-7-2-67-73

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО И ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ РЕКУПЕРАТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

В.К. Леонтьев<sup>1</sup>, О.Н. Кораблева<sup>1</sup>, А.В. Леонтьев<sup>2</sup>

Валерий Константинович Леонтьев, канд. техн. наук; Кораблева Ольга Николаевна, канд. хим. наук, доцент, Леонтьев Алексей Валерьевич, начальник сектора исследовательских и испытательных работ в области пожарной безопасности.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», 150023, Россия, г. Ярославль, Московский пр., д. 88; [korablevaon@ystu.ru](mailto:korablevaon@ystu.ru)

<sup>2</sup>ФГБУ «Судебно-экспертное учреждение федеральной противопожарной службы «испытательная пожарная лаборатория» по Ярославской области», 150539, Россия, Ярославская область, Ярославский район, р.п. Лесная Поляна, д. 4; [alex-leontyev@mail.ru](mailto:alex-leontyev@mail.ru)

**Ключевые слова:**  
рекуперативные теплообменники, теплота, эксергия, энергетический и эксергетический коэффициенты полезного действия

**Аннотация.** В статье рассмотрены способы определения энергетического и эксергетического коэффициентов полезного действия теплообменных аппаратов. Для теплообменника «труба в трубе» и кожухотрубного теплообменника получены экспериментальные зависимости энергетического и эксергетического коэффициентов полезного действия от величины  $KS/W$ . Показано, что для противоточной схемы движения теплоносителей значения обоих коэффициентов полезного действия выше, чем для прямоточной. Установлено, что при малых значениях величины  $KS/W$  (меньше 0,22 – 0,24) значения энергетического и эксергетического коэффициентов полезного действия для кожухотрубного теплообменника больше, чем для теплообменника «труба в трубе». При больших значениях  $KS/W$  эффективность теплообменника «труба в трубе» выше, чем кожухотрубного теплообменника.

### Для цитирования:

Леонтьев В.К., Кораблева О.Н., Леонтьев А.В. Определение энергетического и эксергетического коэффициентов полезного действия рекуперативных теплообменников // От химии к технологии шаг за шагом. 2026. Т. 7, вып. 2. С. 67-73. URL: <https://chemintech.ru/ru/nauka/issue/7273/view>

### Введение

Ранее, на основе экспериментальных данных, определена термодинамическая эффективность рекуперативных теплообменников. Проведено сравнение термодинамической эффективности рекуперативных теплообменников для двух схем движения теплоносителей: прямотока и противотока. Подтверждено преимущество противоточной схемы движения теплоносителей при которой термодинамическая эффективность на 5-10% выше чем при прямотоке. Также показано, что при выбранных расходах теплоносителей термодинамическая эффективность теплообменника «труба в трубе» выше, чем для кожухотрубного теплообменника [1].



### Основная часть

Целью данной работы является: на основе энергетического и эксергетического коэффициентов полезного действия провести сравнение эффективности работы рекуперативных теплообменников.

Энергетический КПД теплообменников – это один из важнейших показателей эффективности работы теплообменника [2-6].

Наглядное представление энергетических и материальных потоков теплообменного процесса можно представить на диаграмме (рис. 1).

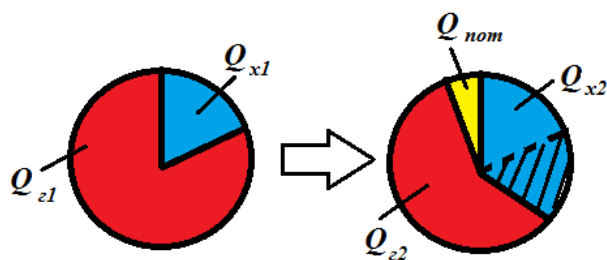


Рис. 1. Диаграмма для процесса теплопередачи без изменения агрегатного состояния сред.

Энергетический КПД характеризует соотношение между теплотой, полученной холодным теплоносителем, и максимально возможным (располагаемым) количеством теплоты, которое может быть передано холодному теплоносителю. Он показывает, какую долю максимально возможной теплоты реально передали через аппарат:

$$\eta_{\text{эн}} = \frac{Q_{x2} - Q_{x1}}{Q_{r1}}$$

где  $Q_{x2}$  – количество теплоты, выходящее из теплообменника с холодным теплоносителем, Вт;

$Q_{x1}$  – количество теплоты, входящее из теплообменника с холодным теплоносителем, Вт;

$Q_{r1}$  – количество теплоты, входящее из теплообменника с горячим теплоносителями, Вт.

$$Q_{x2} = Gct_{x2},$$

$$Q_{x1} = Gct_{x1},$$

$$Q_{r1} = Gct_{r1}.$$

где  $G$  – массовый расход теплоносителя, кг/с;

$c$  – удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·К);

$t_{x2}$  – температура холодного теплоносителя на выходе из теплообменника, °С;

$t_{x1}$  – температура холодного теплоносителя на входе в теплообменник, °С;

$t_{r1}$  – температура горячего теплоносителя на входе в теплообменник, °С.

Количество теплоты, переданное холодному теплоносителю определяется как

$$Q_{x2} - Q_{x1} = Q_x.$$

На энергоэффективность теплообменников влияют многие факторы, в том числе скорость движения теплоносителей, которые способствуют увеличению коэффициентов теплопередачи; загрязнение поверхностей теплообменника; конструктивные параметры теплообменников (винтовые нарезки в трубах, спиральные каналы, поперечные перегородки).



Для повышения энергоэффективности теплообменников используются методы интенсификации теплообмена и уменьшения загрязнения поверхностей теплообменника. Однако следует учитывать, что интенсификация теплообмена приводит к увеличению затрат энергии, необходимых для преодоления растущего гидравлического сопротивления. Следовательно, увеличение интенсивности теплопередачи должно быть согласовано с увеличением гидравлического сопротивления [3].

Экспериментальные исследования проводились для рекуперативных теплообменников типа «труба в трубе» и одноходового кожухотрубного теплообменника. Основные параметры теплообменников приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Основные параметры теплообменников

Теплообменник «труба в трубе»	Кожухотрубный теплообменник
Диаметр внутренней трубы $d_n \times \delta_{ст} = 27 \times 3$ мм; Диаметр наружной трубы $D_n \times \delta_{ст} = 48 \times 4$ мм; Общая длина теплообменника $L = 6$ м; Поверхность теплопередачи $S = 0,452$ м <sup>2</sup> ; Коэффициент теплопроводности материала стенки $\lambda_{ст} = 46,5$ Вт/(м К).	Диаметр внутренней трубы $d_n \times \delta_{ст} = 14 \times 2$ мм; Диаметр кожуха $D_k = 200$ мм; Общая длина теплообменника $L = 0,5$ м; Поверхность теплопередачи $S = 1,34$ м <sup>2</sup> ; Коэффициент теплопроводности материала стенки $\lambda_{ст} = 17,5$ Вт/(м К).

Для измерения начальных и конечных значений температур теплоносителей используются термопары, подключенные к термопреобразователю сопротивления. Сигнал от термопреобразователя поступает в данные программы компьютера. Расходы теплоносителей измерялись ротаметрами и поддерживались одинаковыми для горячей и холодной воды.

Результаты опытных и расчетных данных по определению энергетического КПД приведены в таблице 2.

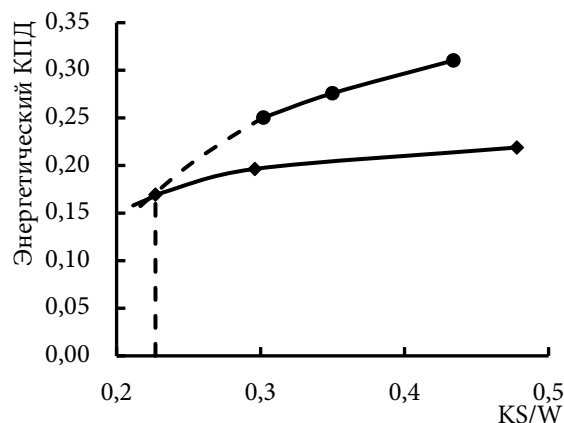
**Таблица 2.** Результаты исследования по определению энергетического КПД рекуперативных теплообменников.

Тип теплообменника	Схема движения	Расход теплоносителя, G, кг/с	$t_{Г1},$ °С	$t_{Х1},$ °С	$t_{Х2},$ °С	$Q_x,$ Вт	$Q_G,$ Вт	$\eta_{эн}$	$\frac{KS}{\dot{W}}$
труба в трубе	прямоток	0,16	66,7	8,9	29,6	13877,28	44715,68	0,310	0,434
		0,32	66,7	8,9	27,3	24670,72	89431,36	0,276	0,35
		0,47	66,7	8,9	25,6	32887,31	131352,3	0,250	0,302
	противоток	0,16	66,7	8,9	31,8	15352,16	44715,68	0,343	0,434
		0,32	66,7	8,9	28,9	26816,00	89431,36	0,300	0,35
		0,47	66,7	8,9	26,3	34265,82	131352,3	0,261	0,302
кожухотрубный	прямоток	0,16	66,7	8,9	23,5	9787,84	44715,68	0,219	0,478
		0,32	66,7	8,9	22	17564,48	89431,36	0,196	0,296
		0,47	66,7	8,9	20,2	22253,09	131352,3	0,169	0,227
	противоток	0,16	66,7	8,9	25,2	10927,52	44715,68	0,244	0,478
		0,32	66,7	8,9	23,1	19039,36	89431,36	0,213	0,296
		0,47	66,7	8,9	21,5	24813,18	131352,3	0,189	0,227



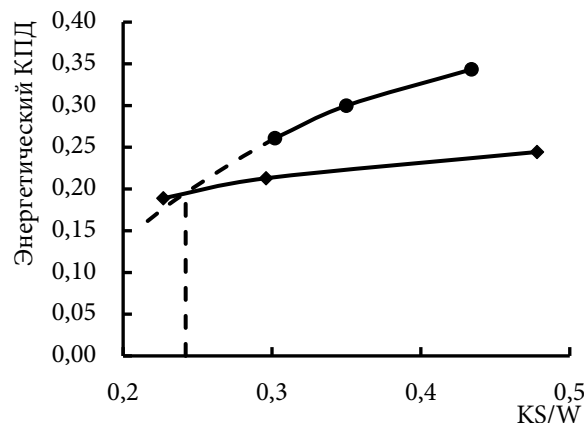
Для сравнения эффективности работы рекуперативных теплообменников величине по энергетического КПД были построены зависимости  $\eta_{\text{эн}} = f\left(\frac{KS}{W}\right)$ . В качестве аргумента в этой зависимости была выбрана величина  $\left(\frac{KS}{W}\right)$ , где  $K$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>К);  $S$  – поверхность теплопередачи, м<sup>2</sup>;  $W = G \cdot c$  – водяной эквивалент, Вт/К.

На рис. 2 и 3 представлены полученные зависимости для теплообменника «труба в трубе» и кожухотрубного теплообменника при различных схемах движения теплоносителей.



● – теплообменник «труба в трубе»; ◆ – одноходовой кожухотрубный теплообменник;

Рис. 2. Зависимости  $\eta_{\text{эн}} = f\left(\frac{KS}{W}\right)$  для прямоточной схемы движения теплоносителей



● – теплообменник «труба в трубе»; ◆ – одноходовой кожухотрубный теплообменник;

Рис. 3. Зависимости  $\eta_{\text{эн}} = f\left(\frac{KS}{W}\right)$  для противоточной схемы движения теплоносителей.

В исследованном диапазоне энергетический КПД выше для теплообменника «труба в трубе», но исследуя характер зависимостей можно отметить, что при значениях  $\left(\frac{KS}{W}\right)$  менее 0,22 – 0,24 линии пересекаются. Поэтому при значениях  $\left(\frac{KS}{W}\right)$  меньше 0,22 – 0,24 энергетического КПД  $\eta_{\text{эн}}$  выше для кожухотрубного теплообменника. Это означает, что при больших расходах теплоносителей ( $G$ ) и малых размерах теплообменника ( $S$ ) эффективнее кожухотрубный теплообменник.

Эксергетический КПД – это отношение фактически выполненной работы к ее максимально возможному значению, то есть к эксергии рассматриваемого процесса [7-12]. Он учитывает потери энергии в теплообменнике: потери из-за необратимости теплообмена из-за разницы температур теплоносителей; потери энергии из-за передачи тепла в окружающую среду; потери энергии из-за гидравлических потерь при перекачке теплоносителей (однако эта составляющая может не учитываться при определении энергетического КПД).

Значительное отклонение энергетической эффективности от единицы указывает на наличие потерь эксергии, которые могут быть сведены к минимуму за счет более рациональных процессов и использования более совершенного оборудования. Некоторые факторы, снижающие термодинамическую эффективность процессов теплопередачи в теплообменнике:

а) потери из-за конечной разницы температур между теплоносителями и гидравлического сопротивления,



- б) потери из-за неполной теплоизоляции;
- в) низкая теплопроводность материала теплообменника.

Потери, вызванные изменением характера движения теплоносителей, например, КПД устройства снижается при относительном уменьшении подачи горячего теплоносителя относительно холодного и возрастает при его увеличении.

Работоспособность или эксергия теплоты  $Q_r$  получаемого от источника тепла с температурой  $T_{r1}$ , является максимальной полезной работой, которую можно получить от этой теплоты при условии, что источником холода является окружающая среда с температурой  $T_0$ . Здесь  $Q_r = Q_{r1} - Q_{r2}$ .

Для рекуперативных теплообменных аппаратов для определения эксергетического КПД можно использовать уравнение [2, 3]

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{1 - \frac{T_0}{T_x^{\text{cp}}}}{1 - \frac{T_0}{T_r^{\text{cp}}}}$$

где  $T_0 = 237 \text{ }^\circ\text{K}$ .

Средняя температура холодного теплоносителя:  $T_x^{\text{cp}} = \frac{T_{x2} - T_{x1}}{\ln \frac{T_{x2}}{T_{x1}}}$ .

Средняя температура горячего теплоносителя:  $T_r^{\text{cp}} = \frac{T_{r1} - T_{r2}}{\ln \frac{T_{r1}}{T_{r2}}}$ .

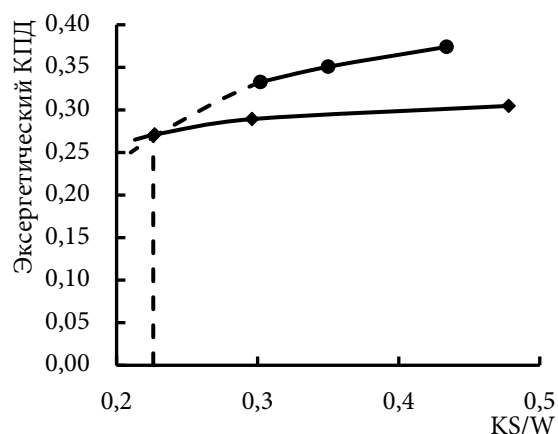
Экспериментальные исследования проводились для рекуперативных теплообменников типа «труба в трубе» и одноходовой кожухотрубный теплообменник. Основные параметры теплообменников приведены в таблице 1.

Результаты экспериментальных исследований по определению эксергетического КПД приведены в таблице 3.

**Таблица 3.** Результаты опытных и расчетных данных по определению  $\eta_{\text{экс}}$

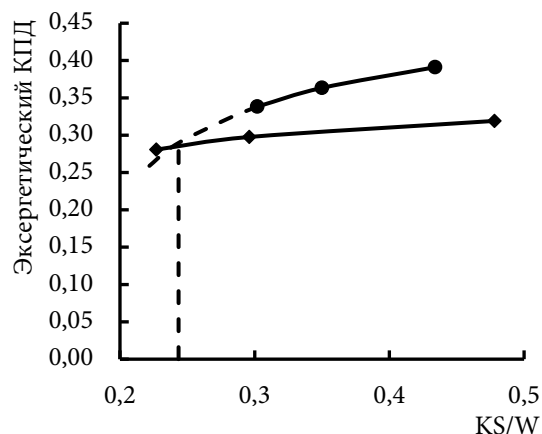
Тип ТО	Схема движения	Расход теплоносителя, G, кг/с	$T_{r1}$ , К	$T_{r2}$ , К	$T_{x1}$ , К	$T_{x2}$ , К	$\eta_{\text{экс}}$	$\frac{KS}{W}$	K, Вт/(м <sup>2</sup> К)
труба в трубе	прямоток	0,16	339,7	322,3	281,9	302,6	0,374	0,434	643,7
		0,32	339,7	323,4	281,9	300,3	0,351	0,35	1037,1
		0,47	339,7	324,5	281,9	298,6	0,333	0,302	1315,2
	противоток	0,16	339,7	323,2	281,9	304,8	0,391	0,434	643,7
		0,32	339,7	324,0	281,9	301,9	0,363	0,35	1037,1
		0,47	339,7	324,8	281,9	299,3	0,338	0,302	1315,2
кожухотрубный	прямоток	0,16	339,7	328,8	281,9	296,5	0,305	0,478	239,2
		0,32	339,7	330,0	281,9	295,0	0,289	0,296	296,3
		0,47	339,7	331,2	281,9	293,2	0,271	0,227	331,1
	противоток	0,16	339,7	329,0	281,9	298,2	0,319	0,478	239,2
		0,32	339,7	330,6	281,9	296,1	0,298	0,296	296,3
		0,47	339,7	332,2	281,9	294,5	0,281	0,227	331,1

По опытным и расчетным данным построены зависимости  $\eta_{\text{экс}} = f\left(\frac{KS}{W}\right)$  (рисунок 5 и 6).



● – теплообменник «труба в трубе»; ◆ – одноходовой кожухотрубный теплообменник;

Рис. 4. Зависимости  $\eta_{\text{экс}} = f\left(\frac{KS}{W}\right)$  для прямоточной схемы движения теплоносителей



● – теплообменник «труба в трубе»; ◆ – одноходовой кожухотрубный теплообменник;

Рис. 5. Зависимости  $\eta_{\text{экс}} = f\left(\frac{KS}{W}\right)$  для противоточной схемы движения теплоносителей.

Также при значениях  $\left(\frac{KS}{W}\right)$  меньше 0,22 – 0,24 наблюдается пересечение зависимостей  $\eta_{\text{экс}} = f\left(\frac{KS}{W}\right)$  и при этих значениях  $\left(\frac{KS}{W}\right)$  эффективность кожухотрубного теплообменника выше, чем для теплообменника «труба в трубе».

## Выводы

1. На основе экспериментальных исследований определены энергетический и эксергетический коэффициенты полезного действия теплообменника «труба в трубе» и кожухотрубный теплообменник.

2. Для противоточной схемы движения теплоносителей значения обоих коэффициентов полезного действия выше, чем для прямоточной. Это объясняется тем, что при использовании противоточной схемы движения теплоносителей удается обеспечить более равномерное распределение движущей силы вдоль поверхности теплопередачи.

3. Получены экспериментальные зависимости энергетического и эксергетического коэффициентов полезного действия от величины  $\left(\frac{KS}{W}\right)$  для теплообменника «труба в трубе» и кожухотрубный теплообменник.

4. При малых значениях величины  $\left(\frac{KS}{W}\right)$  (меньше 0,22...0,24) значения энергетического и эксергетического коэффициентов полезного действия для кожухотрубный теплообменник выше, чем для теплообменника «труба в трубе». При больших значениях  $\left(\frac{KS}{W}\right)$  эффективность теплообменника «труба в трубе» выше, чем кожухотрубного теплообменника.

## Список источников

1. Леонтьев В.К., Кораблева О.Н. Экспериментальное определение эффективности рекуперативных теплообменников. *От химии к технологии шаг за шагом*, 2026, 7(1), 66-75.



2. **Шадрина Е.М., Волкова Г.В.** Введение в курс «Теоретические основы энерго- и ресурсосбережения»: метод. указания, под ред. В.Я. Лебедева. Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2007, 44 с.
3. **Кручинин М.И., Шадрина Е.М.** Теоретические основы энерго- и ресурсосбережения. Эксергетический анализ теплообменных аппаратов: учебное пособие. ГОУВПО Иван. гос. хим.-техн. Ун-т.: Иваново, 2007, 44 с.
4. **Гирба Е.А., Леонтьев В.К.** Теоретические основы энерго-ресурсосбережения: учебное пособие. Ярославль: изд-во ЯГТУ, 2011, 132 с.
5. **Рахманов Ю.А.** Теоретические основы энерго- и ресурсосбережения в химической технологии: Учеб.-метод. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2018, 62 с.
6. **Семенюк Л.Г.** Термодинамическая эффективность теплообменников. *Инженернофизический журнал*, 1990, 59(6), 935–942.
7. **Сажин Б.С., Булеков А.П.** Эксергетический анализ тепло-массообменных процессов химической технологии. М.: МТИ им. А.Н. Косыгина, 1988, 78 с.
8. **Шаргут Я.** Эксергия. Пер. с пол. Ю.И. Батурина и Д.Ф. Стржижовского; под ред. д-ра техн. наук В.М. Бродянского. Изд. перераб. и доп. М.: Энергия, 1968, 379 с.
9. **Александров А.А.** Эксергия термодинамических систем. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок [Электронный ресурс]. – URL: <http://twf.mpei.ac.ru/ТТНВ/2/Aleksandrov/Chapter-6/6-1.pdf>. (дата обращения: 22.01.2020).
10. **Тишин О.А.** Теоретические основы энерго- и ресурсосбережения в химической технологии: учебное пособие / О.А. Тишин, В.Н. Харитонов, Н.Ц. Гатапова, А.И. Колиух. Тамбов: Изд.-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012, 92 с.
11. **Калекин В.С.** Теоретические основы энерго- и ресурсосбережения в химической технологии – 2-е изд. перераб. и доп. Омск: изд. ОмГТУ, 2006, 92 с.
12. **Дьяконов В.Г.** Основы теплопередачи и массообмена : учебное пособие / В.Г. Дьяконов, О.А. Лонцаков; М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т, Казань : Изд-во КНИТУ, 2015, 244 с.
13. **Чечеткин А.В.** Теплотехника: учеб. для хим.-технол. спец. Вузов / А.В. Чечеткин, Н.А. Занемонец, М.: Высш. шк., 1986, 344 с.
14. **Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А.** Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: Учебное пособие для вузов под ред. чл.- корр. АН России П.Г. Романкова.-12-е изд., стереотипное. Перепечатка с издания 1987г. М.: ООО ТИД «Альянс», 2005, 576 с.
15. **Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М.** Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи): Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., испр. СПб.: ХИМИЗДАТ, 2009, 544 с.

Поступила в редакцию 30.03.2026

Одобрена после рецензирования 27.05.2026

Принята к опубликованию 29.05.2026