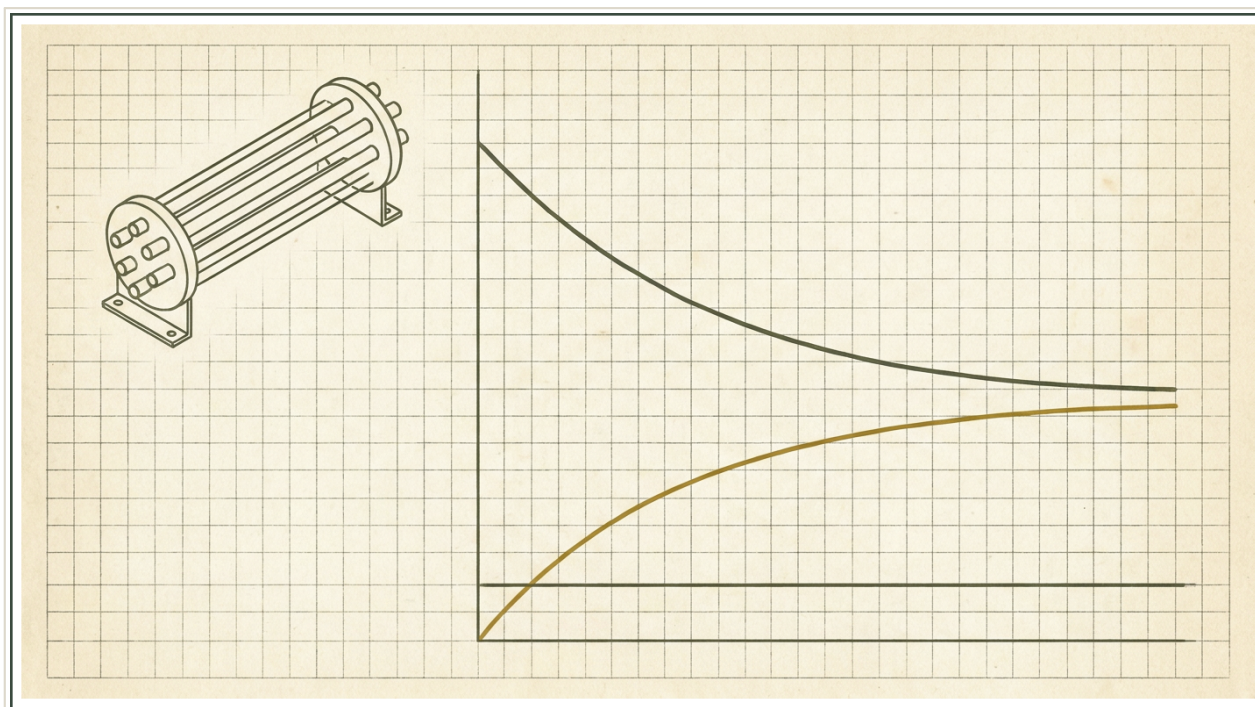


# Метод $\epsilon$ -NTU: расчёт теплообменника без итераций

теория теплообмена · формулы и вывод

Метод  $\epsilon$ -NTU: расчёт выходных температур и мощности готового аппарата без итераций. Формулы, частные случаи и разбор на воздухоподогревателе 109 кВт.



Кривые эффективности  $\epsilon$  в зависимости от NTU при разных отношениях эквивалентов  $C_r$

Метод LMTD хорош, когда известны все четыре температуры. А если две из них — искомые? Например, есть готовый аппарат и надо узнать, до какой температуры он нагреет воду при заданном расходе. Итерации по LMTD — путь мучительный. Метод  $\epsilon$ -NTU решает это в лоб, без единой итерации. Разберём его на воздухоподогревателе.

## Коротко

Три безразмерных числа: эффективность  $\epsilon$  (сколько взяли от максимума), число единиц переноса  $NTU = kF/W_{\min}$  и отношение эквивалентов  $C_r = W_{\min}/W_{\max}$ . Между ними — готовая формула, куда итерации не нужны.

## 1. Три ключевых величины

$$\epsilon = Q / Q_{\max} = Q / (W_{\min} \cdot (t'_{\text{гор}} - t'_{\text{хол}}))$$

$\epsilon$  — эффективность;  $Q_{\max}$  — предельно возможная теплота при бесконечной площади

$$NTU = k \cdot F / W_{\min}$$

NTU — число единиц переноса, безразмерная 'величина' аппарата

$$C_r = W_{\min} / W_{\max}, W = G \cdot c$$

$C_r$  — отношение меньшего водяного эквивалента к большему,  $0 \leq C_r \leq 1$

Здесь  $W_{\min}$  — меньший из двух водяных эквивалентов потоков. Именно поток с меньшим  $W$  первым 'упирается' в предельную температуру, поэтому  $Q_{\max}$  считают по нему.

## 2. Рабочая формула для противотока

Для противоточной схемы эффективность выражается через NTU и  $C_r$  явно:

$$\varepsilon = [1 - \exp(-NTU \cdot (1 - C_r))] / [1 - C_r \cdot \exp(-NTU \cdot (1 - C_r))]$$

эффективность противоточного аппарата (при  $C_r < 1$ )

Частные случаи упрощают всё. При  $C_r = 0$  (конденсация или кипение, одна температура постоянна) формула вырождается в  $\varepsilon = 1 - e^{(-NTU)}$ . При  $C_r = 1$  (равные эквиваленты) — в  $\varepsilon = NTU / (1 + NTU)$ .

#### Знаете ли вы

NTU — это буквально 'размер' аппарата в безразмерном виде. NTU = 1 отдаёт около 63 % максимума, NTU = 3 — уже под 95 %. Дальше рост площади почти не добавляет мощности: закон убывающей отдачи в чистом виде.

### 3. Пример: поверочный расчёт воздухоподогревателя

Аппарат площадью  $F = 40 \text{ м}^2$ ,  $k = 60 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Горячая вода  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G_v = 1,2 \text{ кг/с}$ . Воздух на входе  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G_{\text{возд}} = 3,0 \text{ кг/с}$ ,  $c_{\text{возд}} = 1005 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ . До какой температуры нагреется воздух?

$$W_v = 1,2 \cdot 4187 = 5024 \text{ Вт/К} \quad W_{\text{возд}} = 3,0 \cdot 1005 = 3015 \text{ Вт/К}$$

водяные эквиваленты воды и воздуха

Меньший эквивалент — у воздуха:  $W_{\min} = 3015$ ,  $W_{\max} = 5024$ .

$$C_r = 3015 / 5024 \approx 0,60 \quad NTU = k \cdot F / W_{\min} = 60 \cdot 40 / 3015 \approx 0,796$$

отношение эквивалентов и число единиц переноса

$$\varepsilon = [1 - e^{(-0,796 \cdot 0,40)}] / [1 - 0,60 \cdot e^{(-0,796 \cdot 0,40)}]$$

$$= (1 - 0,727) / (1 - 0,60 \cdot 0,727) \approx 0,273 / 0,564 \approx 0,484$$

показатель =  $-NTU \cdot (1 - C_r) = -0,796 \cdot 0,40 = -0,318$ ;  $e^{(-0,318)} \approx 0,727$

Теперь достаём температуру воздуха на выходе прямо из определения эффективности:

$$t''_{\text{возд}} = t'_{\text{возд}} + \varepsilon \cdot (t'_{\text{гор}} - t'_{\text{возд}}) = 15 + 0,484 \cdot (90 - 15) \approx 51,3 \text{ }^\circ\text{C}$$

искомая температура — без единой итерации

$$Q = \varepsilon \cdot W_{\min} \cdot (t'_{\text{гор}} - t'_{\text{возд}}) = 0,484 \cdot 3015 \cdot 75 \approx 109 \text{ кВт}$$

переданная тепловая мощность

### 4. Когда что применять

| Задача                    | Что известно          | Метод                          |
|---------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Конструктивный            | 4 температуры, Q      | LMTD → площадь                 |
| Поверочный                | F, k, входы, расходы  | $\varepsilon$ -NTU → выходы    |
| $C_r = 0$ (пар/конденсат) | одна сторона изотерм. | $\varepsilon = 1 - e^{(-NTU)}$ |
| Быстрая оценка выхода     | готовый аппарат       | $\varepsilon$ -NTU напрямую    |

### 5. Частые вопросы

#### Чем $\varepsilon$ -NTU лучше LMTD?

LMTD требует всех четырёх температур; если две неизвестны, приходится итерировать.  $\varepsilon$ -NTU считает выходные температуры напрямую из площади и расходов — одна подстановка вместо цикла приближений. Для поверочных задач это метод выбора.

#### Что физически означает NTU = 3?

Что аппарат забирает около 95 % термодинамически возможной теплоты. Нарастивать площадь выше  $NTU \approx 3-4$  невыгодно: мощность почти не растёт, а металл и цена — да.

### Как выбрать $W_{min}$ ?

Сравнить два произведения  $G \cdot c$ . Меньшее — это  $W_{min}$ , по нему считают  $Q_{max}$  и  $NTU$ . Поток с меньшим эквивалентом сильнее меняет температуру и первым достигает предела.

## 6. Глоссарий

| Термин                   | Определение                                                                                |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Эффективность $\epsilon$ | Отношение фактически переданной теплоты к максимально возможной, 0...1.                    |
| NTU                      | Число единиц переноса, $k \cdot F / W_{min}$ — безразмерная мера 'размера' теплообменника. |
| $C_r$                    | Отношение меньшего водяного эквивалента к большему, определяет форму кривой $\epsilon$ .   |
| $W_{min}$                | Меньший водяной эквивалент из двух потоков — по нему считают предельную теплоту.           |



### Не уверены в расчёте — спросите инженера

Онлайн-подбор, методики и таблицы: [msmteplo.ru](https://msmteplo.ru)

Инженер-консультант онлайн: [задать вопрос](#)

Телефон: 8 (800) 302-58-75 · E-mail: [zakaz@msmteplo.ru](mailto:zakaz@msmteplo.ru)

МСМ-ТЕПЛО — устройство, расчёт и подбор теплообменного оборудования.

Наведите камеру телефона на QR — откроется онлайн-консультант.

Темы документа: метод эффективности NTU, число единиц переноса, эффективность  $\epsilon$ , проверочный расчёт,  $C_r$