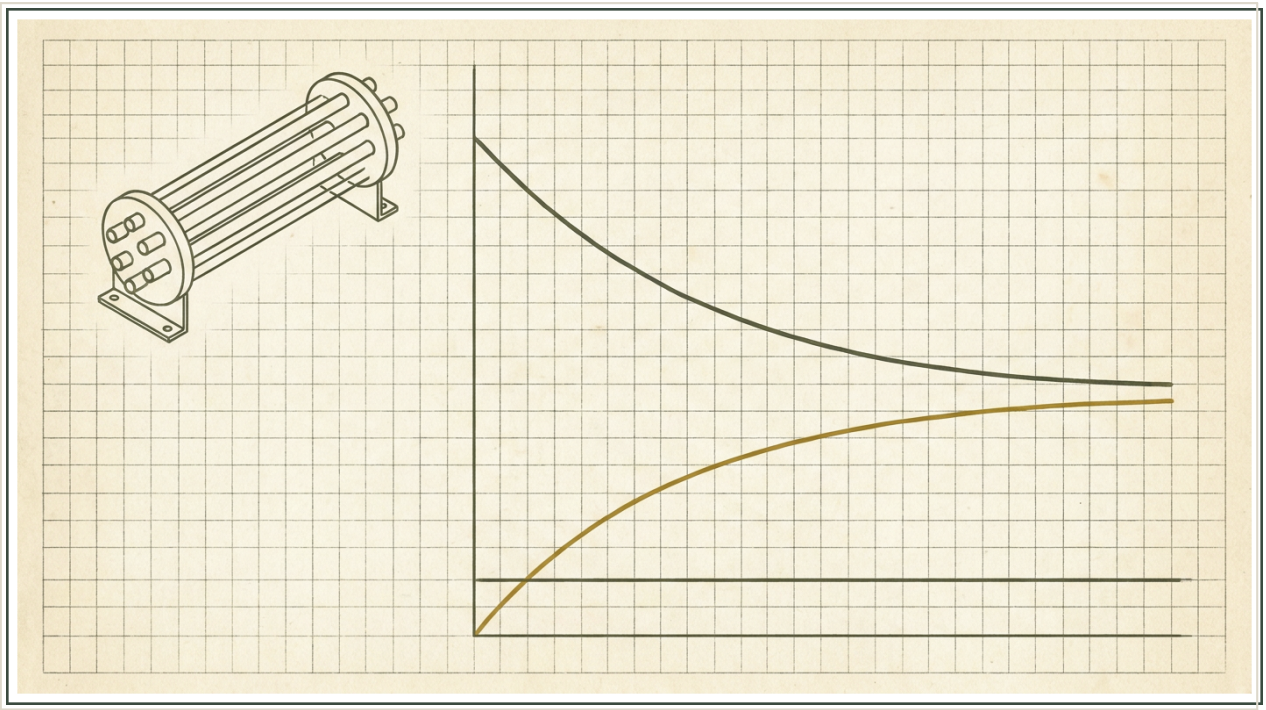
Метод ε-NTU: расчёт теплообменника без итераций

теория теплообмена · формулы и вывод

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



Кривые эффективности ε 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 ε-NTU решает это в лоб, без единой итерации. Разберём его на воздухоподогревателе.

Коротко

Три безразмерных числа: эффективность ε (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

```
ε = Q / Q_max = Q / (W_min · (t′_гор − t′_хол))
```

ε — эффективность; Q_max — предельно возможная теплота при бесконечной площади

```
NTU = k · F / W_min
```

NTU — число единиц переноса, безразмерная 'величина' аппарата

```
C_r = W_min / W_max, W = G · c
```

C_r — отношение меньшего водяного эквивалента к большему, 0 ≤ C_r ≤ 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:

```
ε = [1 − exp(−NTU·(1 − C_r))] / [1 − C_r·exp(−NTU·(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 ε = 1 − e^(−NTU). При C_r = 1 (равные эквиваленты) — в ε = 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 м², k = 60 Вт/(м²·K). Горячая вода 90 °C, G_в = 1,2 кг/с. Воздух на входе 15 °C, G_возд = 3,0 кг/с, c_возд = 1005 Дж/(кг·K). До какой температуры нагреется воздух?

```
W_в = 1,2 · 4187 = 5024 Вт/K W_возд = 3,0 · 1005 = 3015 Вт/K
```

водяные эквиваленты воды и воздуха

Меньший эквивалент — у воздуха: W_min = 3015, W_max = 5024.

```
C_r = 3015 / 5024 ≈ 0,60 NTU = k·F/W_min = 60·40 / 3015 ≈ 0,796
```

отношение эквивалентов и число единиц переноса

```
ε = [1 − e^(−0,796·0,40)] / [1 − 0,60·e^(−0,796·0,40)]
= (1 − 0,727) / (1 − 0,60·0,727) ≈ 0,273 / 0,564 ≈ 0,484
```

показатель = −NTU·(1−C_r) = −0,796·0,40 = −0,318; e^(−0,318) ≈ 0,727

Теперь достаём температуру воздуха на выходе прямо из определения эффективности:

```
t″_возд = t′_возд + ε·(t′_гор − t′_возд) = 15 + 0,484·(90 − 15) ≈ 51,3 °C
```

искомая температура — без единой итерации

```
Q = ε · W_min · (t′_гор − t′_возд) = 0,484 · 3015 · 75 ≈ 109 кВт
```

переданная тепловая мощность

4. Когда что применять

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

5. Частые вопросы

Чем ε-NTU лучше LMTD?

LMTD требует всех четырёх температур; если две неизвестны, приходится итерировать. ε-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. Наращивать площадь выше NTU ≈ 3–4 невыгодно: мощность почти не растёт, а металл и цена — да.

Как выбрать W_min?
Сравнить два произведения G·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 ε	Отношение фактически переданной теплоты к максимально возможной, 0…1.
NTU	Число единиц переноса, k·F/W_min — безразмерная мера 'размера' теплообменника.
C_r	Отношение меньшего водяного эквивалента к большему, определяет форму кривой ε.
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
Инженер-консультант онлайн: задать вопрос
Телефон: 8 (800) 302-58-75 · E-mail: 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, поверочный расчёт, C_r