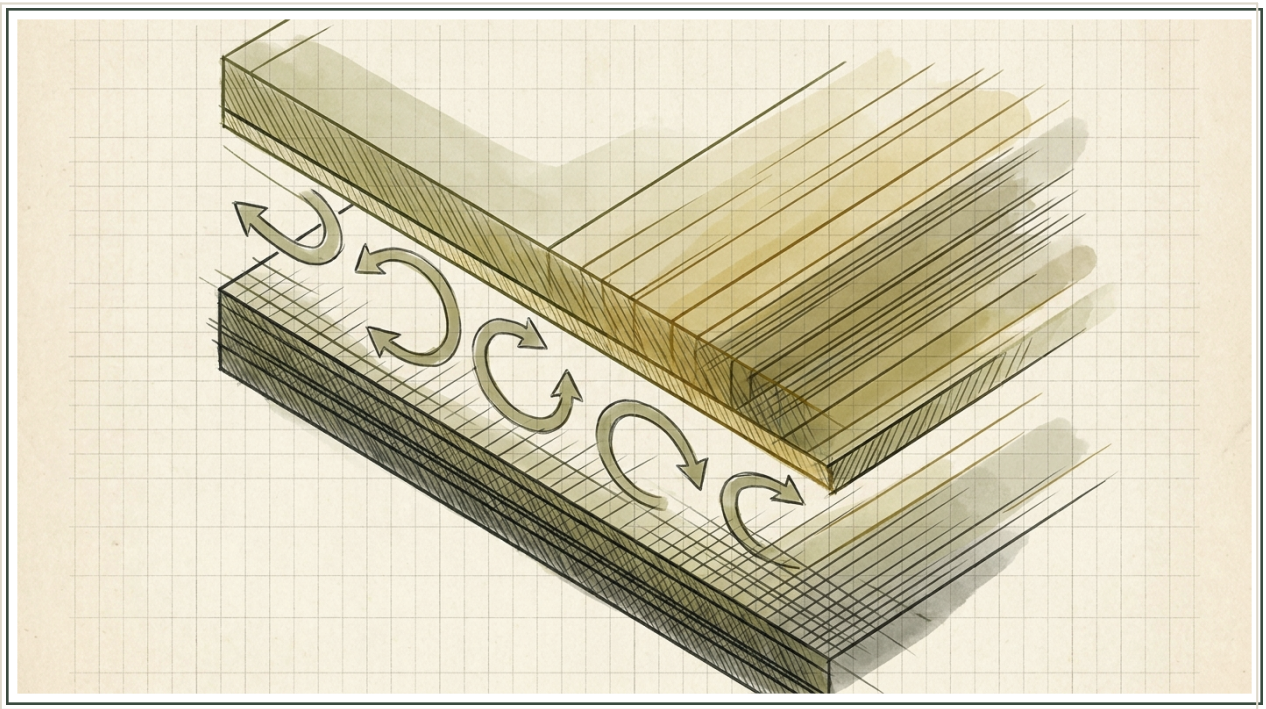
Критериальные уравнения конвективного теплообмена

теория теплообмена · формулы и вывод

Критериальные уравнения сворачивают теплоотдачу в степенную зависимость Nu=C·Re^m·Pr^n: показатель m≈0,8 в турбулентном режиме и ≈0,5 в ламинарном, n=0,4 при нагреве и 0,33 при охлаждении — одна формула на воде работает и для масла, и для воздуха.



Критериальное уравнение как мост между режимом течения и коэффициентом теплоотдачи

Критериальное уравнение — это способ посчитать теплоотдачу, не решая полную систему уравнений движения и энергии. Вместо этого экспериментальные данные сворачивают в короткую степенную зависимость безразмерных чисел: Nu = f(Re, Pr, Gr). Одно такое уравнение, полученное на воде, работает и для масла, и для воздуха — в этом сила теории подобия. Ниже собраны рабочие формулы для основных режимов с указанием границ применимости.

Режим / условия	Критериальное уравнение	Границы
Турбулентная труба (Михеев)	Nu=0,021·Re^0,8·Pr^0,43·(Pr/Pr_ст)^0,25	Re>10⁴
Турбулентная труба (Дитус–Бёльтер)	Nu=0,023·Re^0,8·Pr^n	Re>10⁴, n=0,4/0,3
Ламинарная труба, T_ст=const	Nu=3,66	Re<2300
Свободная конвекция	Nu=C·(Gr·Pr)^m	по (Gr·Pr)
Гофрированный канал ПТО	Nu=C·Re^m·Pr^0,33·(μ/μ_ст)^0,17	m=0,6–0,8

Важно

У каждого уравнения есть область применимости по Re, Pr и L/d. Подставлять формулу Михеева в ламинарный режим — грубая ошибка: она даст завышенную теплоотдачу и недобор площади.

1. Общая структура

Почти все уравнения вынужденной конвекции сводятся к виду:

```
Nu = C · Re^m · Pr^n · (поправки)
```

C — константа геометрии; m — показатель режима (0,5 ламинар, 0,8 турбулент); n — показатель Pr (0,3–0,43)

Смысл показателей нагляден: m близко к 0,8 в турбулентном потоке говорит, что теплоотдача почти линейно растёт со скоростью; n при Pr отражает роль теплофизики среды.

2. Поправки, которые нельзя терять

- (Pr/Pr_ст)^0,25 или (μ/μ_ст)^n — поправка на изменение вязкости у стенки (нагрев/охлаждение).
- ε_L — поправка на начальный участок при коротких трубах (L/d < 50).
- ε_R — поправка на изгиб в змеевиках.

3. Пример подбора уравнения

Дано: вода, труба d = 25 мм, Re = 30000, Pr = 4,0, Pr_ст = 3,2. Режим турбулентный, берём Михеева:

```
Nu = 0,021·30000^0,8·4,0^0,43·(4,0/3,2)^0,25
```

подстановка чисел режима

```
Nu ≈ 0,021·3800·1,80·1,057 ≈ 152
```

результат; далее α = Nu·λ/d

4. Где это в расчёте теплообменника

Критериальное уравнение — ядро теплового расчёта. Из него получают α для каждой стороны, α идут в коэффициент теплопередачи k, а k — в уравнение Q = k·F·Δt, из которого находят площадь. Ошибка в выборе уравнения тянется до самой площади аппарата.

5. Пример: гофрированный канал ПТО

Для пластины с углом гофры около 60° заводская корреляция даёт ориентировочно C≈0,3, m≈0,65. Вода в канале, Re = 800, Pr = 4,5, d_э = 6 мм, λ = 0,63 Вт/(м·К):

```
Nu = 0,3 · 800^0,65 · 4,5^0,33 ≈ 0,3 · 77 · 1,65 ≈ 38
```

низкий Re, но гофра держит турбулентный режим

```
α = 38 · 0,63 / 0,006 ≈ 3990 Вт/(м²·К)
```

рабочая теплоотдача со стороны воды

> **Дисциплина данных**
>
> Константы C и m для гофры зависят от профиля пластины и берутся из ПО завода; ручной расчёт по обобщённым C, m даёт ±15 %. Числа выше — иллюстративные (см. таблицу режимов и границ применимости выше).

6. Частые вопросы

Почему нельзя использовать одну формулу для всех режимов?
Физика ламинарного и турбулентного течения разная: в ламинаре теплоотдача от скорости почти не зависит (Nu=const), в турбулентном растёт как Re^0,8. Одна формула не описывает оба случая.

Откуда берутся константы C и показатели степени?
Из экспериментов. Данные обобщают в степенную зависимость методами теории подобия. Для стандартных труб они табличны, для гофрированных пластин — фирменные.

Что значит поправка (Pr/Pr_ст)?
Учёт того, что у стенки среда другой температуры и вязкости. При нагреве жидкости у стенки она менее вязкая, профиль скорости меняется — поправка это компенсирует.

7. Глоссарий

Термин	Определение
Критериальное уравнение	Степенная связь Nu=f(Re,Pr,Gr), обобщающая опытные данные по теплоотдаче.
Уравнение Дитуса–Бёльтера	Nu=0,023·Re^0,8·Pr^n — широко применяемая формула для турбулентных труб.
Область применимости	Диапазон Re, Pr, L/d, в котором формула даёт достоверный результат.

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: критериальные уравнения, Nu=f(Re,Pr), уравнение Михеева, Дитуса-Бёльтера, теплоотдача, подобие