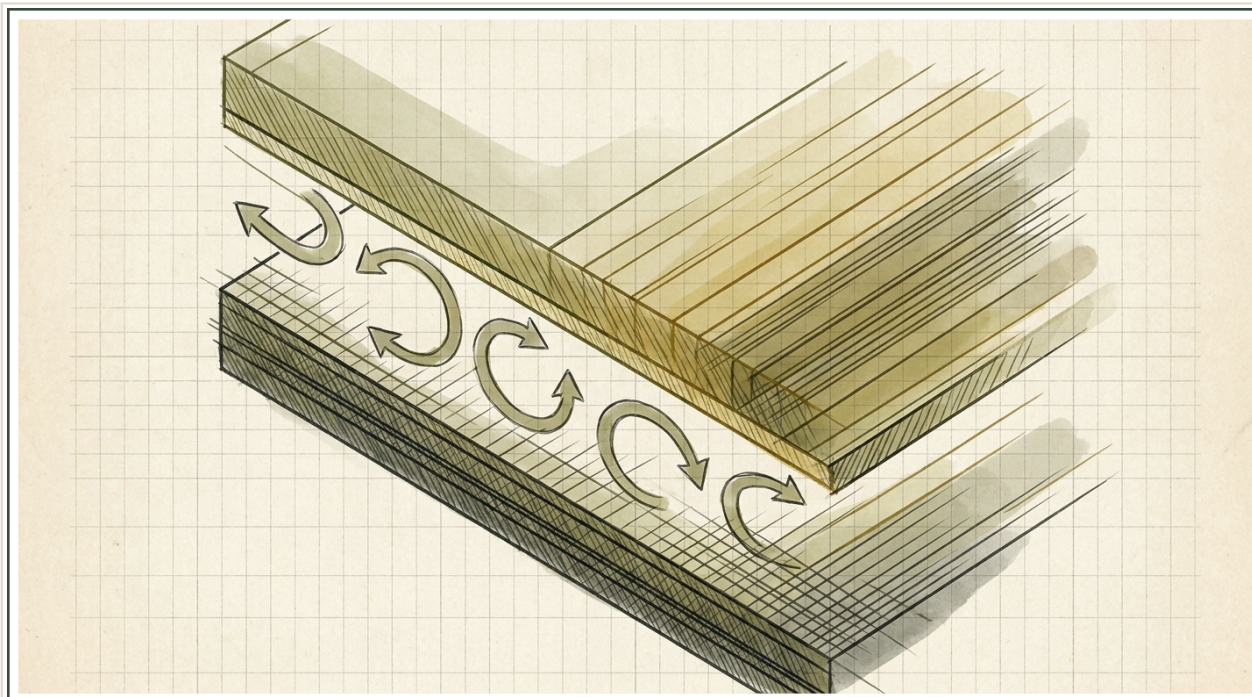


Критериальные уравнения конвективного теплообмена

теория теплообмена · формулы и вывод

Критериальные уравнения сворачивают теплоотдачу в степенную зависимость $Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n$: показатель $m \approx 0,8$ в турбулентном режиме и $\approx 0,5$ 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)	$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot (Pr/Pr_{ст})^{0,25}$	$Re > 10^4$
Турбулентная труба (Дитус-Бельтер)	$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n$	$Re > 10^4$, $n = 0,4/0,3$
Ламинарная труба, $T_{ст} = const$	$Nu = 3,66$	$Re < 2300$
Свободная конвекция	$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^m$	по $(Gr \cdot Pr)$
Гофрированный канал ПТО	$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^{0,33} \cdot (\mu/\mu_{ст})^{0,17}$	$m = 0,6-0,8$

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:

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n \cdot (\text{поправки})$$

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 $(\mu/\mu_{ст})^n$ — 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:

$$Nu = 0,021 \cdot 30000^{0,8} \cdot 4,0^{0,43} \cdot (4,0/3,2)^{0,25}$$

подстановка чисел режима

$$Nu \approx 0,021 \cdot 3800 \cdot 1,80 \cdot 1,057 \approx 152$$

результат; далее $\alpha = Nu \cdot \lambda / d$

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 $Q = k \cdot F \cdot \Delta t$, 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 $C \approx 0,3$, $m \approx 0,65$. Вода в канале, $Re = 800$, $Pr = 4,5$, $d_{\text{э}} = 6$ мм, $\lambda = 0,63$ Вт/(м·К):

$$Nu = 0,3 \cdot 800^{0,65} \cdot 4,5^{0,33} \approx 0,3 \cdot 77 \cdot 1,65 \approx 38$$

низкий Re , но гофра держит турбулентный режим

$$\alpha = 38 \cdot 0,63 / 0,006 \approx 3990 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

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 $\pm 15\%$. 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 ($Nu = \text{const}$), в турбулентном растёт как $Re^{0,8}$. Одна формула не описывает оба случая.

Откуда берутся константы С 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-Бельтера	$Nu=0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n$ — 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-Бельтера, теплоотдача, подобие