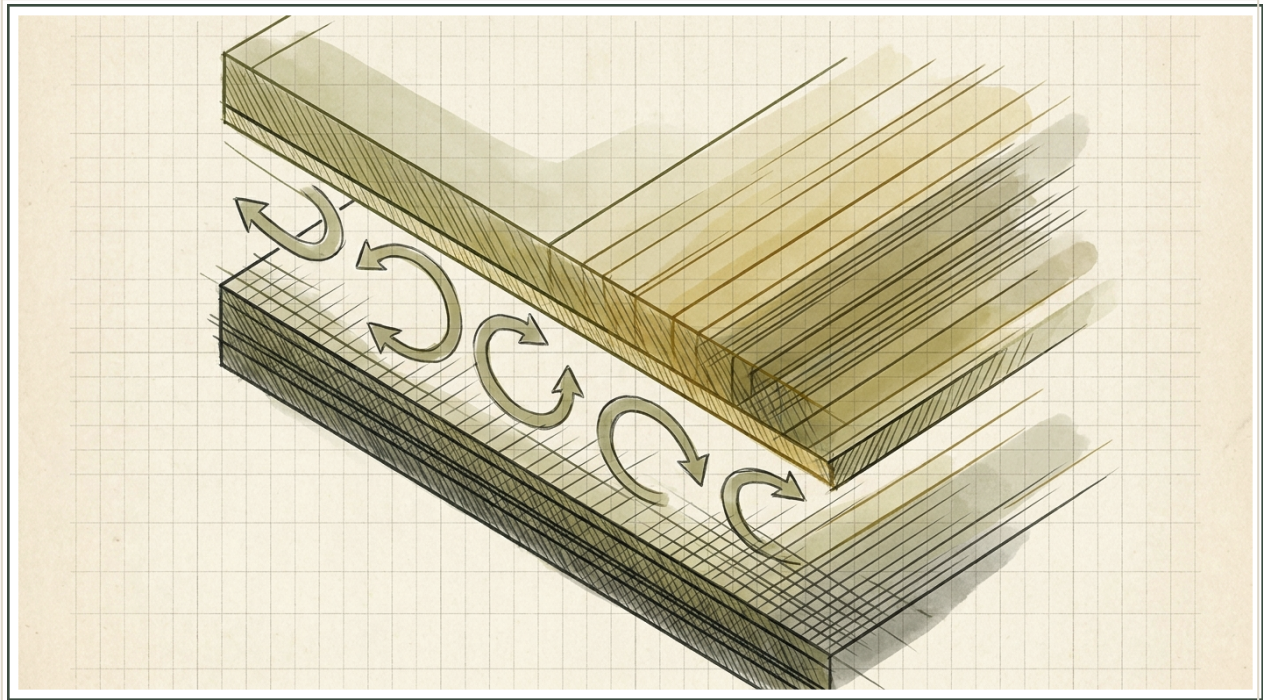


Нестационарный теплообмен: ОСНОВЫ

теория теплообмена · формулы и вывод

Нестационарный теплообмен: числа Био и Фурье, критерий равномерного прогрева $Bi < 0,1$, метод сосредоточенной ёмкости и пример оценки прогрева тела.



Изменение температуры тела во времени при нестационарном прогреве

Пока теплообменник работает на постоянном режиме, температуры не меняются во времени — это стационар. Но при пуске, остановке, скачке нагрузки или прогреве массивной детали температура зависит и от точки, и от времени. Это нестационарный теплообмен. Его считают через два безразмерных числа — Био и Фурье, — и он важен для регулирования, прогрева трубопроводов и тепловой инерции аппаратов.

Число	Формула	Смысл
Био Bi	$\alpha \cdot L / \lambda_{\text{тв}}$	внешний теплообмен / внутренняя теплопроводность
Фурье Fo	$a \cdot \tau / L^2$	безразмерное время процесса

Коротко

Bi решает, можно ли считать тело равномерно прогретым. $Bi < 0,1$ — да, температура по объёму почти одинакова. $Bi > 0,1$ — внутри есть заметный градиент, нужно решать уравнение теплопроводности.

1. Число Био: как прогревается тело

Bi сравнивает, что медленнее — подвод тепла снаружи или его растекание внутри тела:

$$Bi = \alpha \cdot L / \lambda_{\text{тв}}$$

α — теплоотдача, Вт/(м²·К); L — характерный размер тела, м; $\lambda_{\text{тв}}$ — теплопроводность тела

- $Bi < 0,1$ — «тонкое» тело: прогревается равномерно, считаем одной температурой (метод сосредоточенной ёмкости).
- $Bi > 0,1$ — «толстое» тело: важен градиент внутри, нужно поле температур.

2. Число Фурье: безразмерное время

Fo показывает, насколько далеко продвинулся процесс прогрева/остывания:

$$Fo = a \cdot \tau / L^2$$

a — температуропроводность тела, m^2/c ; τ — время, c ; L — характерный размер

Большое Fo — процесс почти завершён (тело прогрелось), малое Fo — только начался.

3. Метод сосредоточенной ёмкости ($Bi < 0,1$)

Когда тело можно считать равномерно прогретым, его температура меняется по экспоненте:

$$(t - t_{cp}) / (t_0 - t_{cp}) = \exp(-Bi \cdot Fo) = \exp(-\alpha \cdot F \cdot \tau / (\rho \cdot V \cdot c))$$

t_0 — начальная температура тела; t_{cp} — температура среды; экспоненциальное приближение к среде

4. Пример

Стальной шарик диаметром 20 мм ($L=R=0,01$ м, $\lambda=50$, $a=1,3 \cdot 10^{-5} m^2/c$) в потоке воды $\alpha=1500$:

$$Bi = 1500 \cdot 0,01 / 50 = 0,3$$

$Bi > 0,1$ — градиент внутри заметен, метод ёмкости даёт погрешность

Если бы λ была выше (медь, $\lambda=390$), $Bi=0,038 < 0,1$ — и шарик можно было бы считать прогретым равномерно. Материал напрямую решает, каким методом считать.

5. Где нестационар в теплообмене

- Пуск и прогрев аппаратов и трубопроводов, тепловая инерция.
- Реакция на скачок нагрузки, настройка автоматики регулирования.
- Аккумуляторы тепла, прогрев/остывание массивных деталей.

6. Частые вопросы

Что такое нестационарный теплообмен?

Режим, в котором температура зависит не только от точки, но и от времени: пуск, остановка, скачок нагрузки, прогрев детали. Считается через числа Био и Фурье.

Когда тело можно считать равномерно прогретым?

При $Bi < 0,1$: внутренняя теплопроводность быстрее внешнего теплообмена, градиент внутри мал. Тогда работает простой метод сосредоточенной ёмкости с экспонентой.

Что показывает число Фурье?

Безразмерное время: насколько процесс прогрева или остывания продвинулся. Большое Fo — процесс почти закончен, малое — в начале.

7. Глоссарий

Термин	Определение
Нестационарный теплообмен	Процесс, где температура меняется во времени (пуск, прогрев, скачок нагрузки).
Число Био	$Bi = \alpha L / \lambda_{\text{тв}}$ — отношение внешнего теплообмена к внутренней теплопроводности тела.
Число Фурье	$Fo = \alpha \tau / L^2$ — безразмерное время нестационарного процесса.

**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: нестационарный теплообмен, число Фурье, число Био, прогрев тела, тепловая инерция, Bi Fo