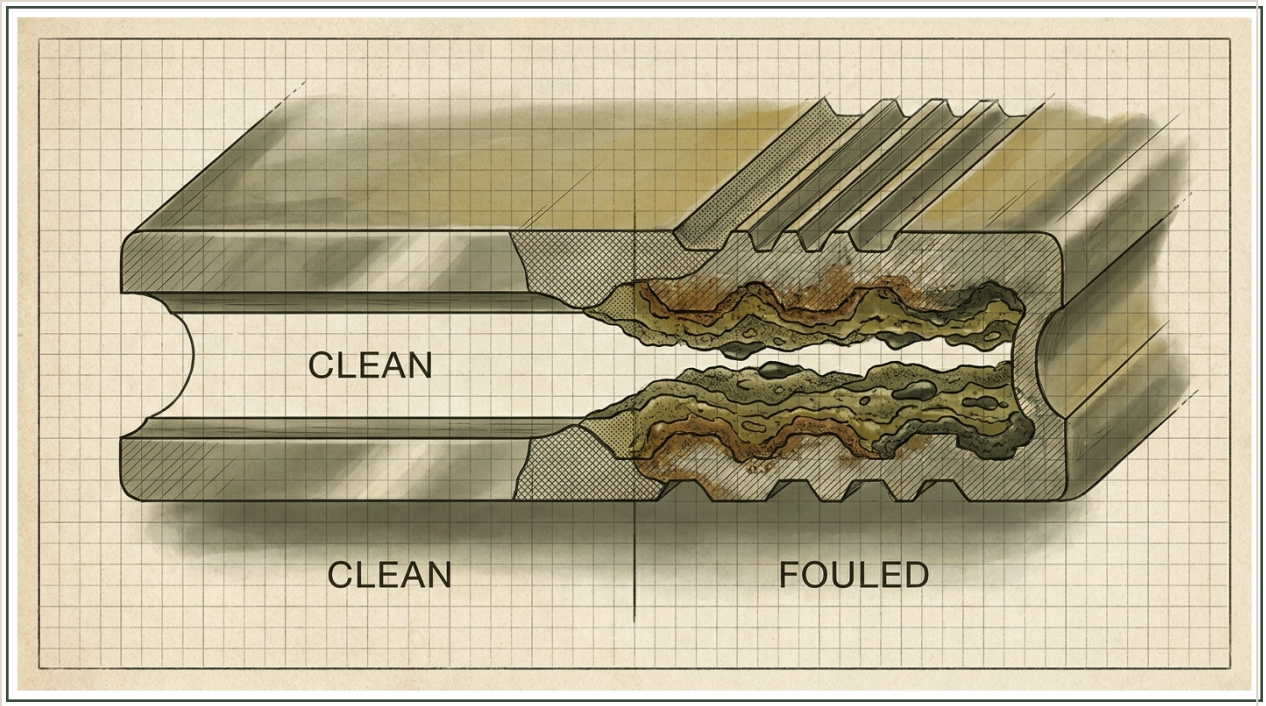
Накипь и коррозия: механизм и защита

теория теплообмена · формулы и вывод

Слой накипи всего 0,5 мм с теплопроводностью ~2 Вт/(м·K) добавляет 0,00025 м²·K/Вт сопротивления и роняет коэффициент теплопередачи более чем вдвое, а хлориды пробивают нержавеющую пластину насквозь точечной коррозией.



Накипь душит теплопередачу снаружи, коррозия разрушает металл изнутри

Накипь — это отложение солей жёсткости (в основном карбоната кальция $CaCO_3$) на горячей теплопередающей поверхности; коррозия — электрохимическое разрушение металла стенки под действием кислорода и хлоридов. Два главных врага теплообменника работают по-разному: накипь садится снаружи металла и душит теплопередачу изоляцией, коррозия ест металл изнутри и грозит сквозным свищом. Понимание механизмов подсказывает защиту — а она почти всегда дешевле ремонта.

Коротко

Накипь — выпадение солей жёсткости (в основном $CaCO_3$) на горячей поверхности; растёт с температурой и жёсткостью. Коррозия — электрохимическое разрушение металла; ускоряется кислородом, хлоридами и блуждающими токами. Обе снижают ресурс, но лечатся разной профилактикой.

1. Механизм образования накипи

Растворимость карбоната кальция падает с ростом температуры — редкий случай «обратной» растворимости. У горячей стенки вода перенасыщается, и соль выпадает именно там, где идёт теплопередача:

$$Ca(HCO_3)_2 \rightarrow CaCO_3\downarrow + H_2O + CO_2\uparrow$$

разложение бикарбоната при нагреве; $CaCO_3$ осаждается на горячей поверхности

Отсюда правило: чем выше температура стенки и жёсткость воды, тем быстрее накипь. Пластинчатые аппараты чувствительны — узкие каналы зарастают заметнее трубных.

Фактор накипи	Влияние	Мера защиты
Жёсткость воды	главный	умягчение, обратный осмос
Температура стенки	прямое	ограничение t греющей среды
Скорость потока	обратное	держать w ≥ 0,3 м/с (самоочистка)
pH воды	высокий pH → осаждение	стабилизация pH

2. Механизм коррозии

Коррозия металла в воде — электрохимический процесс: на анодных участках металл переходит в раствор, на катодных восстанавливается кислород. Упрощённо для железа:

$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$ (анод); $O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$ (катод)

растворённый кислород — главный окислитель; без него скорость коррозии резко падает

Особая опасность для нержавейки — хлориды: они разрушают пассивную плёнку и вызывают точечную (питтинговую) коррозию, которая пробивает тонкую пластину насквозь при внешне целой поверхности.

Фактор коррозии	Механизм	Мера защиты
Растворённый O_2	катодная реакция	деаэрация, поглотители кислорода
Хлориды Cl^{-}	питтинг нержавейки	контроль хлоридов, выбор стали/титана
Блуждающие токи	электрохимия	заземление, изоляция
Низкий pH	растворение оксидов	стабилизация pH 8,3–9,5

Знаете ли вы

Накипь и коррозия иногда «дружат»: под слоем отложений создаётся застойная зона с иным pH и концентрацией кислорода — там развивается подшламовая коррозия. Поэтому запущенная накипь опасна вдвойне: она ещё и провоцирует свищи.

3. Ингибиторы и водоподготовка

Стратегическая защита — не бороться с последствиями, а не пускать процесс. Против накипи работает умягчение воды и стабилизаторы жёсткости; против коррозии — деаэрация (удаление кислорода), поддержание слабощелочного pH и плёнкообразующие ингибиторы, создающие защитный слой на металле. Для агрессивных сред выбирают более стойкий материал — от нержавейки к титану.

Стратегия: водоподготовка (профилактика) >> промывка (лечение)

предотвратить отложение дешевле и безопаснее, чем растворять его кислотой

4. Пример: во сколько накипь режет мощность

Чистый аппарат: k = 4500 Вт/(м²·K), то есть 1/k = 0,000222 м²·K/Вт. Накипь $CaCO_3$ толщиной 0,5 мм с теплопроводностью λ = 2 Вт/(м·K) добавляет сопротивление:

$R_{накипь} = \delta/\lambda = 0{,}0005/2 = 0{,}00025$ м²·K/Вт

тонкий слой, но сопоставим с сопротивлением всей остальной цепочки 1/k

```
1/k' = 0,000222 + 0,00025 = 0,000472 → k' ≈ 2120 Вт/(м²·K)
```
коэффициент теплопередачи упал в 2,1 раза — во столько же просела мощность Q = k·F·Δt

Полмиллиметра накипи по эффекту равны примерно 3,7 мм нержавеющей стали (λ ≈ 15 Вт/(м·K)): 0,00025·15 ≈ 0,0037 м. Вот почему даже тонкий налёт критичен, а профилактика дешевле промывки.

5. Частые вопросы

Почему накипь образуется на горячей стороне?
Растворимость карбоната кальция падает с ростом температуры. У горячей стенки вода перенасыщается солями жёсткости, и они выпадают именно на теплопередающей поверхности.

Чем опасны хлориды для нержавеющего теплообменника?
Хлориды разрушают пассивную оксидную плёнку нержавейки и вызывают питтинговую коррозию — точечные язвы, пробивающие тонкую пластину насквозь при внешне целой поверхности.

Что эффективнее — промывка или водоподготовка?
Водоподготовка. Умягчение и деаэрация предотвращают и накипь, и коррозию, тогда как промывка лишь устраняет уже накопленные отложения и сама нагружает металл кислотой.

6. Глоссарий

Термин	Определение
Накипь	Отложение солей жёсткости (в основном $CaCO_3$) на горячей теплопередающей поверхности.
Питтинг	Точечная коррозия нержавейки под действием хлоридов; пробивает металл насквозь.
Деаэрация	Удаление растворённого кислорода из воды для подавления коррозии.
Ингибитор коррозии	Вещество, образующее защитную плёнку и замедляющее разрушение металла.

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: накипь коррозия теплообменник, механизм, питтинг, ингибитор, водоподготовка, хлориды