

Резонансно-акустическое удаление шлака

Направление: Колебания и автоматизация очистки

Цель: Разработать концепцию управляемого вибрационного удаления шлака и проверить режимы на учебной модели.

Справка о компании: Сибирская генерирующая компания (СГК) производит электрическую и тепловую энергию и обеспечивает теплоснабжение городов. В её работе связаны эксплуатация электростанций, котельного и турбинного оборудования, обслуживание тепловых сетей. Компания развивает энергетическую инфраструктуру и реализует проекты по повышению надёжности оборудования и снижению воздействия на окружающую среду.

Задача участников

Исследуйте управляемое возбуждение учебной панели, с которой нужно отделить слой шлака. Рассчитайте частотный отклик, выберите рабочий диапазон и обоснуйте экономику без опасного воздействия на реальные трубы.

CAPEX — затраты на создание решения; OPEX — ежегодные расходы на его работу и обслуживание.

1 Рабочая ситуация и цель

Отложения на поверхностях нагрева меняют теплообмен. Предлагается управляемое вибрационное воздействие, которое помогает отделять слой, не повреждая трубы и опоры. Пользователь системы должен понимать, что измеряется, как выбирается воздействие и почему оно прекращается при неблагоприятном отклике.

Разработайте концепцию системы очистки: внешний возбудитель, места передачи усилия, измерения и управление. Предусмотрите внешний монтаж без доступа внутрь топки и без останова. В конкурсной работе нужны эскиз, расчёт и план будущей проверки этих условий, без работ на котле. Не сводите результат к нахождению одного пика осциллятора: толщина слоя и динамический отклик меняются.

2 Основной результат и границы

- Покажите путь передачи усилия от внешнего устройства к панели, размещение измерений, доступ/обслуживание и ограничения температур.
- Предложите правило поиска рабочего воздействия, его перестройки при изменении слоя и останова при непонятном/опасном отклике.
- Проверьте правило на всех общих состояниях; покажите частоты, силу, отклик, ограничение прокси напряжения, энергию и чувствительность. Если ограничения несовместимы, корректный результат — расчётно обоснованный отказ от воздействия, граница применимости и предложение будущей проверки или изменения системы. Достижение условного отделения в каждом состоянии не требуется. Отдельные удачные точки не заменяют работу стратегии.
- Дайте программу безопасного стенда для проверки адгезии, реальных форм колебаний, передачи усилия и крепления, затем условия промышленного пилота.

Условный порог отделения и прокси напряжения ниже не являются нормативными допускаемыми значениями или реальной моделью разрушения слоя. Модель подтверждает согласованность расчёта и управления; отделение реального шлака требует испытаний.

3 Общая модель для сопоставимой проверки

Величина	Принято для учебного сценария
Площадь / собственная масса панели	1 м ² / 80 кг
Слой	$\rho = 1700 \text{ кг/м}^3$; $h = 10, 20, 30 \text{ мм}$
Базовый режим	При $h = 20 \text{ мм}$ собственная частота 80 Гц; $\zeta = 0,04$
Демпфирование для чувствительности	$\zeta = 0,032 \text{ и } 0,048$
Возбуждение	20–160 Гц; амплитуда гармонической силы от 0 до 50 Н
Запрещённые интервалы	65–75 и 105–120 Гц, включая границы
Условное отделение / ограничение	$a \geq 4 \text{ м/с}^2$ и $\sigma_{\text{прокси}} \leq 10 \text{ МПа}$
Температура внешней точки	150 °С; электроника должна размещаться/защищаться по проекту

$$m = 80 + \rho h A; k_0 = (80 + 1700 \times 0,020 \times 1) \times (2\pi \times 80)^2; c = 2\zeta \sqrt{k_0 m}$$

m — кг; k_0 — Н/м; c — Н·с/м. При изменении толщины фиксируется k_0 базового слоя; пересчитываются m , c и собственная частота. Не пересоздавать k из 80 Гц для каждого слоя.

$$a = \omega^2 F / \sqrt{[(k_0 - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2]}; x = a/\omega^2; \sigma_{\text{прокси}} = 5 + 0,8a$$

$\omega = 2\pi f$; f — Гц; F — Н; a — м/с²; x — м; $\sigma_{\text{прокси}}$ — МПа. При $F = 0$ считать $a = x = 0$, прокси равен 5.

Модель с одной массой разрешена, но не навязана как промышленная модель. Свою многомассовую/численную модель можно добавить отдельно, сохранив результаты общей проверки. В учебной модели принят материал панели 12Х1МФ; эта характеристика относится к условиям модели. Плотность шлака задана в г/см³; здесь для сопоставимости принято $1,7 \text{ г/см}^3 = 1700 \text{ кг/м}^3$.

4 Управление и экономика проекта

Объясните, какие наблюдения доступны до отделения слоя и после него, как ограничиваются сила/время и как система различает слабое возбуждение, изменение слоя и неполадку измерения. Правило остановки может быть простым, если оно воспроизводимо и проверено. Нельзя назначать максимальное ускорение единственной целью.

Для сопоставимого ТЭО принять учебный котёл: паропроизводительность $D = 420 \text{ т/ч}$; прирост энтальпии рабочего тела $\Delta h = 2500 \text{ кДж/кг}$; низшая теплота сгорания топлива НТС = 20 МДж/кг; 6000 ч/год при постоянной полезной тепловой нагрузке; цена топлива 5000 руб./т (чувствительность 4500 и 6000); электроэнергия 2,2 руб./кВт·ч. Чистый котёл имеет КПД 0,900; загрязнённый — 0,888. Потеря составляет ровно 1,2 процентного пункта, а не 1,2 % относительного КПД. Эти параметры — принятая учебная энергетическая база, а не паспорт предприятия.

Панель площадью 1 м² служит механической моделью локального участка и не представляет весь котёл. Для экономического проекта принять условный охват $\alpha = 0,35$ доли потери КПД, связанной с доступными проекту поверхностями. Это не геометрическая доля площади. Доля восстановления этой части γ рассматривается в сценариях 0; 0,5; 1. КПД

после проекта $\eta_{\text{после}} = 0,888 + (0,900 - 0,888) \times \alpha \times \gamma$. Коэффициенты α и γ нельзя выводить из достижения порога ускорения панели: их обосновывают картой загрязнения, теплообменными измерениями и будущим пилотом. Команда выбирает число внешних устройств и область обслуживания; не переносите стоимость одного устройства на весь охват без обоснования.

Полезная тепловая мощность $Q = D \times \Delta h / 3600$ в МВт, если D в т/ч и Δh в кДж/кг. Часовой расход топлива $B = D \times \Delta h / (1000 \times \text{НТС} \times \eta)$ в т/ч при НТС в МДж/кг. Экономия топлива — разность B при $\eta = 0,888$ и $\eta_{\text{после}}$ для той же полезной нагрузки, умноженная на 6000 ч и цену топлива. Для чувствительности к масштабу отдельно пересчитайте $D = 1000$ т/ч с остальными параметрами неизменными; нельзя переносить на этот масштаб прежние CAPEX и охват без объяснения.

Доля времени активного воздействия — сценарии 0,10 и 0,25 от 6000 ч. Мощность всех устройств, датчиков и управления, CAPEX и обслуживание определите по выбранному проекту: источник либо расчётная оценка и диапазон. В каждом сценарии γ покажите предотвращённые затраты топлива, электроэнергию, обслуживание и чистый эффект; горизонт 5 лет без НДС, дисконтирования и остаточной стоимости. Учтите ещё два источника эффекта, названные компанией: упущенная выгода при остановке котла на механическую чистку — 4 млн руб. за сутки и фонд оплаты труда обходчиков и машинистов — 15 млн руб./год. Покажите их отдельным сценарием поверх экономии топлива: объявите, сколько суток остановов в год и какую долю этого труда может заменить ваше решение, обоснуйте эти допущения и приведите вариант, где они равны нулю. Один и тот же эффект не учитывайте дважды; вывод о целесообразности не должен держаться только на этих допущениях. Нулевое восстановление означает отсутствие экономии топлива при сохранении затрат выбранного режима; обоснованный отказ от проекта допустим.

Результат — схема, таблица/графики общих состояний, описание управления, ТЭО и программа испытаний. Код, физический возбудитель и работа на действующей установке не обязательны.

5 Свободный выбор и развитие

Команда самостоятельно выбирает: принцип возбудителя и внешние точки монтажа; измерение и закон сканирования/остановки; конструкция, питание и состав оборудования.

Можно углубить ядро или выбрать полезное развитие. Примеры ниже необязательны и не образуют перечень бонусов.

- Адаптация к толщине/демпфированию — Сценарии перестройки и сравнение устойчивости с фиксированной частотой.
- Наблюдение и остановка — Схема сигналов, логика отказа датчика и тест на условном изменении отклика.
- Установка и ремонтпригодность — Размерная/тепловая концепция внешних точек и перечень измерений до пилота.

6 Материалы, собственные данные и проверка

Общие исходные условия и проверочные сценарии выше обязательны для сопоставимости. Отдельный CSV/XLSX для этого инженерного проекта не требуется.

Разрешены открытые, собственные измеренные и синтетические дополнения с источником, единицами, допущениями и ограничениями. Общие исходные условия и проверочные сценарии сохраняются. Покажите, что изменилось благодаря дополнению, и отдельно сохраните результат на общей базе. Синтетические данные обозначьте как учебные и укажите их ограничения.

В проектной заявке и презентации представьте результат ядра, расчёт/демонстрацию и ограничения. Для расчётного проекта достаточно читаемой записки и схемы; для программного результата приложите инструкцию запуска и воспроизводимый пример. Дополнительные материалы служат проверке проекта и не меняют официальный состав заявки.

Жюри использует официальные критерии конкурса: 70 баллов на отборе и 80 в финале. Решения, полностью выполнившие ядро, различаются качеством доказательств, реализуемостью, переносимостью и экономическим обоснованием; совпадение с контрольным проектом и число расширений не требуются.

Расчетные допущения

- Численные параметры приняты для учебного сценария и не являются измерениями предприятия.

Все обязательные исходные условия и общие проверочные сценарии приведены в постановке. Таблицы свойств компонентов служат для сравнения собственных проектных решений.

Общие требования конкурса

Решение оформляется проектной заявкой и презентацией по приложениям 4 и 8 положения. Презентация: PDF, не более 16 слайдов и 25 МБ. На финале доклад до 10 минут и вопросы до 5 минут.