

Прохладный воздух для воздуходувок

Направление: Теплотехника и подготовка влажного воздуха

Цель: Спроектировать охлаждение воздуха перед воздуходувкой с учётом влажности и затрат.

Справка о компании: «ЕвроХим» — производитель минеральных удобрений, объединяющий добычу сырья, химическое производство и сбыт продукции. Предприятия группы выпускают азотные, фосфорные и калийные удобрения. Их технологические процессы связаны с производством кислот и аммиака, использованием воды и энергии, а также обращением с побочными продуктами производства.

Задача участников

Летний нагрев воздуха уменьшает массу кислорода при том же объемном расходе воздуходувки. Сравните охлаждение воздуха с учетом влажности, сопротивления охладителя и сезонных расходов; оцените, когда включать выбранное решение. Представьте схему или демонстрацию своего решения, воспроизводимый расчёт и план проверки.

CAPEX — первоначальные капитальные затраты; OPEX — текущие эксплуатационные расходы. COP холодильной машины — отношение полезного холода к затраченной электрической энергии.

1 Контекст и цель

В жаркую погоду воздуходувка подаёт меньшую массу сухого воздуха при том же объёмном расходе. Если выпуск серной кислоты ограничен кислородом, это снижает производительность. Службе эксплуатации нужны охлаждение на всасывании, защита от капель и загрязнения, понятное управление в разные погодные часы. Увеличение массы влажного воздуха само по себе не доказывает прирост подачи кислорода.

Спроектируйте систему подготовки воздуха перед воздуходувкой и правило её включения. Сравните выпуск, расход воды, электричество и экономику по единой влажной модели. Исходный контекст — летние 38–40 °С, ограничение воздуходувок и годовой выпуск около 1 млн т. Производственная пригодность остаётся предметом будущего пилота.

2 Обязательный основной результат

- Схема с выбранными компонентами, температурой/режимами и защитой воздуходувки; хотя бы одна обоснованная альтернатива.
- Замкнутый баланс сухого воздуха, пара/воды и холода, выпуск и энергия для W1–W4; проверка S1 без включения его в годовой эффект.
- Годовая экономика, правило включения/обхода, чувствительность и план измерений в пилоте.

3 Общий паспорт и погода

Единый учебный сценарий. Характеристики не являются паспортами оборудования ПМУ.

Показатель	Значение	Единица
P	101325	Па
R сухого воздуха	287.05	Дж/(кг·К)
ср сухого воздуха	1.006	кДж/(кг·К)

Показатель	Значение	Единица
Скрытая теплота	2454	кДж/кг
O ₂ в сухом воздухе	0.232	массовая доля
Расход на всасывании без модуля	270000	м³/ч
Базовый выпуск при 35 °C / RH 0,4	125	т/ч
Предел других узлов	140	т/ч
Площадь / бюджет	180 / 240	м² / млн руб.
Электроэнергия / вода	7000 / 60	руб./МВт·ч / руб./м³
Маржинальный доход / обслуживание	1800 / 0,02	руб./т / доля CAPEX в год

ID	T, °C	T влажн., °C	p нас, Па	RH	ч/год
W1	25	16.2	3169	0.4	720
W2	30	20.0	4246	0.4	720
W3	35	23.8	5628	0.4	720
W4	40	27.6	7385	0.4	720
S1	40	32.4	7385	0.6	0

В погодной таблице температура влажного термометра соответствует предельному насыщенному состоянию упрощённой модели испарения ($\beta = 1$) и округлена до 0,1 °C; давление насыщенного пара определяется линейной интерполяцией по таблице.

S1 — проверка высокой влажности, нулевые годовые часы. Летний период сравнения — 2880 ч. Для связи с годовой мощностью принято ещё 5120 ч работы с базовым выпуском 125 т/ч; их погодный профиль здесь не задан, эффект летней модернизации за эти часы не начисляется. Полный год — 8000 ч. Площадь и бюджет ограничивают учебный проект; подключение к действующей установке не выполняется.

4 Независимые компоненты

ID	Компонент	Др, Па	CAPEX, млн руб.	м²	Собств., кВт
F	Фильтр	20	8	10	0
K	Воздушный теплообменник, холод до 5400 кВт	80	25	30	6

ID	Компонент	Δр, Па	CAPEX, млн руб.	м²	Собств., кВт
C	Холодильный агрегат, холод до 1800 кВт	0	32	20	9
E65	Испарительная кассета, β = 0,65	40	30	40	9
E85	Испарительная кассета, β = 0,85	90	45	55	15
D	Каплеотделитель	20	10	12	0

Фильтрация F обязательна для всех включённых схем; испарение требует D, чтобы не переносить капли. Каждые F, K, E65, E85 и D рассчитаны на полный поток до 270000 м³/ч после модуля; габариты и цены относятся к этому масштабу. Кассеты E65/E85 задают только β, не готовую установку. При K выбирается температура 18–25 °С, агрегаты C суммируются по холоду. COP одного C: 4 при T ≤ 30 °С, 3,5 при 35 °С, 3 при 40 °С; между точками линейная интерполяция. Собственные нужды C — 9 кВт на включённую единицу сверх Q/COP; K — отдельно по таблице. Номинал 1800 кВт допускает частичную нагрузку. Цены включают поставку и условный монтаж, но не доказывают промышленную реализуемость.

Потери давления суммируются; при Δр ≤ 240 Па доля объёмного расхода $f = 1 - \Delta p / 6000$. $Q_{out} = 270000 f$ м³/ч относится к всасыванию ПОСЛЕ модуля. Обход без модуля даёт $f = 1$ и нулевые дополнительные собственные нужды. Отключённые кассеты можно обойти; конструкцию обхода объясните. Иные компоненты допустимы с полной сопоставимой характеристикой.

5 Единая расчётная модель

$$p_v = RH \cdot p_{\text{нас}}; w = 0,622 p_v / (P - p_v); \rho d = (P - p_v) / (R \cdot (273,15 + T))$$

w — кг пара/кг сухого воздуха; ρd — кг сухого воздуха/м³ влажного объёма.

$$\dot{m}d = Q_{out} \cdot \rho d, out / 3600; Q_{in} = 3600 \dot{m}d / \rho d, in$$

Сухая масса через модуль сохраняется. Для нагрузки нельзя одновременно взять входные 270000 м³/ч и выходную повышенную плотность.

$$\text{Выпуск} = \min(140; 125 \cdot \rho d, out \cdot f / \rho d, ref)$$

Референс: 35 °С, RH 0,4. База каждой погоды считается при её входной плотности и $f = 1$. Для реакции $S + 1,5 O_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$ принять $M(H_2SO_4) = 98,08$ кг/кмоль и $M(O_2) = 32$ кг/кмоль; выпуск выражен в тоннах 100 % H_2SO_4 . Избыток кислорода λ равен подаче O_2 / стехиометрической потребности. Определите λ референса, проверьте его сохранение при используемой пропорциональной зависимости выпуска и влияние предела других узлов. Расход не является стехиометрическим минимумом.

$$\text{Охладитель: } p_{v,out} = \min(p_{v,in}; p_{\text{нас}}(T_{out})); \dot{m}_{\text{cond}} = \dot{m} \max(0; w_{in} - w_{out}); Q_{\text{cold}} = \dot{m} d c_p (T_{in} - T_{out}) + \dot{m}_{\text{cond}} \cdot 2454$$

Q_{cold} в кВт; конденсат в кг/с. Электричество = $Q_{\text{cold}}/\text{COP}$ + собственные нужды.

$$\text{Испарение: } T_{out} = T_{in} - \beta(T_{in} - T_{wet}); w_{out} = w_{in} + c_p(T_{in} - T_{out})/2454; p_{v,out} = P w_{out}/(0,622 + w_{out})$$

Расход добавленной воды = $\dot{m}(w_{out} - w_{in})$; при превышении насыщения режим нельзя принимать по этой упрощённой модели — ограничьте режим или обоснуйте другой расчёт.

Т, °С	р нас, Па
16	1818
18	2064
20	2338
22	2644
24	2985
25	3169
30	4246
35	5628
40	7385

Граница энергетического и экономического расчёта: учитываются дополнительные потребности системы охлаждения. Изменение энергопотребления основной воздуходувки не рассчитывается, поскольку её рабочая характеристика не задана, и не начисляется как экономия. Его необходимо проверить при внедрении и отдельно исследовать в чувствительности. Учебный расчёт не является полным промышленным энергобалансом.

Между табличными температурами допускается линейная интерполяция $p_{\text{нас}}$; вне диапазона нужен проверяемый справочник. Учебная модель учитывает главные эффекты влажности, но не заменяет проектную психрометрию. Годовой эффект — дополнительная кислота × 1800 минус дополнительная энергия × 7000, вода × 60 и 2 % CAPEX. Горизонт 5 лет, постоянные цены, без НДС/дисконтирования. Показать также годовой выпуск с указанной внелетней базой и суммарный эффект за 5 лет за вычетом первоначального CAPEX. Положительная окупаемость не гарантируется: обоснованный отказ от капитальных затрат или режима допустим при полном расчёте.

6 Ваши проектные решения

Вы выбираете принцип охлаждения, количество независимых компонентов, уставки, обход/режимы и компоновку. Уставки, количество устройств и переключения определяете самостоятельно. Допустимы иные технологии с той же проверкой кислорода, воды, энергии и ограничений.

7 Материалы для работы

Таблицы и зависимости в постановке — общий учебный паспорт. CSV в приложениях — удобные копии/справки, а не обязательный обучающий датасет. Компоненты можно

сочетать, масштабировать в объявленных пределах или заменить обоснованными характеристиками.

8 Свои данные и развитие

Вы вправе использовать собственные измерения, открытые источники, новые технологии и синтетические данные. Укажите источник/способ получения, дату или версию, условия использования, единицы, допущения и ограничения переноса. Общие обязательные объект, нагрузки, периоды и экономическая база сохраняются; эффект расширения показывайте отдельно. Наличие большого набора, программного кода или большого числа функций само по себе не преимущество. Простое обоснованное решение может быть лучшим.

Ниже — необязательные направления. Можно выбрать свой путь развития или глубже проработать основной результат; количество расширений само по себе не повышает оценку.

- Более подробная психрометрия или изменяемый график погоды: отдельно от общей базы.
- Управление по выгоде/влажности, оценка загрязнения и регламент обслуживания.
- Уточнение реальной характеристики воздухоудовки/предела другого узла и программа идентификации.

9 Проверка и сдача

- Во всех режимах соблюдены сохранение сухой массы, насыщение, номиналы и потери давления.
- Конденсация включена в холод, вода испарения не посчитана кислородом.
- Правило включения и знак эффекта обоснованы по каждому режиму; неподтверждённые эффекты отделены.

Передайте схему/эскиз и воспроизводимую расчётную записку или таблицу с исходными формулами, сравнение базы/проекта, экономику и план проверки. Код и физическое изделие необязательны, если прямо не требуется демонстрация. Проектная заявка и презентация — по приложениям 4 и 8 положения.

Входные материалы и их использование

Материал	Назначение, роль и применение
Погода	Температура, влажность и длительность погодных режимов.
Компоненты	Независимые характеристики оборудования для выбора схемы.
Давление насыщенного пара	Данные для расчёта влажности воздуха.
Общие условия расчёта	Масштаб установки и общая расчётная база.

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.