

## **Вращающиеся барабаны для эффективной сушки и охлаждения**

Тройский М.

(перевод с английского выполнил Нестеров А.В., оригинал прилагается)

*Allgaier Process Technology GmbH, Ухинген, Германия*

Ulmer Str. 75, 73066 Uchingen, mathias.trojosky@allgaier.de

Родился в 1960 году, изучал химическое машиностроение в Техническом университете «Отто фон Герике», Магдебург, кандидат технических наук. Профессиональная карьера началась в GEA Wiegand GmbH Esslingen, с 1995 года в ALLGAIER Process Technology GmbH Uchingen, фактическая должность директора по исследованиям и разработкам.

Вращающиеся барабанные сушилки десятилетиями использовались для сушки различных видов товаров и широко используются в строительной, минеральной и сырьевой промышленности, а также в химической промышленности, производстве удобрений и в других отраслях.

В то же время, однако, барабанные сушилки были еще более усовершенствованы и позволяют применять энергосберегающие решения, особенно в минеральной промышленности, а также для очень надежных и износостойких решений. Значительный прогресс был достигнут для специальных применений, таких как барабаны для комбинированной сушки и последующего охлаждения в одном блоке, сушилки с рекуперацией тепла за счет циркуляции газа или использование испарительного охлаждения, вращающиеся барабаны для гранулирования и нанесения покрытий, барабаны косвенного охлаждения для горячих продуктов воздухом или водой с рекуперацией тепла и т. д.

**Ключевые слова:** вращающийся барабан, сушка, охлаждение, печь, рекуперация тепла.

### **Барабанные сушилки: энергосберегающие, эффективные и надежные аппараты**

Вращающиеся барабанные сушилки применяют в промышленности на протяжении многих десятилетий. Они используются для сушки и охлаждения, для прокаливания, грануляции и нанесения покрытий. В то время как исторически сушильные барабаны в основном располагались под наклоном, чтобы осуществлять транспортировку твердых частиц в сочетании с вращением, современные барабанные сушилки чаще устанавливаются горизонтально. Подъемные лопасти поднимают влажный материал со дна барабана, позволяя ему

снова упасть, обеспечивая контакт между горячим воздухом для сушки и влажным твердым веществом. Важным фактором для эффективного использования энергии нагрева является оптимальная конструкция внутренних устройств сушилки, поскольку они должны гарантировать оптимальный и интенсивный контакт между твердыми частицами и осушающим газом. Конструкция расположения, формы и количества внутренних устройств требует сочетания большого опыта, испытаний и расчетов для правильного проектирования.

В большинстве вариантов сушки твердый материал транспортируется прямококом (то есть в направлении потока газа). В сушилке также используют комбинацию параллельного потока и поперечного потока между осушающим газом и материалом, в то время, как охлаждение в большинстве случаев осуществляется в режиме противотока. Противоток для сушки или нагрева встречаются главным образом в асфальтовой промышленности, а также в высокотемпературных технологиях при прокаливании.

Существуют различные методы рекуперации тепла с помощью циркуляции отработанного воздуха или испарительного охлаждения, которые были разработаны в соответствии с достижениями последних десятилетий.

Современные барабаны с двойной оболочкой имеют горизонтальную конструкцию, позволяющую транспортировать материал во внешнем барабане в направлении, противоположном движению материала во внутреннем барабане. Это позволяет сочетать сушку и охлаждение в одном устройстве.

Барабанные сушилки подходят для сушки мелкодисперсных материалов, таких как кварцевый песок, но особенно для довольно крупных сыпучих материалов. Производительность таких сушилок составляет от 5 до 350 т/ч (рис. 1). Особые преимущества барабанных сушилок состоят в том, что они в значительной степени нечувствительны к колебаниям исходного содержания влаги в материале, подлежащем сушке, и к колебаниям расхода сырья, к размеру частиц или к нежелательным комкам или инородным грубым материалам.

При соответствующей конструкции внутренних устройств можно обрабатывать даже очень абразивные материалы. Во вращающихся барабанах для абразивных материалов стенки барабанов, лопасти и лопасти внутри выполнены из толстостенной стали.



Рис 1: Большой вращающийся барабан из нержавеющей стали в производственном цехе (диаметр 4,5 метра, длина 35 метров) для сушки удобрений 320 т/ч

Барабанные сушилки особенно терпимы к ошибкам персонала в работе и поэтому оптимально подходят для установки в районах с плохой инфраструктурой. Стоимость автоматизации системы управления сушилкой сравнительно низкая. В случае сбоя подачи материала, как правило, можно возобновить работу сразу после восстановления питания. Поскольку влажный материал в барабанной сушилке перемещается только при вращении барабана, в случае прекращения подачи воздуха барабан можно на время остановить. Благодаря сравнительно простой настройке барабанной сушилки конечные пользователи могут самостоятельно выполнить сборку сушилки на строительной площадке. Это выгодно на мировых рынках, где монтаж оборудования производится самими местными компаниями. Кроме того, барабанные сушилки обычно могут быть введены в эксплуатацию в относительно короткие сроки.

Технические требования к нагреву в барабанных сушилках относительно невысоки. Современные горелки имеют небольшие вентиляторы для подачи воздуха для горения. Насыщенный влагой отработанный воздух удаляется из сушилки вытяжным вентилятором, очищается от пыли на рукавном фильтре и выбрасывается в окружающую среду через дымоход. Система труб для вытяжного воздуха из барабанной сушилке является сравнительно простой конструкцией, поскольку воздух должен выводиться только из одной точки на корпусе сушилки.



Рис. 2: Вид на сушильный барабан с пламенем внутри барабана

Газы горения частично смешиваются с окружающим воздухом, чтобы получить средние температуры воздуха для сушки от 600°C до 900°C. Для нечувствительных к температуре материалов (например, кварцевого песка, шлака) пламя может гореть непосредственно во вращающемся барабане (рис. 2). Для сушки термочувствительных материалов (известняк, глина, бентонит, переработанный пластик или органические отходы) используются топки со смесительной камерой.

Как правило, барабанные сушилки имеют низкое удельное потребление тепловой энергии, если сушку можно осуществлять при высокой температуре воздуха на входе. Следовательно, ключевой особенностью является их чрезвычайно энергоэффективная работа. Высокие температуры горячего газа приводят к низкому количеству осушающего воздуха и меньшим потерям тепла отработанных газов.

В настоящее время все вышеупомянутые особенности дали роторным вращающимся барабанам ренессанс в промышленной практике.

### **Основные преимущества барабанных сушилок**

Поставщики сушильного оборудования часто продвигают свои собственные аппараты независимо рационального применения барабанных (ротационных) сушилок, сушилок с псевдооживленным слоем, вихревых сушилок, лопастных

сушилок или других. Это привело к неопределенности среди пользователей, выбирающих оптимальную систему сушки.

Вращающиеся барабанные сушилки имеют множество преимуществ по сравнению с другими технологиями сушки. Поскольку барабанные сушилки подходят как для мелких, так и для крупных частиц, а также для очень крупных сыпучих материалов, необязательно регулировать расход воздуха в барабанной сушилке для смены продукта. Материал в барабане транспортируется посредством вращения барабана независимо от потока воздуха. Поэтому барабанные сушилки могут работать с высокой надежностью.

Особое преимущество барабанных сушилок состоит в том, что можно регулировать как температуру на входе горячего газа, так и количество воздуха для сушки в те периоды, когда система сушки, предназначенная для конкретной производительности, работает в течение длительного времени со значительно сниженной производительностью. Уменьшение количества воздуха для сушки позволяет поддерживать высокую температуру горячего газа, близкую к расчетному значению. Как описано выше, это означает, что низкий удельный расход топлива на тонну высушенного твердого вещества сохраняется, даже когда сушилка не работает на полной номинальной мощности.

Удельное потребление электроэнергии в барабанной сушилке относительно низкое. Барабанные сушилки отличаются также тем преимуществом, что управление сушилкой может осуществляться с помощью массового расхода воздуха, а не с помощью температуры воздуха на входе.

#### ***Очевидные преимущества барабанных сушилок***

- Подходят как для грубых, так и для тонких твердых частиц
- Нечувствительны к грубым или тяжелым твердым веществам.
- Низкие расходы на оборудование для подачи воздуха
- Нечувствительны к изменениям размера частиц
- Нечувствительны к колебаниям влагосодержания и массового расхода.
- Нечувствительны к отключению осушающего воздуха.
- Высокая температура воздуха для сушки в сочетании с низкими потерями тепла
- Низкая удельная потребность в электрической энергии

- Стабильный удельный расход тепла даже при производительности ниже номинальной
- Простая установка и быстрый ввод в эксплуатацию
- Терпимость к ошибкам персонала в работе
- Очень прочный толстостенный барабан с длительным сроком службы
- Умеренный износ и низкие требования к запасным частям

Однако некоторыми недостатками вращающихся барабанных сушилок не следует пренебрегать.

#### ***Недостатки барабанных сушилок***

- Высокая металлоемкость (толстостенная конструкция барабана)
- Выбор внутренних устройств при проектировании сушильного барабана требует многолетнего опыта
- Обеспыливание материала при сушке происходит лишь частично
- Противоточные варианты сушки ограничены крупнозернистыми материалами.

#### **Критерии выбора сушилок в промышленности**

Для практического применения решение должно приниматься на основе основных критериев, которые имеют особое значение для клиента.

Критерии выбора, на основании которых может быть принято решение в пользу вращающихся барабанных сушилок [1, 2], приведены в нижеследующем перечне:

- Широкий ассортимент материалов - от тонкого до очень грубого
- Неравномерное распределение частиц по размерам
- Неравномерное качество высушиваемого материала
- Продукт нечувствителен к высоким температурам
- Требуется использование прямых газовых или жидкотопливных горелок
- Возможны частые изменения производительности
- Применение обычной стали достаточно
- Нет места для сложной системы подачи воздуха
- Требуется установка сушилки на открытой площадке

## Тепловое и конструктивное проектирование барабанных сушилок

Из-за нехватки ресурсов и роста цен на энергию важное значение приобретает еще более эффективная конструкция и эксплуатация сушилок.

Конструкция барабанной сушилки с вращающимся барабаном традиционно выполняется на основе расчета теплового баланса с применением эмпирических моделей, основанных на удельном расходе испаренной влаги  $\omega^*$  для данной геометрической конструкции. По тепловому балансу на первом этапе рассчитываются рабочие параметры, такие как температура газов и твердых частиц, скорость воздушного потока, определяется мощность горелки и массовый расход материальных потоков, а также температура газов.

Температура воздуха на входе в сушилку используется для оценки соответствующего удельного расхода испаренной влаги  $\omega$ , которая необходима для определения внутреннего объема сушильного барабана. В течение десятилетий известно, что значение  $\omega$  показывает хорошую корреляцию с температурой нагревающего газа и, кроме того, с другими ключевыми определяющими факторами, такими как содержание влаги во влажном материале или температура газов отработанного воздуха и температура конечного продукта на выходе из сушилки. [3, 4].

В литературе последними определяющими факторами часто пренебрегают, хотя они оказывают большое влияние на характеристики сушки и размер получаемого барабана. В многочисленных проведенных экспериментах [5, 6] были исследованы характеристики сушки различных продуктов, которые в основном имеют поверхностную влагу, и тех продуктов, которые имеют также внутреннюю влагу. Были испытаны различные диапазоны размеров частиц, содержание влаги и переменный массовый расход влажного материала, температура отработанного воздуха и температура высушенного продукта.

---

\* В русскоязычной литературе удельный расход испаренной влаги (воды) или удельная способность испарения влаги обычно называют влагонапряженностью сушильного барабана (напряженность сушильной камеры по испаренной влаге) и определяют как количество испаренной влаги из влажного материала в час, отнесенное к объему сушильной камеры, в данном случае к объему сушильного барабана, кг/(м<sup>3</sup>·час).

### Тепловой баланс

На рисунке 3 показаны точки измерения температуры, скорости воздушного потока  $v_{a,mix}$  и мощности горелки  $P_B$  на полупромышленной испытательной установке в испытательном центре Allgaier. В начале процесса влажный продукт поступает в барабан с массовым расходом  $\dot{m}_{Pr}$  при температуре  $t_{Pr,f}$  и содержании влаги  $x_{Pr,f}$ . Этот материал вступает в контакт с пламенем горелки и горячими газами, которые образуются при сжигании газа. Мощность горелки  $P_B$  измеряется с помощью газового счетчика. Помимо горячих газов и влажного материала, в процесс входит окружающий воздух с температурой  $t_{amb}$ . Общий массовый расход воздуха описывается  $\dot{m}_L$ . В барабанной сушилке материал высушивается и нагревается до температуры  $t_{P,tr}$  и остаточной влажности  $x_{P,tr}$ . В соответствии с этим во время сушки воздух охлаждается до  $t_{a,real}$ , а его влажность повышается. На выходе из сушильного барабана происходят неизбежные утечки, так что сушильный воздух при температуре  $t_{a,real}$  смешивается с окружающим воздухом при температуре  $t_{amb}$ . Результирующая температура выходящего воздуха  $t_{a,mix}$  и скорость воздушного потока  $v_{a,mix}$  измеряются в вытяжном воздуховоде.

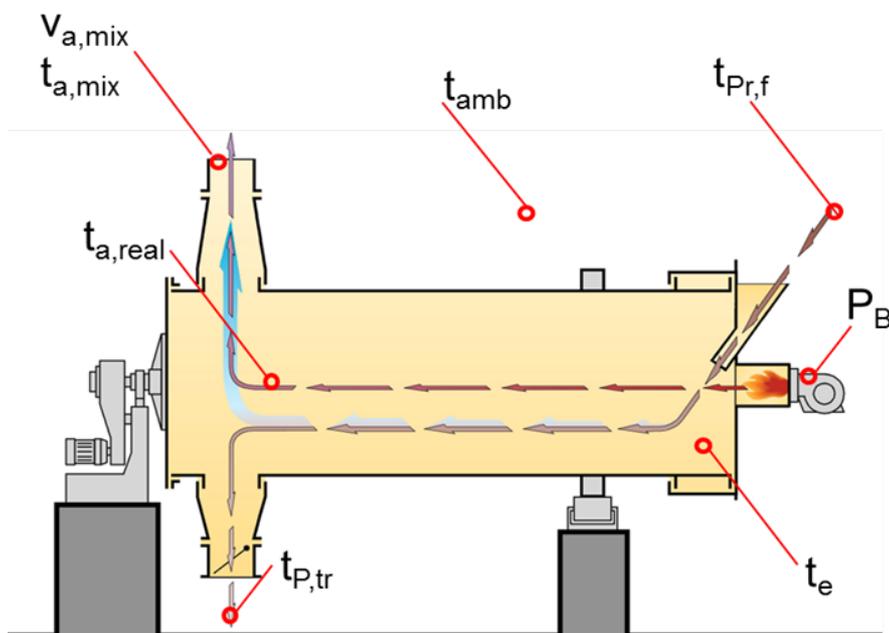


Рисунок 3: Схема полупромышленной сушилки ТТ 20/4 в испытательном центре Аллгайер (Ухинген)

Эти параметры вводятся в уравнения (1), (2) и (3), где  $Q_{tot}$  - общая тепловая мощность, необходимая для процесса сушки. Следует отметить, что эти уравнения упрощены:  $h_{1+x}$  представляет энтальпию влажного воздуха,  $h_{Pr}$  представляет энтальпию твердых частиц,  $Q_r$  потери тепла и  $\dot{m}_{LL}$  массовый расход

воздуха утечки. В результате вычисляется температура  $t_e$  горячего газа (воздуха) на входе, которая не может быть измерена напрямую из-за неравномерности потока дымовых газов и окружающего воздуха и их смешивания.

$$\dot{Q}_{\text{tot}} = \dot{m}_L[(h_{1+x})_a - (h_{1+x})_e] + \dot{m}_{Pr}(h_{Pr,a} - h_{Pr,e}) + \dot{m}_{LL}c_{p,L}(t_{a,\text{mix}} - t_{\text{amb}}) + \dot{Q}_r \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{\text{tot}} = \dot{m}_L c_{p,L}(t_e - t_{a,\text{real}}) \quad (2)$$

$$P_B = \dot{m}_L c_{p,L}(t_e - t_{\text{amb}}) \quad (3)$$

### ***Результаты испытаний***

В ходе всех испытаний влажный песок и некоторые другие продукты с внутренней влажностью сушили до остаточной влажности  $x_{p,\text{tr}}$ . Обычно избегали ненужного перегрева твердых частиц, что означает, что процесс сушки работает наиболее эффективно.

В первом испытательном периоде во вращающейся барабанной сушилке исследовали сушку натурального песка с тремя различными размерами зерен (0,1 - 0,4 мм, 0,4 - 1,0 мм и 1,0 - 2,0 мм), чтобы выяснить, есть ли влияние размеров частиц на удельную способность испарения воды  $\omega$ . На рисунке 4 показан внешний вид кварцевого песка.



Рисунок 4: Кремнеземный песок с тремя размерами зерен.

Испытания проводились при влажности на входе  $x_{Pr,f}$  4% и 8%. Массовый поток варьировался во время испытаний, и было обнаружено, что влияние размера зерна незначительно для продуктов только с поверхностной влажностью.

Всего вместе с первым испытательным рядом было проведено 72 эксперимента. Рисунок 5 содержит выдержку из этих тестов. В то время как черная линия «before» показывает известную в настоящее время удельную способность испарения влаги, на рисунке 5 показаны основные характеристики сушки песка (размер зерен 0,4... 2,0 мм) при различном содержании влаги. Точка измерения с самой высокой способностью испарения влаги характеризуется максимальной пропускной способностью сушилки. Можно видеть, что способность воды испаряться из песка при влажности 4% (красные квадраты) значительно выше, чем те же значения при 2% влажности. Логично следует, что увеличение содержания влаги в сырье до 8% (голубые ромбы) приводит к более высокой удельной способности испарения воды.

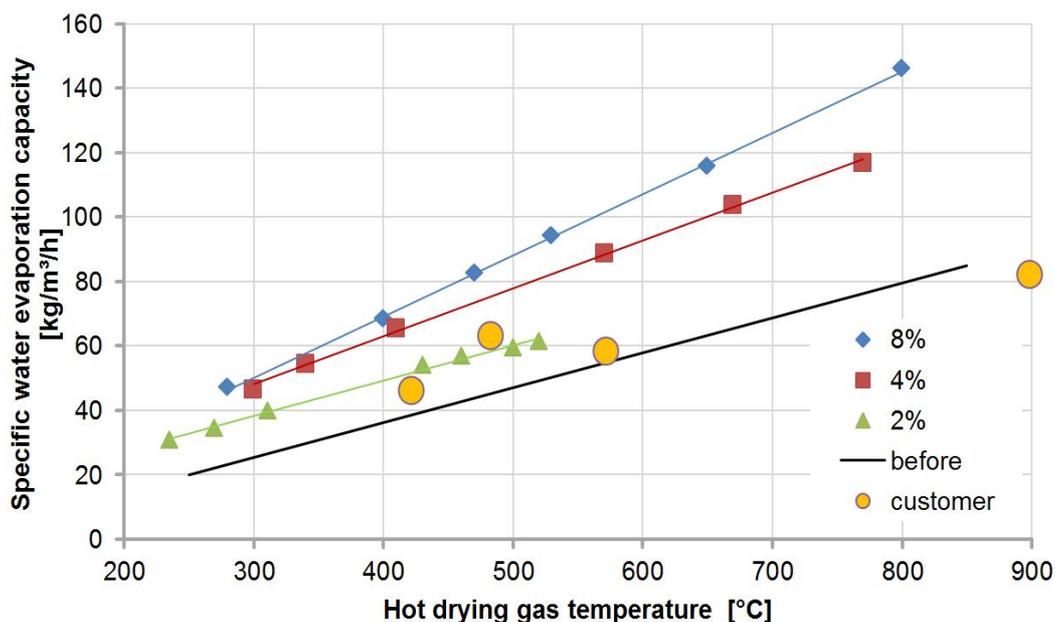


Рисунок 5: Удельный расход испаренной влаги (specific water evaporation capacity)  $\omega$  в зависимости от температуры греющего газа (gas temperature)  $t_g$  при сушке песка на полупромышленной испытательной установке и на установках заказчика. [6]

Как для красных квадратов, так и для голубых ромбов ограничивающим фактором была также пропускная способность существующих сушильных барабанов. Это значительно выше, чем предел при содержании влаги 2%,

поскольку массовый расход, необходимый для достижения высокой удельной мощности испарения воды, ниже.

Более того, высокое содержание влаги в кварцевом песке не является обычным явлением, поэтому влияние содержания влаги выше 4% в дальнейшем не рассматривалось.

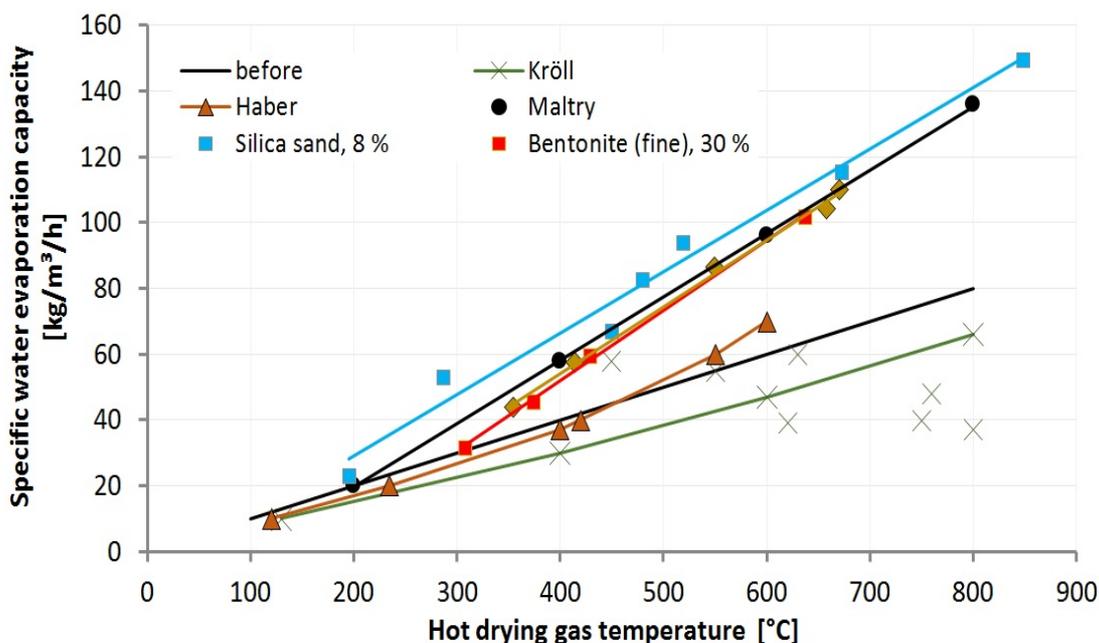


Рисунок 6: Удельный расход испаренной влаги (specific water evaporation capacity)  $\omega$  в зависимости от температуры газа (hot drying gas temperature)  $t_e$ . [5]

В дополнение к испытаниям с песком были проведены испытания с пемзой и бентонитом в качестве образцовых продуктов с внутренней влажностью. Была использована та же процедура для измерения максимальной мощности сушки и для расчета удельного расхода испаренной влаги на объем сушилки. Для веществ с внутренней влажностью были установлены более высокие значения удельной способности воды к испарению, чем в литературе (рис. 6). Черная линия «before» представляет реализуемые в настоящее время скорости испарения.

### Испытания на промышленных сушилках

Лабораторные испытания проводились в условиях, которые обычно отсутствуют в практике: постоянный массовый расход, постоянное содержание влаги в кварцевом песке и т. д. Массовый расход материала и его влажность

значительно варьируются в режиме промышленной эксплуатации сушильных аппаратов. Чтобы показать возможности и пределы нового эмпирического соотношения для проектирования барабанных сушилок с вращающимся барабаном, авторы [5, 6] исследовали существующие промышленные сушильные установки в повседневной эксплуатации. Результаты трех различных сушильных установок заказчика также представлены на рисунке 5.

В двух точках, отмеченных ●, показаны два различных режима работы барабанной сушилки с вращающимся барабаном (тип: Allgaier TT 90/6,5), которая сушит кварцевый песок с размером частиц около 4 мм и влажностью 7%. Высушенный кварцевый песок, который покидает сушилку на выходе, полностью сухой («технически нулевая» влажность). Как видно из рисунка 5, обе точки измерения значительно ниже максимально возможного удельного расхода испаренной воды. Обычно сушилка должна работать вблизи красной или синей линии. Режим работы слева от этих двух точек ( $t_e = 420^\circ\text{C}$ ) характеризуется слишком высоким воздушным потоком, который всасывается через сушильный барабан. Следовательно, температура греющих газов  $t_e$  довольно низкая, и сушильная установка работает неэффективно. За счет уменьшения потока воздуха путем уменьшения мощности вентилятора вытяжного воздуха и увеличения массового потока, рабочая точка перемещается к более высокому удельный расходу испаренной воды при более высокой температуре газа на входе. Таким образом, эффективность сушильной установки была значительно увеличена. Работа анализируемой сушилки все еще не идеальна, так как температура  $t_e$  и производительность по испаренной влаге может быть теоретически увеличены. Однако это невозможно, поскольку точка росы уже была очень высокой. В этом особом случае дальнейшее увеличение нагрузки по испаренной влаге приведет к конденсации воды в воздуховоде отработанного воздуха.

Другая сушильная установка (рис. 5), тип: Allgaier TT 120/9,5, работает в исходной точке проектирования. Кремнеземный песок с размером зерен 0,1 - 2 мм сушат от влажности от 6% до 0%. Эта установка может работать с более высоким потоком влажного материала, чтобы повысить эффективность и производительность сушки.

Третья промышленная сушилка (рис. 5), тип: Allgaier TT 120/11 работает при довольно высокой температуре горячего газа  $900^\circ\text{C}$ . Удельный расход испаренной

влаги ниже расчетной. В этом случае можно было легко определить, просто измеряя температуры, мощности и массовые потоки (см. рисунок 3), что на конкретной установке должна быть техническая проблема. Проблема заключалась в ошибочном управлении вентилятором вытяжного воздуха. Это приводит к высокому расходу воздушного потока в барабане.

### ***Выводы***

В полупромышленной лабораторной барабанной сушилке было проведено несколько экспериментов с кварцевым песком, пемзой и бентонитом. Было показано, что для продуктов, имеющих только поверхностную влажность, размеры частиц (0,4... 2,0 мм) практически не влияют на характеристики сушки. С помощью теплового баланса и измерения содержания влаги и массового расхода твердых частиц на входе и выходе вращающейся барабанной сушилки была установлена и сравнена зависимость между температурой нагревающего газа (воздуха)  $t_c$  и удельным расходом испаренной влаги  $\omega$  с данными из литературы [3, 4]. Удельный расход испаренной воды значительно увеличивается с увеличением содержания влаги в твердых веществах. При содержании влаги 8% достигается максимальный удельный расход испаренной влаги, и дальнейшее увеличение содержания влаги не приводит к более высоким показателям. Удельный расход испаренной влаги в современных барабанных (роторных) сушилках для различных конкретных случаев получился на 60% выше, чем обычные значения в литературе. Благодаря полученным результатам роторные барабанные сушилки могут быть сконструированы сегодня более компактными и в то же время более эффективными.

Дополнительно было обнаружено, что данный метод может использоваться в качестве сервисного инструмента, чтобы легко решить, есть ли серьезные ошибки в работе существующих промышленных сушилок.

### **Комбинированные сушильные и охлаждающие барабаны**

После сушки часто требуется охлаждение продукта. Охлаждение необходимо из-за последующих этапов обработки, таких как транспортировка, просеивание, хранение, смешивание или упаковка, которые допускают определенные максимальные температуры для материала. Охлаждение также требуется, если к высушенному твердому веществу необходимо добавить чувствительные к

температуре добавки, некоторые смолы, например, для производства высококачественных материалов "готовая смесь" из песка. Поскольку затраты на оборудование и энергопотребление связаны с технологическим проектом, охлаждение должно осуществляться только до фактической требуемой температуры. Для применений в промышленности строительных материалов эта температура часто составляет 55...60°C и реже 40...45°C.



Рисунок 7: Ротационные барабаны для комбинированной сушки и охлаждения песка

### ***Сушка и охлаждение в двойном барабане ротационной сушилки***

В прошлые времена сушка и охлаждение проводились в отдельных барабанах. В настоящее время комбинированная сушка и охлаждение в одном вращающемся барабане специальной конструкции является хорошо отработанной технологией. Наиболее известными являются вращающиеся барабаны с двойным корпусом торговой марки MOZER® ТК. В мировой индустрии минералов и строительных материалов можно найти сотни применений для сушки и охлаждения, главным образом, песка и щебня. Примеры показаны на рисунке 7. Хотя сушка происходит во внутренней трубе барабана с параллельным потоком твердого продукта и сушильного газа, охлаждение осуществляется во внешней оболочке с использованием окружающего воздуха в противотоке к сухому и горячему продукту, который должен быть охлажден. Принцип работы комбинированных двухслойных сушилок / охладителей показан на рисунке 8.

Преимуществом системы является компактная конструкция короткой длины и возможность приводить барабан в движение непосредственно с помощью

переднего редукторного двигателя, только одного цилиндра и одной пары роликов. Вход влажного материала и выгрузка сухого продукта на одной и той же стороне установки могут быть выгодными, когда, например, требуется дополнительный байпас материала, минуя сушилку/охладитель.

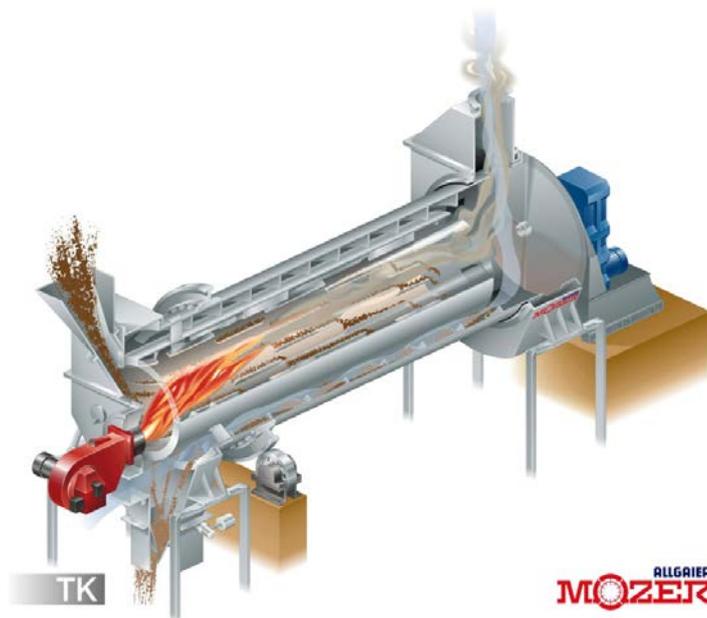
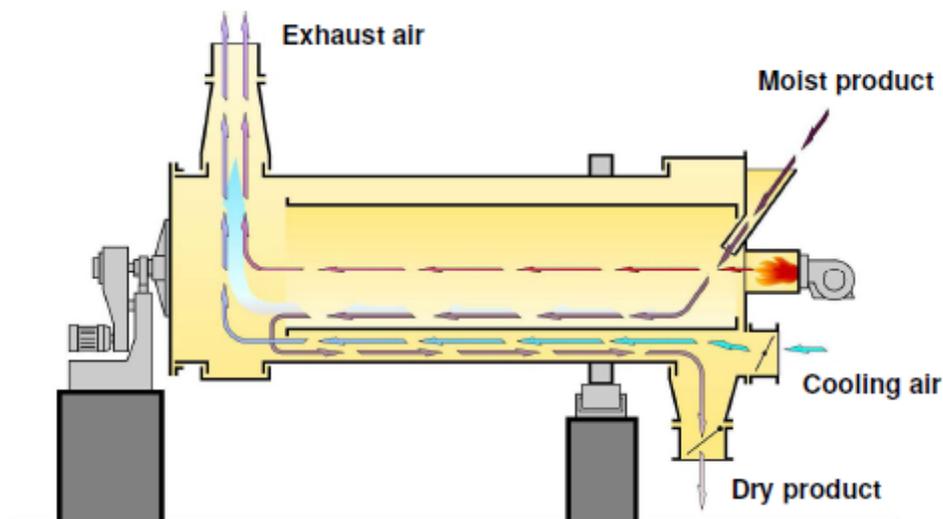


Рисунок 8. Принципиальный чертеж 2D и 3D барабанной сушилки ТК с воздушным охлаждением

Поскольку горячий внутренний барабан входит в контакт с высушенным твердым веществом, подлежащим охлаждению, эффективность охлаждения системы ограничивается температурами конечного продукта от 55°C до 60°C в зависимости от условий окружающей среды. Однако эти температуры в большинстве случаев являются достаточными для охлаждения материалов в минеральной промышленности.

### *Сушка и охлаждение в однобарабанной сушилке*

В некоторых случаях для высушенных материалов требуются более низкие температуры близкие к температуре окружающей среды (30...45°C). Установка дополнительно к сушилкам/охладителям с двойным корпусом ТК барабана охладителя (серия ТК-D) позволяет получить продукт с низкой температурой.

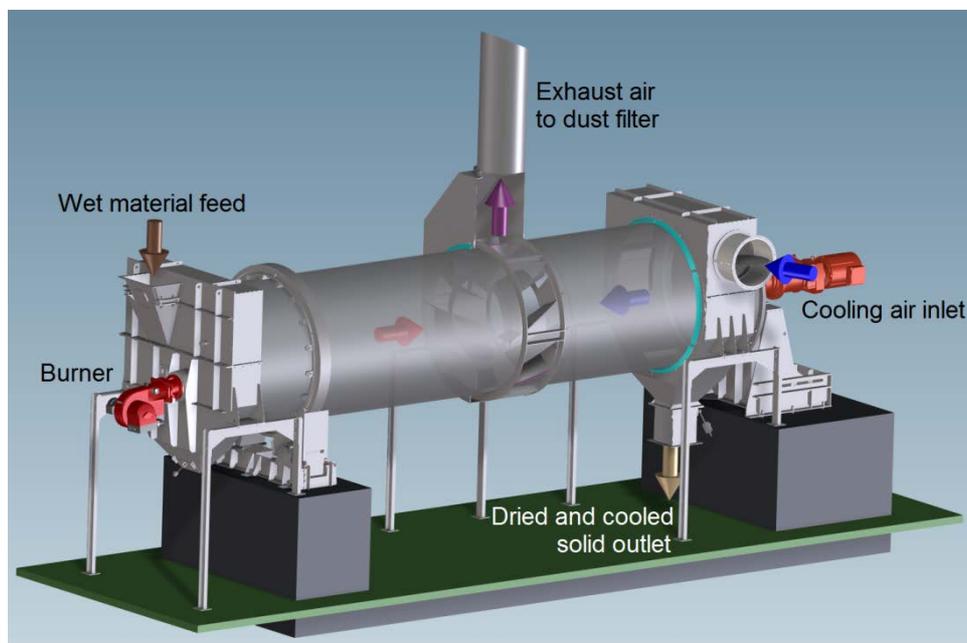


Рисунок 9. Вращающаяся барабанная сушилка ТК-D с противоточным воздушным охлаждением

В отличие от сушильного/охлаждающего барабана с двойной оболочкой ТК, конструкция ТК-D представляет собой монобарабан, у которого нет контакта между охлаждаемым материалом и горячей внутренней поверхностью барабана в зоне входа сушилки. Высушенный материал проходит через специально разработанный отсек из зоны сушки в зону охлаждения, где он охлаждается противотоком холодным воздухом (рис. 9). Благодаря такой конструкции сушильный/охлаждающий барабан ТК-D выгружает высушенный материал с температурой близкой к температуре окружающего воздуха. В типовой конструкции оба потока отработанного воздуха из сушильного и охлаждающего отсеков удаляются в атмосферу вентилятором через однокамерный рукавный фильтр (рисунок 10).

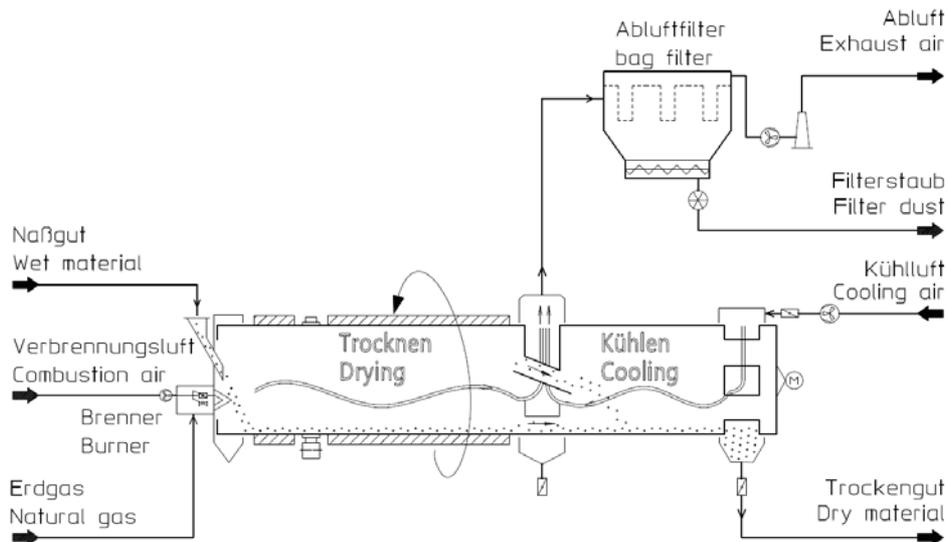


Рисунок 10: Схема потоков в монобарабане ТК-D

При двухкомпонентной конфигурации центрального передаточного отсека потоки отработанного воздуха из зоны сушки и зоны охлаждения могут быть удалены из барабана отдельно. В то время как влажный отработанный воздух после сушки очищается от пыли и выбрасывается в атмосферу, теплый, сухой и очищенный от пыли воздух после охладителя может возвращаться в процесс в виде предварительно нагретого осушающего воздуха, что приводит к рекуперации тепла из сухого материала (рисунок 11). Это обеспечивает экономию энергии первичного нагрева, например, газа или масла, до 10%.

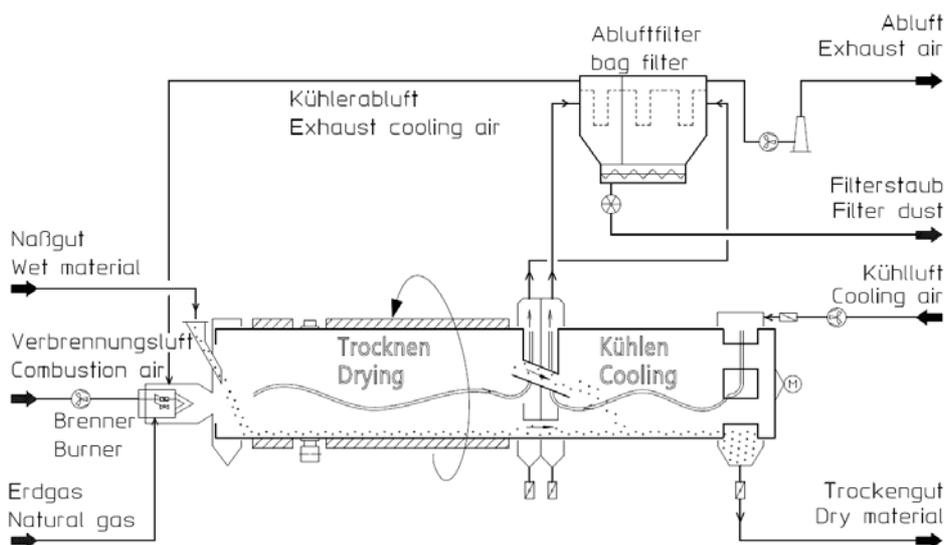


Рисунок 11: Раздельное удаление отработанного воздуха после сушилки и охладителя и рекуперация тепла

Отдельная подача и отвод газовых потоков обеспечивают дополнительные возможности обработки материала и газа (воздуха): сушка прямотоком или противотоком, независимо друг от друга, может сочетаться с противотоком или прямотоком при охлаждении

Использование противотока воздуха и материала обеспечивает особенно эффективный высокотемпературный процесс, например, для прокаливания твердых веществ, которое сразу же сопровождается охлаждением. Зона нагрева может быть настроена и оптимизирована полностью независимо от зоны охлаждения.

### ***Испарительное охлаждение в барабанах ТК+***

При росте цен на энергоносители эффективное использование ресурсов является важным методом повышения рентабельности и конкурентоспособности производства. Поскольку термическая сушка требует в десять раз больше энергии по сравнению с чисто механическим удалением воды, особый интерес представляет использование систем сушки, которые являются максимально энергоэффективными. В дополнение к вышеописанным способам испарительное охлаждение является еще одним способом снижения энергопотребления. Прогресс в этом вопросе поддерживается технологией Allgaier MOZER® ТК+ [7]. Предлагаемый способ в основном используется только для продуктов с поверхностной влажностью. Комбинированная сушильная и охлаждающая барабанная система ТК+ предлагает концепцию, которая эффективно охлаждает высушенный песок с помощью испарительного охлаждения и обеспечивает экономию топлива до 15%.

В то время как в большинстве случаев охлаждение горячего песка осуществляется с использованием сухого окружающего воздуха, во время испарительного охлаждения охлаждение твердых частиц осуществляется путем испарения остаточных порций оставшейся влаги из частиц. Таким образом, вместо обмена измеряемой или «ощутимой» теплотой между воздухом и материалом, испарительное охлаждение представляет собой охлаждение материала с использованием «скрытой» теплоты, которая является теплотой испарения воды. Теоретически возможно охлаждение до «температуры мокрого термометра» в соответствии с психрометрическим принципом. Как следствие, преимущество испарительного охлаждения заключается в том, что энергия

сохраняется во время сушки за счет использования остаточного тепла в материале, в то время как продукт также охлаждается одновременно.

В системе ТК+ первичный поток около 85-90% влажного песка высушивается во внутренней трубе сушилки/охладителя с двойной оболочкой. После сушки во внутренней трубе оставшийся поток влажного песка подается в систему контролируемым образом. Горячий высушенный продукт смешивают с холодным продуктом, который еще не был высушен, обозначенным как перепускной продукт (bypass product - рисунок 12).

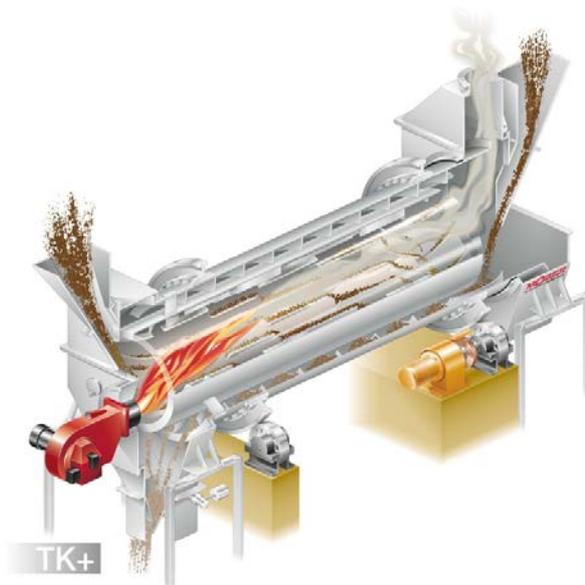
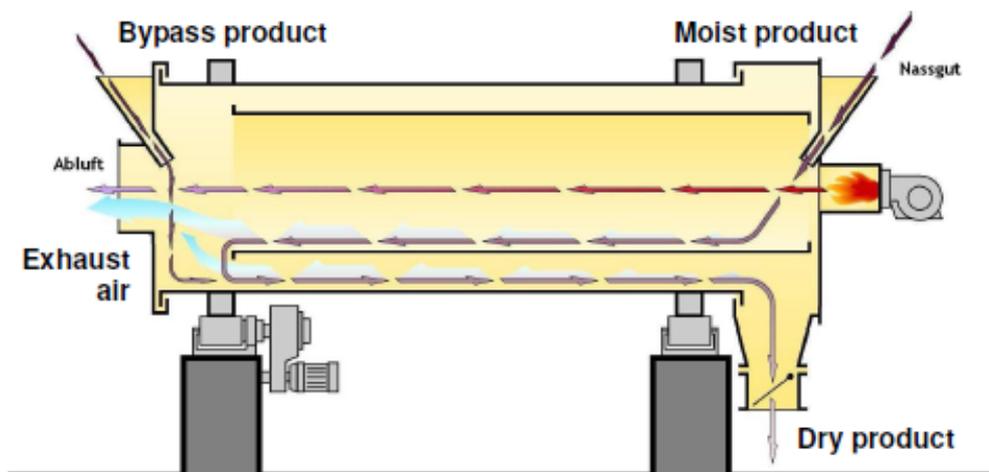


Рисунок 12: Принципиальный чертеж 2D и 3D системы барабанной сушилки ТК + с байпасной подачей и испарительным охлаждением

Горячий сухой продукт из внутреннего барабана и перепускной продукт интенсивно перемешиваются во внешнем барабане с помощью подъемных

лопастей. Объединенный материал транспортируется против очень небольшого потока холодного окружающего воздуха. Во время этого процесса вода, содержащаяся в материале байпаса, испаряется, в то время как горячий продукт охлаждается за счет эффекта испарительного охлаждения.

Пропорционально меньшее количество, от 85% до 90%, топлива (природный газ, легкое мазут, сжиженный нефтяной газ) требуется для сушки уменьшенного основного потока влажного песка. Кроме того, количество охлаждающего воздуха уменьшается из-за эффекта испарительного охлаждения. Как следствие, система ТК+ требует значительно меньшего по расходу вентилятора и меньшего размера рукавного фильтра. В дополнение к уменьшению количества необходимого топлива также происходит снижение потребления электрической энергии. Также возможно преобразовать стандартную систему ТК в систему ТК+ без необходимости изменять или заменять существующую установку для удаления пыли.

### ***Исследования подтверждают экономию энергии за счет испарительного охлаждения***

Многолетний опыт и сложные программы расчета позволяют рассчитывать эффекты, описанные выше. Таким образом, можно адаптировать сушильное оборудование под требования каждого клиента. Интенсивное исследование было предпринято в общей сложности на одиннадцати сушилках, поставляемых Allgaier, чтобы проверить, подтверждают ли фактические параметры сушилок прогнозируемое потребление энергии [8]. Все доступные параметры процесса и потребления измеряются с помощью приборов, которые в некоторых случаях могут накапливать информацию в течение нескольких лет. Были исследованы как сушилка/охладители системы MOZER® ТК, так и установки системы ТК+. Сравнительные оценки параметров, определенных с использованием существующих программ проектирования и значений, измеренных на заводах, показали тесное соответствие с первоначальным теоретическим проектом установки. Исследование подтверждает, что экономия топлива от 10% до 15% может быть достигнута с помощью испарительного охлаждения при использовании установок системы ТК+. Также было подтверждено, что потребление электроэнергии на установках ТК+ с испарительным охлаждением

почти вдвое уменьшается из-за уменьшения количества отработанного воздуха. На рисунке 13 показаны различные затраты на топливо в абсолютном и относительном выражении (относящиеся к содержанию влаги в песке ТК+ с влажностью 4%) и в системах ТК и ТК+ с примерным содержанием влаги в песке 4%, 5% и 6%.

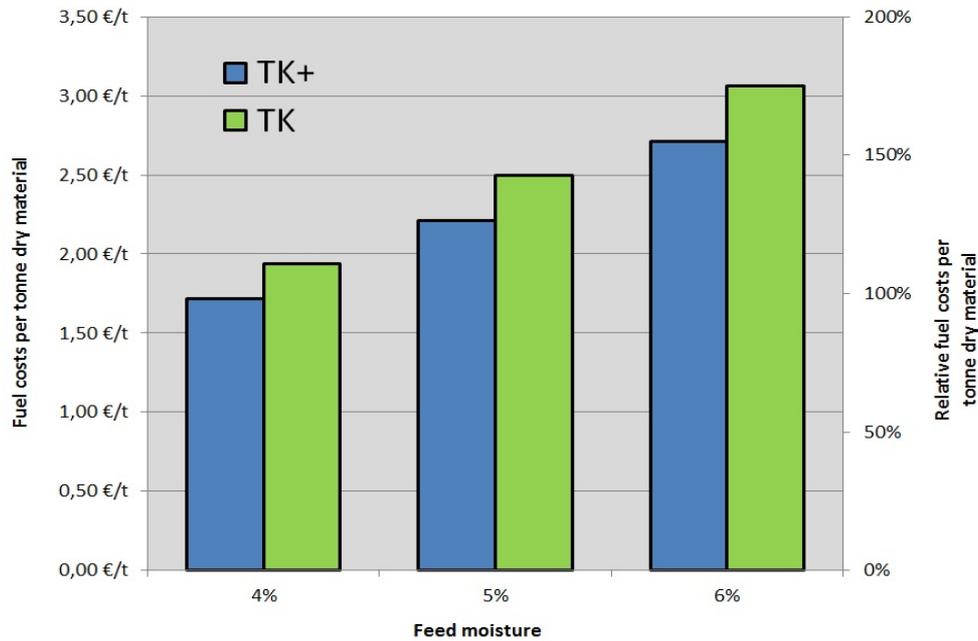


Рисунок 13: Сравнение затрат на топливо на метрическую тонну сухого материала в ТК и ТК + при различной влажности сырья. [8]

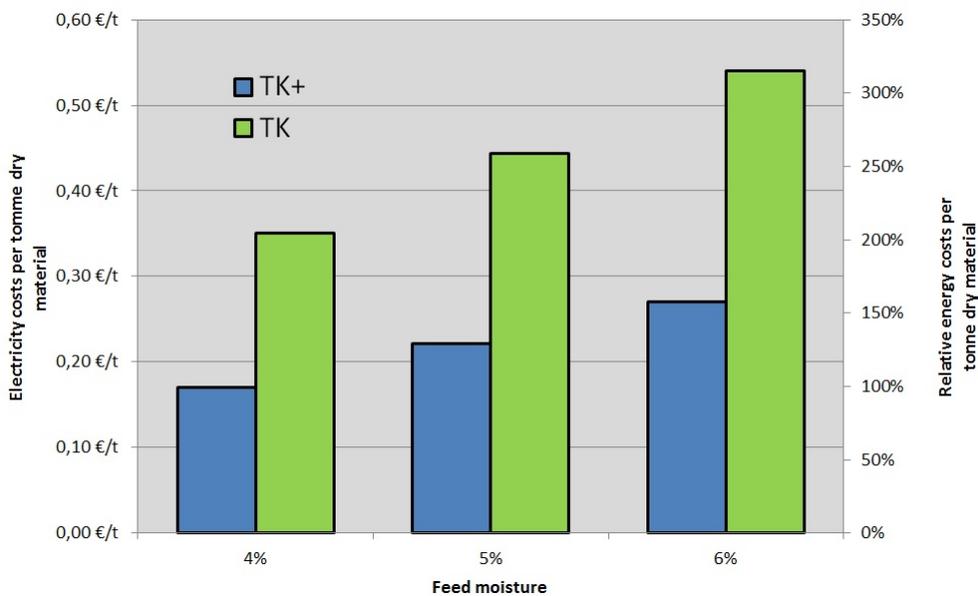


Рисунок 14. Сравнение затрат на электроэнергию на метрическую тонну сухого материала в ТК и ТК + при различной влажности сырья. [8]

На рисунке 14 показаны затраты на электроэнергию для обеих систем, обусловленные разным количеством воздуха (показаны в абсолютных и относительных единицах относительно содержания влаги в песке ТК + и 4%).

На рисунке 15 показаны средние общие энергетические затраты на сушку одной метрической тонны песка на примере исходного содержания влаги в песке 5%.

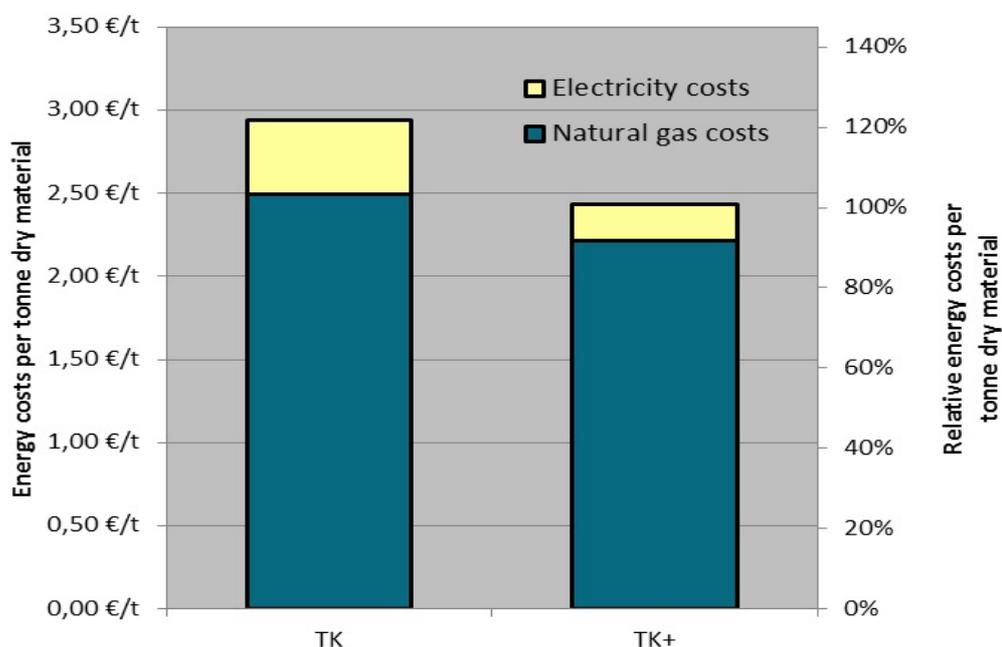


Рисунок 15. Общие затраты энергии на метрическую тонну в ТК и ТК+ при влажности сырья 5%. [8]

Таким образом, становится ясно, что потенциальная экономия с помощью системы ТК+ сушильно-охлаждающего барабана зависит от содержания влаги в песке. Более высокая влажность песка увеличивает преимущества ТК+. Однако следует отметить, что обычно следует начинать сушку с минимально возможным содержанием влаги в песке. На начальное содержание влаги в песке может влиять, например, хранение песка в куче в течение нескольких дней для естественного отвода воды или укрытие хранилища от дождя.

### ***Испарительное или воздушное охлаждение?***

Решение о том, какая из доступных систем сушки-охлаждителя является оптимальной для конкретной задачи, должно приниматься в зависимости от нескольких факторов в каждом конкретном случае. Можно использовать расчет амортизации, чтобы показать, какая система является оптимальной для соответствующего применения. Сушильная установка на основе сушильно-

охлаждающего барабана ТК+ требует больших затрат на контролируемую подачу основного потока влажного песка и дозирование обходного потока. Для контролируемого дозирования влажного материала доступно несколько технических вариантов. Можно использовать совмещенные ковшовые конвейеры, ленточные конвейеры или решение с контролируемым затвором материала. Дополнительные затраты на подачу материала, развитая программа электронного управления и более высокие затраты, связанные с технологическим оборудованием, на изготовление комбинированного сушильно-охлаждающего барабана ТК+ приводят к несколько более высокой стоимости установки для систем ТК+ по сравнению со стандартными системами ТК. В целом, постоянные инвестиционные затраты на технологию уменьшаются пропорционально увеличению общего размера установки. Поскольку дополнительные затраты на подробные аспекты ТК+ уменьшаются по сравнению с размером установки, то с увеличением размера установки дополнительные затраты на систему сушильной и охлаждающей установки ТК+ оказывают меньшее влияние при более высокой производительности.

На рисунке 16 в качестве примера показаны закупочные затраты для обеих систем, нормализованные для системы ТК системы с массовым расходом сухого продукта 15 т/ч.

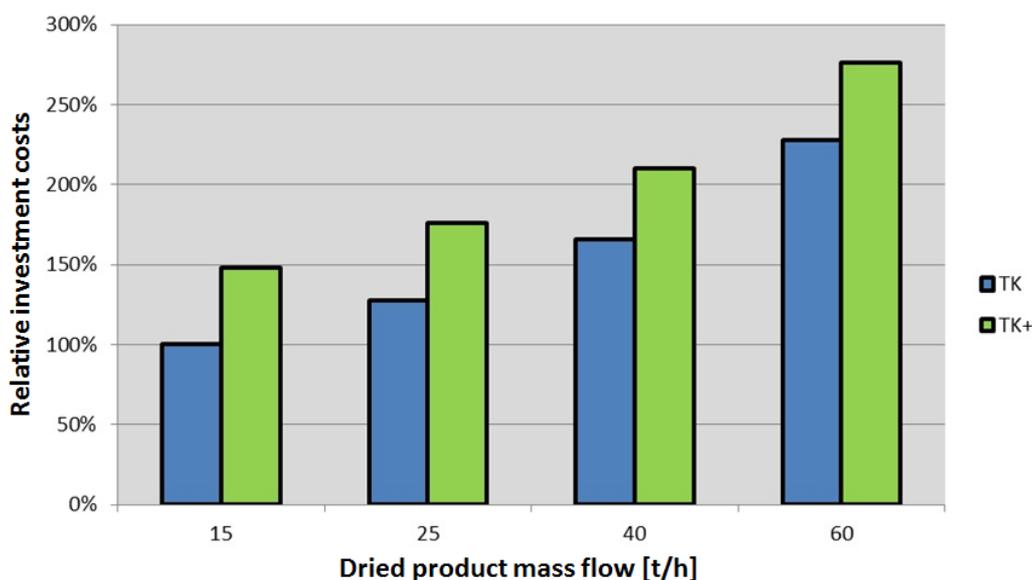


Рисунок 16. Относительные инвестиционные затраты в зависимости от массового расхода сухого продукта. [8]

Вследствие более низких затрат на электроэнергию (затраты на топливо + затраты на электроэнергию) при использовании испарительного охлаждения дополнительные затраты на распределение обходного потока и управление установкой ТК+ обычно амортизируются через 5000–8000 рабочих часов. Периоды амортизации, показанные на рисунке 17, были рассчитаны с использованием немецких цен на энергоносители с 2013 года. Если затраты на электроэнергию, как ожидается, продолжат увеличиваться в отношении затрат на рабочую силу и материалы, период амортизации будет сокращаться еще больше.

Особенно на заводах с высокой пропускной способностью и высоким начальным содержанием влаги целесообразно использовать энергосберегающие технологии, такие как система MOZER® ТК+. Однако следует отметить, что низкое содержание влаги в песке снижает абсолютные капиталовложения и затраты на энергию для любой сушильной установки. Следовательно, вышеприведенное утверждение не должно быть неправильно понято; любая механическая предварительная сушка или обезвоживание влажных продуктов всегда будет разумной, если это возможно.

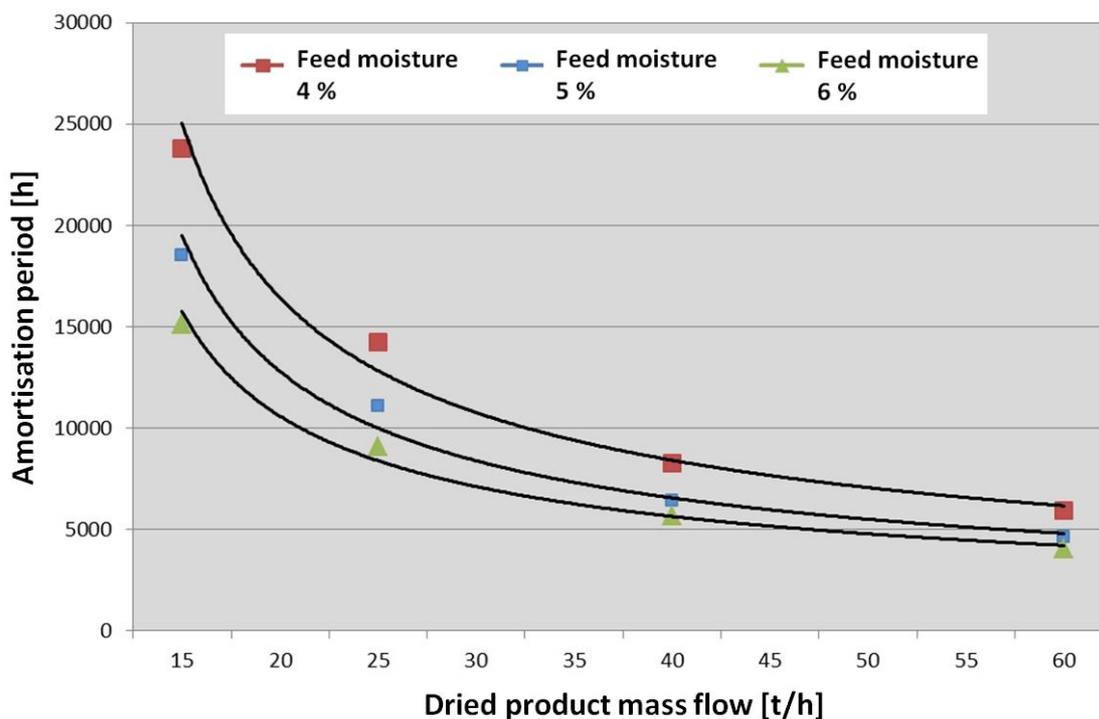


Рисунок 17: Периоды амортизации в зависимости от пропускной способности сухого материала при различной влажности твердого материала. [8]

## **Барабанные сушилки для сушки сильно абразивных материалов**

Вращающиеся сушилки могут также использоваться для очень сложных применений, таких как абразивные продукты, которые могут вызвать значительный износ корпуса сушилки, а также лопастей внутри барабана. Интересным примером является сушка стеклянных отходов перед сортировкой по цвету [9]. Сегодня стеклянные отходы являются основным вторичным сырьем для производства стеклопродукции. Фактически, стекольная промышленность может использовать его в качестве стеклобоя для производства новых изделий из стекла, одновременно снижая уровень энергопотребления стекловаренных печей. Снижение температуры расплавленного стекла при использовании вторичного стекла позволяет значительно снизить энергетические затраты на производство. Каждые 10% вторичного стекла, используемого в качестве сырья в расплавленном стекле, обеспечивают экономию энергии около 2%. За последние годы требования к качеству стекла значительно возросли в сфере подготовки вторичного стекла. В расплавленном стекле, используемом для производства бутылок, достигаются все более высокая степень рециклинга, в то время как потребность в ломе стекла продолжает оставаться востребованной. Следовательно, для обработки стекла и сортировки его по цвету требуются эффективные и высокопроизводительные системы сортировки. Сегодня современные системы сортировки по цвету способны эффективно разделять отдельные частицы размером до 2,5 мм - однако только если сырье поставляется в сухом и чистом состоянии. Кроме того, переработанное стекло содержит другие разрушающие вещества, такие как керамика, камни, фарфор (CSP), пробки, пластмассы, металлические колпачки и клейкие этикетки, а также все другие виды мусора. Стекло для рециклинга преимущественно хранится на открытом воздухе, поэтому большее или меньшее количество воды также попадает в места складирования стеклобоя в зависимости от сезона и количества дождей. В результате вторичное стекло имеет влажность от 1% до 6%, которая колеблется в течение года. Для сортировки собранных стеклянных отходов (бутылки и стеклянная посуда, а также содержащиеся в них загрязняющие вещества и посторонние вещества) с помощью оптоэлектронной системы сортировки цвета, такой как, например, MSort, влажное сырье должно быть сначала высушено и желательно одновременно очищено и от грязи и этикеток.



Рисунок 18: Барабанная сушилка для вторичного стекла

Барабанные сушилки, как правило, отвечают всем специфическим критериям сушки переработанного стекла, что объясняет, почему в последние годы все больше и больше барабанных сушилок начинают использовать для сушки этого материала. Одним побочным эффектом во время сушки вторичного стекла в барабанных сушилках является очистка материала от примесей за счет истирания материала во время сушки. Впечатляющий пример продукта, полученного из барабанной сушилки, показан на рисунке 19.



Рисунок 19: Вторичное стекло <10 мм до и после сушки

Горячий воздух для сушки очень быстро охлаждается во входной зоне барабанной сушилки из-за контакта с влажным продуктом, что сводит к минимуму опасность воспламенения органических компонентов от пламени

горелки. Тем не менее, труба для отработанного воздуха оснащена системой контроля искры и устройством пожаротушения в целях безопасности, чтобы предотвратить возможность пожара в фильтре для отработанного воздуха. Если в загрязненном необработанном стекле присутствуют особенно большие примеси органического материала, используются внешние теплогенераторы воздуха. В этом случае очень горячие дымовые газы из горелки смешиваются с атмосферным воздухом до довольно однородного воздушного потока умеренной температуры. В процессе сушки стекло нагревают до температуры от 60 до 75°C и сушат до остаточной влажности от 0,5 до 1%.

### ***Защита от износа***

Вторичное стекло является очень абразивным продуктом, поэтому материалы, используемые для его переработки, должны выбираться очень тщательно. Подходящая конструкция установленных компонентов позволяет снизить их износ. Чтобы продлить срок службы сушилок для обработки стекла, в барабанах используются очень толстые стенки. Участки, где имеется прямой контакт между стеклом и стенкой аппарата, подвержены особенно сильному износу; поэтому они облицованы защитными пластинами от износа. Противоизносные пластины могут быть спроектированы так, чтобы их можно было прикрепить болтами, и при необходимости легко заменить (см. рисунок 20).



Рисунок 20. Прикрепленные болтами компоненты, установленные в барабанной сушилке

Обращается внимание на то, чтобы избежать скольжения твердого материала на подъемных и направляющих лопастях или хотя бы удерживать этот уровень скольжения на низком уровне, также необходимо следить за тем, чтобы материал

падал на слой высушенного твердого материала. Все это позволяет создавать долговечные решения для сушки даже высокоабразивных твердых веществ, таких как вторичное стекло.



Рисунок 21: Крестовина установленных компонентов в барабанной сушилке

Вторичное стекло не должно разрушаться во время сушки, поэтому высота, с которой стекло падает в точках перехода и в сушилке, должна быть сведена к минимуму. В результате сушильные барабаны для стекла опционально оснащены специальными поперечными перегородками. Установленные поперечные компоненты (см. рисунок 21) дают очень хороший результат в отношении сохранения размера частиц во время процесса сушки.

### ***Комбинированная очистка и сушка вторичного стекла***

Очистка и удаление этикеток могут быть значительно улучшены комбинированной сушкой и очисткой в барабанной сушилке RTT, которая сочетает в себе оба полезных свойства для обработки стекла [10]. Для этого перед зоной сушки вращающегося барабана используется отсек большего диаметра барабана и, следовательно, более длительное время пребывания стекла. Эта запатентованная технология предполагает, что очищаемый стеклянный материал перемешивается в чистящем барабане перед сушильным отсеком в течение до 20 минут без значительного повреждения продукта (см. рисунок 22 - вид на зону очистки RTT).



Рисунок 22: Вид отсека очистки комбинированного сушильного барабана

Отдельные частицы стекла трутся друг о друга во время движения в барабане, одновременно с удалением наклеенных этикеток. Это сделано намеренно, пока сырье еще влажное и требует длительного времени выдержки. Многочисленные эксперименты, проведенные автором и др. показали, что такой метод достигает лучших результатов очистки.

### Flow Chart Cleaning- Drum- Dryer Type RTT D ZL OB K G

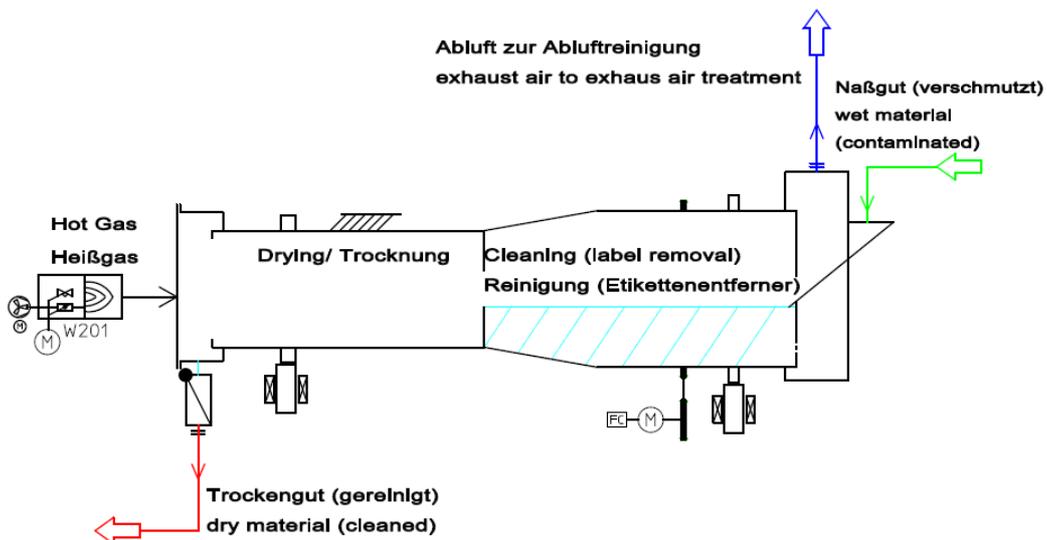


Рисунок 23: Схема процесса очистки вторичного стекла в барабанной сушилке RTT

После этого очищенный стеклянный материал перемещается в зону сушки барабана, где он высушивается (на рисунке 23 показана блок-схема процесса). Сушка стеклобоя в барабанной сушилке имеет существенное преимущество, поскольку расход тепла небольшой и, следовательно, сушка очень эффективна как по принципу противотока, так и по принципу параллельного потока.

### Сушка известняка и очистка его без использования воды

Аналогичная конструкция сушилки используется в другой уникальной технологии для сушки и последующей очистки загрязненного известняка во вращающемся барабане [11, 12]. Во многих карьерах, используемых для добычи известняка для промышленности строительных материалов и для изготовления наполнителей и пигментов, после сортировки получают известняковый щебень размером от 0 до 60 мм. По крайней мере, в большинстве карьеров в Европе этот камень имеет большое количество суглинка и глины, прилипших к нему из слоев почвы в месторождении известняка. До недавнего времени этот просеянный известняк требовал использования дорогих моечных машин для дальнейшей переработки в высококачественные материалы. Часто загрязненный известняк без какой-либо дополнительной обработки использовали в качестве низкосортного просеянного щебня для дорожного строительства. В сильные морозы или в засушливых регионах при дефиците воды промывочные установки имеют ограниченное применение. Кроме того, использование моечных установок требует дорогостоящей обработки осадка, удаления сточных вод и удаления отходов.

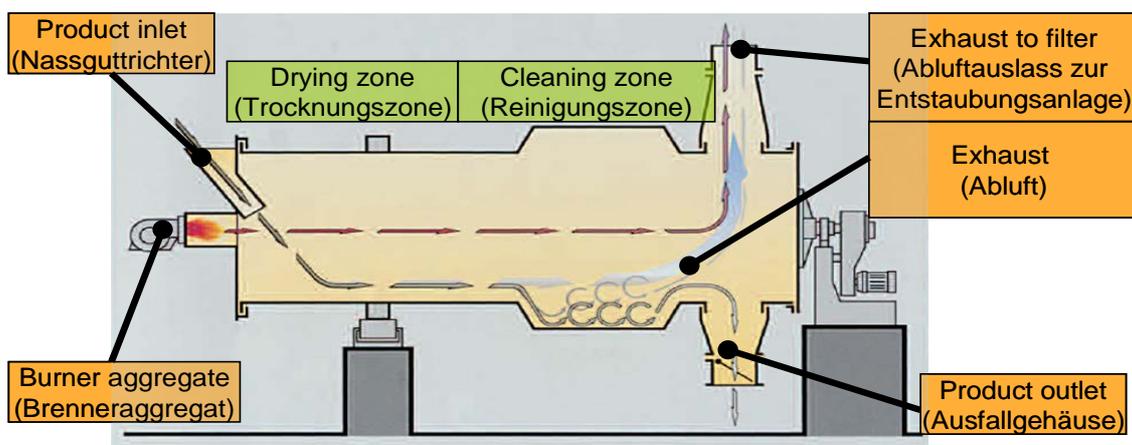


Рисунок 24: Схема сушильного барабана TRH для сухой чистки камня

Уникальная барабанная сушилка TRH, показанная на рисунке 24, представляет собой метод, который сушит просеянный известняк и одновременно освобождает его от ила и глины без необходимости использования воды или дорогостоящих систем мойки камней. Как и в описанной выше системе RTT, система TRH использует барабанный отсек увеличенного диаметра, но с некоторыми специальными лопастями. В барабане TRH отсек для очистки следует за отсеком быстрой сушки при повышенных температурах. Суглинок и глина удаляются с поверхности известняка сочетанием быстрого высыхания и интенсивного истирания камней. Примеси удаляются из сушилки вместе с отработанным воздухом или могут быть отделены от основного продукта с помощью довольно простых просеивающих машин после сушилки.



Рисунок 25: Система сушки TRH для очистки известняка

Фактически, высококачественный известняковый камень, полученный этим способом, имеет такое же или даже лучшее качество, чем тот, который получают на традиционных моечных комплексах на камнеобрабатывающих заводах, несмотря на значительно более низкие капитальные затраты, а также значительно более низкие эксплуатационные расходы, возникающие в результате отсутствия необходимости использования воды. Кроме того, использование этой системы значительно уменьшает количество необходимого оборудования и конвейерных блоков, а также требует гораздо меньше места для установки.

На рисунке 26 показан примерный образец продукта, полученный после очистки в барабане TRH (справа), в сравнении с грязным продуктом, подаваемым на завод (слева).



Рисунок 26: Образцы известнякового камня до и после сушилки TRH

Вышеупомянутые преимущества были подтверждены исследованием в сотрудничестве с клиентами [13]. Эффективность этого инновационного технологического решения сравнивалась с системами мойки камня с сушкой и без сушки промытого материала. Результаты показывают явные преимущества с точки зрения энергопотребления, капитальных затрат, эксплуатационных расходов и затрат на техническое обслуживание (Рисунок 27).

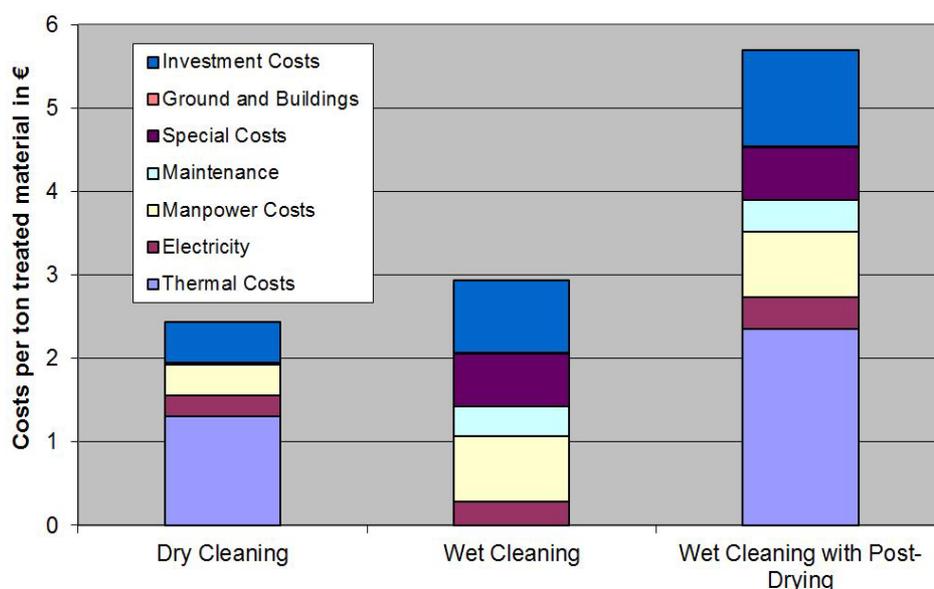


Рисунок 27: Затраты на сушку/очистку известняка в барабане TRH в сравнении с затратами на мойку камней без и с последующей сушкой [13]

## **Разработка нового вращающегося трубчатого охладителя для сыпучих материалов**

Во многих промышленных случаях необходимо охлаждать теплый или горячий продукт после сушки. Особенно горячие сыпучие материалы от высокотемпературных процессов, таких как процессы прокаливания, окисления или сгорания, требуют специального охлаждения от температур около 700°C или даже 1200...1400°C до более низких температур. Примерами таких продуктов являются пигменты (например, диоксид титана), шлаки, оксиды и гидроксиды металлов, цементный клинкер, губчатое железо, окалина, активированный уголь, катализаторы и отходы от плавильных заводов. Дальнейшая обработка часто невозможна без охлаждения продуктов до температуры 100...150°C. Во многих случаях тепловая энергия, содержащаяся в твердых веществах, должна возвращаться в процесс сушки или прокаливания. Помимо использования холодильников с прямым контактом между окружающим воздухом и охлаждаемым материалом, вращающиеся трубчатые охладители косвенного действия также используются в промышленности. Охлаждение может осуществляться воздухом или водой. Термин «косвенный» означает, что охлаждающая жидкость не вступает в прямой контакт с горячим продуктом, подлежащим охлаждению. Вместо этого тепло передается от горячего продукта к охлаждающей жидкости через стенку, которая разделяет теплоносители.

Роторные охладители непрямого действия с планетарной передачей различных конструкций, использующие в качестве охлаждающей среды атмосферный воздух, известны десятилетиями [14].

Очень эффективная технология охлаждения обеспечивается вращающимся трубчатым охладителем, в котором в качестве охлаждающей жидкости используется вода [15]. Этот новый охладитель, названный RK-W, обеспечивает много преимуществ по сравнению с ранее известными решениями. На рисунке 28 показан трехмерный чертеж охладителя для охлаждения 40 т/ч оксида металла от температуры на входе 800°C до температуры на выходе менее 150°C.

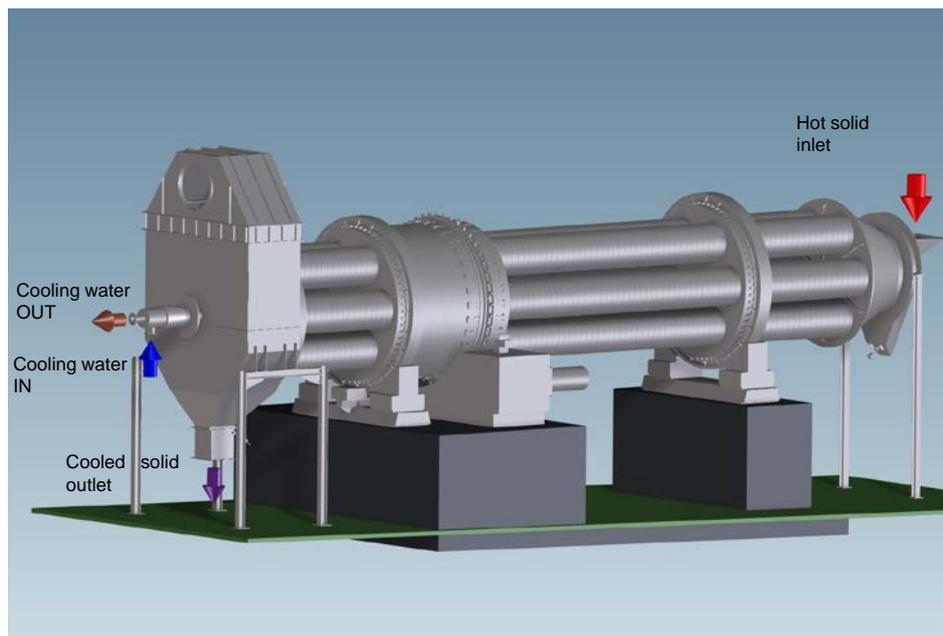


Рисунок 28: Роторный охладитель косвенного охлаждения для твердого вещества производительностью 40 т/ч

Охладитель изготовлен с использованием, например, 6 или 8 труб с двойными стенками с охлаждающей водой, протекающей в промежутке между трубами. Это исключает необходимость использования тяжелого и сложного сварного корпуса вращающегося барабана, как это было сделано в так называемых секционных охладителях, предложенных BSH десятилетия назад. В секционных охладителях явные термические напряжения могут привести к повреждению стального корпуса конструкции, которая имеет небольшую гибкость. Эти термические напряжения могут привести к образованию трещин в сварной конструкции.

В новой конструкции охладителя использовано решение, которое допускает расширение теплообменных труб. Такая конструкция привела к снижению веса и уменьшению сварочных работ, необходимых при изготовлении.

Структура нового вращающегося трубчатого охладителя была оптимизирована с точки зрения термических напряжений и срока службы с использованием современных расчетов методом конечных элементов (рисунок 29).

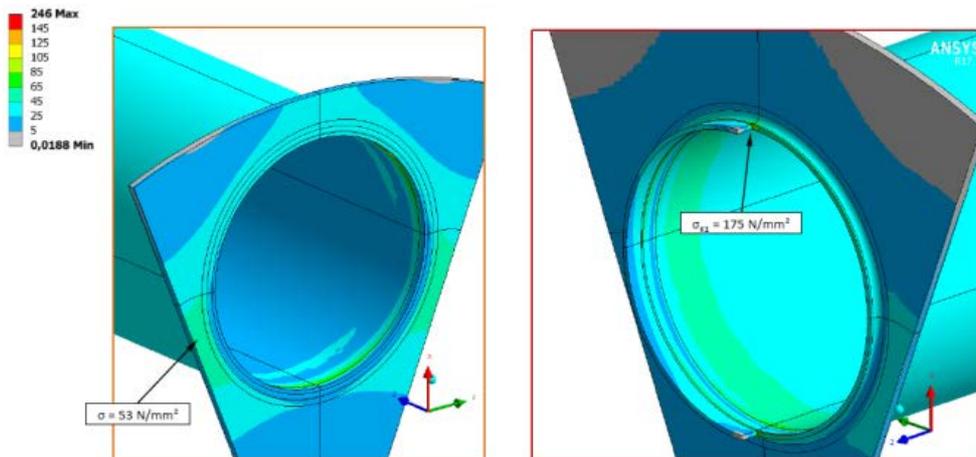


Рисунок 29: Результаты FEM-расчета новой конструкции охладителя

В новом охладителе пространство труб с двойными стенками полностью заполнено проточной водой, чего нельзя сказать о секционных охладителях. Происходит постоянное охлаждение всех доступных поверхностей теплообменника, несущего горячий продукт, достигая улучшения эффективности охлаждения. Охлаждающая вода подается и удаляется посредством герметичного шарнирного соединения и трубных соединений, проходящих к отдельным охлаждающим трубам, которые несут продукт, и выполнены в виде труб с двойными стенками. Горячие твердые частицы, вводимые в охладитель, перемещаются от входа к выходу посредством вращения и небольшого наклона охладителя.



Рисунок 30: Лабораторный охладитель периодического действия для определения свойств сыпучих материалов и теплопередачи твердых веществ

Чтобы надежно спроектировать аппарат, в течение периода разработки были построены две лабораторные испытательные системы. Используя эти системы, можно было определить данные о сыпучих материалах для конкретного продукта и коэффициенты теплопередачи реальных твердых веществ (рис. 30 и 31).



Рисунок 31: Испытательная установка для непрерывного охлаждения твердых частиц.

В сотрудничестве с внешним техническим отделом были проведены моделирования DEM для охладителя твердых частиц с использованием сыпучих материалов и теплообменных свойств реального продукта, определенных в ходе калибровочных испытаний. Калибровка проводилась в небольшом вращающемся цилиндре диаметром 180 мм и твердой загрузке из 2,5 кг оксида металла с объемной плотностью 2300 кг/м<sup>3</sup>. Передний конец и задняя сторона цилиндра были сделаны из прозрачного пластика, чтобы можно было наблюдать движение твердого сыпучего материала. Например, цилиндр приводили в движение со скоростью вращения 4,08 мин<sup>-1</sup> (0,068 с<sup>-1</sup>). Угол наклона материала составил 33°. С помощью различных процедур моделирования DEM этого испытательного оборудования были определены соответствующие параметры объемных характеристик с коэффициентом трения частицы-частицы  $f_f = 0,4$  и коэффициентом трения качения  $f_g = 0,2$ . На рисунке 32 слева показан профиль реального продукта и справа результат моделирования с использованием вышеупомянутых коэффициентов трения для моделирования DEM.

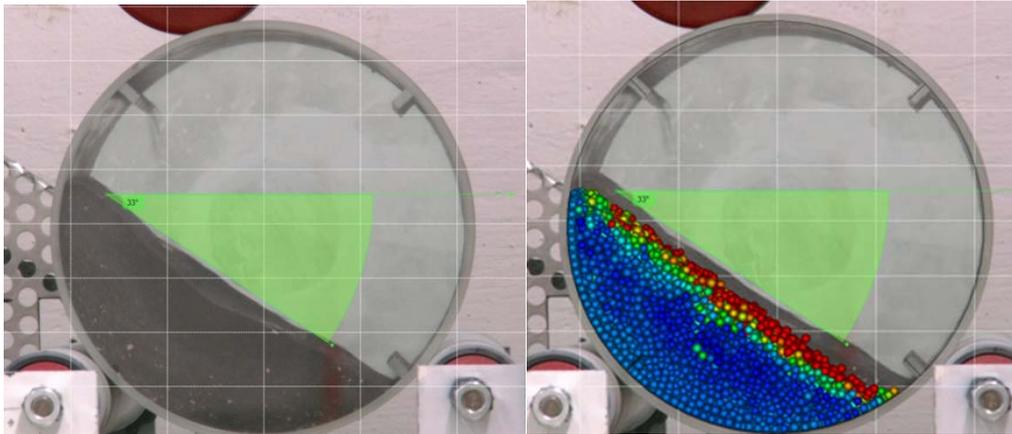


Рисунок 32: Результаты калибровочных испытаний для определения объемных характеристик (пример: прокаленный цинк, скорость вращения  $4,08 \text{ мин}^{-1}$ , угол отклика  $33^\circ$ )

Таким же образом параметры, характеризующие теплопроводность частиц  $thCoP$  и теплопроводность  $thCoW$  из нержавеющей стали, определяли из экспериментов с периодическим охлаждением, описанных выше.

Наконец, с разработанными калибровочными параметрами, которые показывают характеристику реального твердого материала, была смоделирована полномасштабная установка. На рисунке 33 показан результирующий профиль температуры твердого материала по длине охладителя для охладителя длиной 10 м, производительностью 40 т/ч прокаленного цинка с температурой подачи твердого вещества  $700^\circ\text{C}$ .

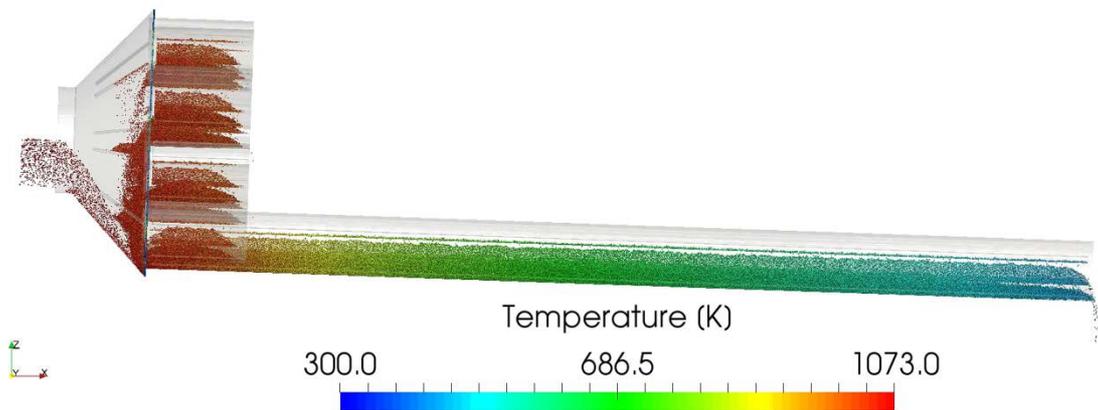


Рисунок 33: Результаты DEM-моделирования роторного охладителя (цинк прокаленный, 40 т / ч, температура твердого вещества на входе  $700^\circ\text{C}$ )

Сравнивая результаты моделирования с тепловым балансом, числами теплопередачи и с традиционной оценкой испытаний технического центра, была

подтверждена воспроизводимость результатов. Также были определены коэффициенты теплопередачи от 124 до 237 Вт/м<sup>2</sup>·К для прокаленного цинка, от 120 до 208 Вт/м<sup>2</sup>·К для кварцевого песка и от 81 до 126 Вт/м<sup>2</sup>·К для оксида железа. Эти результаты соответствуют данным из литературы [16], показанным в качестве примера на рисунке 34.

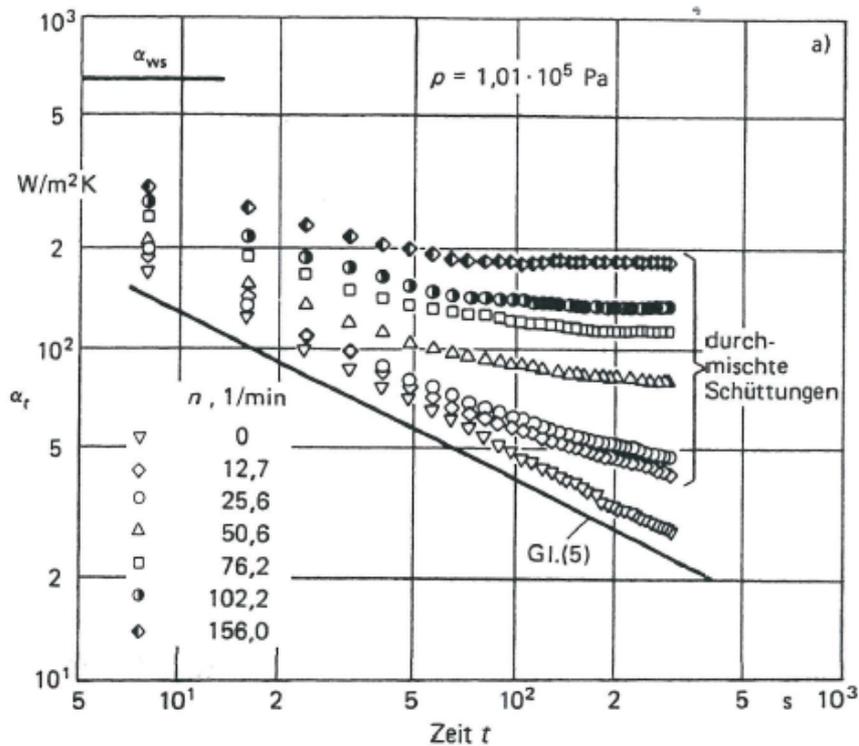


Рисунок 34: Коэффициенты теплопередачи от стены к смешанным сыпучим материалам, Данные Wunschmann [16]

В дальнейшем для разработки полнофункциональной системы охлаждения могут использоваться как непрерывные испытания в техническом центре Allgäuer, так и метод имитации DEM, основанный на калибровочных испытаниях свойств сыпучих материалов и теплопередачи реальных продуктов.

### Выводы и перспективы

Как показывают различные примеры, вращающиеся барабаны для обработки сыпучего материала в целом и для сушки и охлаждения в специальных условиях все еще неуклонно совершенствуются. В статье подробно описаны экспериментальные исследования по определению удельного расхода испаренной влаги (влагонапряженности) в барабанных сушилках. Представлены новые приложения для использования вращающихся барабанов, такие как различные методы комбинированной сушки и охлаждения, сушка чрезвычайно абразивных

твердых веществ, таких как стеклобой, комбинированная сушка и удаление этикеток, чистка и сушка щебня известняка и косвенное охлаждение очень горячих твердых частиц водой в новом роторном охладителе. Представлены результаты экспериментальных исследований на различных полномасштабных предприятиях-потребителях, которые показывают практический эффект и дают рекомендации для конечных пользователей. Наконец, описан пример использования современных методов моделирования при разработке аппарата на примере нового роторного охладителя косвенного охлаждения.

Однако эффективность ротационных процессов всегда можно улучшить. Это вопрос многолетнего опыта и использования современных методов расчета и проектирования, чтобы найти правильное решение в интересах клиента.

### Условные обозначения

$ff$		Коэффициент трения частица-частица для моделирования DEM
$fr$		Коэффициент трения качения для моделирования DEM
$h_{1+x}$	[Дж]	Энтальпия влажного воздуха
$h_{Pr}$	[Дж]	Энтальпия твердого материала
$\dot{m}_L$	[кг/с]	Общий массовый расход воздуха
$\dot{m}_{LL}$	[кг/с]	Утечка воздуха, массовый расход
$\dot{m}_{Pr}$	[кг/с]	Массовый расход твердого материала
$P_B$	[Вт]	Мощность горелки
$\dot{Q}_r$	[Вт]	Потери от теплового излучения
$t_{amb}$	[К]	Температура окружающего воздуха
$t_{a,mix}$	[К]	Результирующая температура вытяжного воздуха
$t_{a,real}$	[К]	Температура охлаждающего (осушающего) воздуха
$t_e$	[К]	Температура горячего газа на входе
$thCoP$	[Вт/(м К)]	Теплопроводность частиц
$thCoW$	[Вт/(м К)]	Теплопроводность нержавеющей стали
$t_{Pr,f}$	[К]	Температура твердого материала на входе
$t_{P,tr}$	[К]	Температура твердого продукта на выходе
$v_{a,mix}$	[м/с]	Скорость воздушного потока
$X_{Pr,f}$	[-]	Влажность твердого материала на входе
$X_{P,tr}$	[-]	Остаточная влажность твердого материала на выходе
$\omega$	[кг/(с м <sup>3</sup> )]	удельный расход испаренной влаги (влагонапряженность)

## Сокращения

DEM	Метод дискретных элементов
RK-W	Косвенный планетарный охладитель
RTT	Комбинированная барабанная сушка и очистка
TK	Trocknen / Kühlen = Сушка/Охлаждение
TRH	Сушка и очистка известняка

## Индексы

amb	окружающий
a,mix	воздух, усредненный
a,real	реальный расход
B	Горелка
e	вход
f	влажный
L	Воздух
LL	Утечка воздуха
Pr	Продукт
r	излучение
t	сухой

## **Ссылки**

- [1] Trojosky, M. Selection criteria for the use of dryers in the mineral raw materials, chemical and recycling industries. Cement International 2009, 3, 58-68.
- [2] Trojosky, M. Auswahlkriterien für die Verwendung von Trocknern. Steinbruch und Sandgrube, 2009, 3.
- [3] Kröll, K. Die Vorgänge in Trocknungs- und Erwärmungstrommeln für rieselfähige Güter; Springer-Verlag: Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1950.
- [4] Maltry, W. Untersuchungen an Trommeltrocknern mit Kreuzeinbauten: Deutsche Agrartechnik, 1969
- [5] Ruoff, M. Experimentelle Untersuchung der spezifischen Wasserverdampfungsleistung im Innenraum von Trommeltrocknern. Bachelor Thesis, Allgaier Process Technology, 2017.
- [6] Kindler, A.; Ruoff, M.; Stölzner, G.; Trojosky, M. M. Specific water evaporation capacity of rotary drum dryers. Presented at 2<sup>nd</sup> Nordic Baltic Drying Conference NBDC, Hamburg, Germany, June 07-09, 2017.

- [7] Trojosky, M.; Roller, R.; Frey, M. Evaporative cooling as a method for reduction of the energy consumption on drying sand. *Cement International* 2015, 3, 56-60.
- [8] Frey, M. Vergleichende Ermittlung der Verbrauchswerte von ALLGAIER-Trocken-Kühl-Trommeln der Systeme MOZER® TK und TK+. Bachelor Thesis, Allgaier Process Technology, 2013.
- [9] Hesse, J.; Trojosky, M. Aufbereitung von Recyclingglas. *Schüttgut* 2012, 201, 8-10.
- [10] Trojosky, M.; Hesse, J.; Method and device for preparing broken glass. Patent WO 2011/054418 A1, September 23, 2010.
- [11] Trojosky, M.; Autenrieth, B.; Stölzner, G. Aufbereitung von Kalkstein-Siebschutt mittels einer kombinierten Trocken-Reinigungs-Trommel. *Aufbereitungstechnik* 2012, 3.
- [12] Trojosky, M. Processing of limestone screening debris by means of a combination of rotary dryer and cleaning drum from Allgaier. *Cement International* 2017, 3, 40-41.
- [13] Autenrieth, B. Untersuchungen zur trockenen Reinigung von Kalkstein mittels einer Trocken-Reinigungs-Trommel. Bachelor Thesis. Allgaier Process Technology, 2012.
- [14] Cooling hot bulk materials with indirect rotary drum coolers. Brochure, Allgaier Process Technology, 2016.
- [15] Trojosky, M. Entwicklung eines indirekten Drehrohrkühlers für Schüttgüter. Presented at Jahrestreffen ProcessNet-Fachgruppe "Trocknungstechnik", Halle-Merseburg, Germany, February 26-28, 2018.
- [16] VDI-Wärmeatlas, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf 1991, 1501, Bild 4, Mg 3

12.06.2020

## **Rotary drums for efficient drying and cooling**

Trojosky, M.

*Allgaier Process Technology GmbH, Uhingen, Germany*

Ulmer Str. 75, 73066 Uhingen, mathias.trojosky@allgaier.de

Born in 1960, Study of chemical engineering at the Technical University “Otto von Guericke” Magdeburg, PhD to Dr.-Ing. about heat and mass transfer in liquid sprayed fluid bed drying, Professional career started at GEA Wiegand GmbH Esslingen, Since 1995 at ALLGAIER Process Technology GmbH Uhingen, actual position Director R & D,

## **Rotary drums for efficient drying and cooling**

Rotary drum dryers have been used for decades for drying many different types of goods and are widely used in the building, minerals and raw-materials industry, but in the chemical industry, fertilizer industry and in other branches as well.

At the same time, however, drum dryers have further been improved and permit energy-efficient applications, particularly in the minerals industry, and for very robust and hard-wearing solutions. Significant progress has been achieved for special applications, such as drums for combined drying and subsequent cooling in one unit, dryers with heat recovery by gas circulation or the use of evaporating cooling, rotary drums for granulation and coating procedures, indirect cooling drums for hot products by air or water with heat recovery, etc.

**Keywords:** rotary drum, drying, cooling, kiln, heat recovery

### **Drum dryers: energy-efficient and particularly robust and reliable**

Rotary drum dryers are present in industry for many decades. They are used for drying and cooling, for calcining, granulation and coating. While historical drum dryers are mainly inclined to realize solids transport in combination with the rotation, modern drum dryers are more often installed horizontally. Lifting blades pick up the moist solid from the bottom of the drum letting it fall again, allowing contact between the hot

drying air and the moist solid. An essential factor for the efficient utilization of the heating energy is the optimal design of the dryer's internal fittings, as these have to guarantee optimal and intensive contact between solids and the drying gas. The design of the arrangement, shape and number of fittings require a combination of extensive experience, trials and calculation for proper design.

In most drying applications, the solid material is conveyed in a co-current flow (i.e. in direction of the gas flow). A combination of parallel flow and cross flow between the drying gas and the material is produced in the dryer, while cooling in most cases is done in countercurrent mode. Countercurrent applications for drying or heating are found mainly in the asphalt industry as well as in high-temperature applications and in calcining.

Various methods for heat recovery by exhaust air circulation or evaporative cooling are available and have been developed to the latest state of art during the last decades.

Modern double-shell drums are horizontally designed, allowing the material in the outer shell to be conveyed in the opposite direction to the material in the inner shell. This allows a combination of drying and cooling in one unit.



Figure 1: Big rotary drum from stainless steel at the manufacturing hall (4.5 meter in diameter, 35 meter length) for drying of 320 tph fertilizers

Drum dryers are suitable for fine materials such as silica sand, but especially for rather coarse bulk solids. They are built for solid mass flow rates between 5 and 350 tph (Figure 1). Particular advantages of drum dryers are that they are largely insensitive to fluctuations in the starting moisture content of the material to be dried and to

fluctuations in the feed mass flow rate, to the size of the particles or to unwanted lumps or foreign coarse materials.

With appropriate design of the internal fittings, even very abrasive materials can be processed. In rotary drums for abrasive materials the drum walls, the blades and vanes inside are made from thick-walled steel.

Drum dryers are especially tolerant to operating errors and therefore optimally suitable for installation in areas of poor infrastructure. The cost for automation of the dryer control system is comparatively low. In the event of a power outage, it is usually possible to resume operation when power supply is restored. In the event the supply of drying air cuts out, the solid in the drum dryer is reliably conveyed just by the rotation of the drum. Due to the comparatively simple setup of a drum dryer, end-users can perform dryer assembly on the construction site themselves. This is advantageous in global markets where locally available exhaust air filters are used or air ducts are installed by local companies themselves. Additionally, drum dryers can usually be commissioned in a relatively short time.

Technical requirements for heating drum dryers are relatively low. Modern burners have only small combustion air fans. The moisture-laden exhaust air is extracted from the dryer by means of a draught fan, fed through a bag filter to remove any entrained dust and emitted into the environment through a chimney flue. The system of pipes for the exhaust air from the drum dryer is a comparatively simple arrangement as the air only has to be extracted from one point on the dryer casing.



Figure 2: View into a dryer drum with flame in the interior of the drum

The combustion gases are partially mixed with ambient air to obtain average drying air temperatures between 600 °C and 900 °C. For thermally insensitive materials (e.g. silica sand, slag), the flame can burn directly into the rotating drum (Figure 2). For the drying of temperature-sensitive materials (limestone, clay, bentonite, recycled plastic or organic waste), firing chambers are used.

In general, rotary dryers have low specific heating-energy consumption if the process can be run with a high inlet-air temperature. Hence, a key feature is their extremely energy-efficient operation. High hot-gas temperatures result in low amounts of drying air and less heat losses by the exhaust.

All the above mentioned features gave rotary drums a renaissance in the industrial praxis at present.

### **Advantages of rotary drum dryers**

For a required application suppliers often promote their particular own technology no matter of rotary dryers, fluid bed dryers, flash dryers, paddle dryers or other. This has led to uncertainty among users selecting an optimal drying system.

Rotary drum dryers have multiple advantages in comparison to other drying technologies. As drum dryers are suitable for both, fine and coarse particle sizes, and for very coarse bulk materials as well, it is not necessarily imperative to adjust the amount of air into a drum dryer for a change of product. The material in the drum is transported by means of the rotation of the drum regardless of the air flow. As a result, drum dryers can be operated with high reliability.

A special advantage of drum dryers is that it is possible to adjust both the hot-gas inlet temperature and the amount of drying air in periods when a drying system designed for a specific throughput is operated for a long time at a significantly reduced performance. Reduction of the drying air amount makes it possible to keep the hot-gas temperature high, close to design value. As described above, this means that the low specific fuel consumption per ton of dried solid is maintained even when the dryer is not operating at its full rated power.

The specific electricity consumption of a drum dryer is relatively low. As the specific fuel consumption per ton of material to be dried increases if, due to a continuously low amount of material or low moisture content of the material, the drying system is not operated at the rated drying air temperature for which it was designed, rotary drum

dryers are characterized by the advantage that the control of the dryer can be done by the air mass flow rate and must not be done by the inlet drying air temperature.

### *Advantages of Drum Driers at a glance*

- Suitable both for coarse and fine solids
- Largely insensitive to coarse or heavy solids
- Low expenditure for the inlet air equipment
- Insensitive to changes in the particle size
- Insensitive to fluctuations in the moisture content and the mass flow rate
- Insensitive to cut-out of the drying air
- High drying air temperatures combined with low heat losses
- Low specific electrical energy requirement
- Constant specific heating energy requirement even at only partial loads
- Straightforward installation and quick commissioning
- Tolerance to operating faults
- Very rugged and thick-walled equipment with long life-time
- Moderate wear and low spare parts requirement

However some disadvantages of rotary drum dryers should not be neglected.

### *Drum Dryer Disadvantages*

- Requirement of heavy equipment (thick-walled design of the drum)
- The design of the internal fittings requires many years of experience.
- Solid materials are only partially de-dusted during drying.
- Counter-flow applications are limited to coarse-grained materials

### **Selection criteria for the use of dryers in the process industry**

For practical applications the decision must be done on the basis of a couple of main criteria which are of particular importance to the client.

Selection criteria from which a decision in favor of rotary drum dryers can be taken [1, 2] are summarized by the below listing:

- Wide range of material from fine to very coarse
- Non-uniform particle distribution
- Non-uniform solids quality
- Non-sensitive product against heat
- Use of direct gas or oil burners required
- Fast load changes to be expected
- Mild Steel application sufficient
- No space for a complex supplied inlet air system available
- Outdoor installation required

### **Energetic and geometrical design of rotary drum dryers**

Due to the scarcity of resources and increasing price of energy an even more efficient design and operation of dryers becomes more and more important.

The design of a rotary drum dryer is traditionally done by means of a thermal balance for the energetic design of the dryer and by the use of empirical models that are based on the specific water evaporation capacity  $\omega$  for the geometrical design. By a thermal balance in the first step operating parameters as temperatures of gases and solids, air flow velocity, burner power and bulk material mass flow and the temperature of the hot heating gases are calculated.

The latter inlet drying air temperature is used to estimate the corresponding specific water evaporation capacity  $\omega$  of the dryer that is used to determine the required inner volume of a drying drum. It is known for decades that the value  $\omega$  shows a good correlation to the heating gas temperature and, moreover, to other key determinants as the moisture content of the wet solids or the temperature of the exhaust air gases and the hot product temperature. [3, 4]

In literature the latter determinants are often neglected although they have a great impact on drying characteristics and the resulting drum size. In numerous experiments carried out [5, 6], the drying characteristics of various products that mainly carries surface moisture and those products, that carry inner moisture as well, were investigated. Different grain size ranges, moisture contents and alternating wet material mass flow, exhaust air temperature and dried product temperature were tested.

### ***Thermal balance***

In figure 3 the measuring points of temperatures, air flow velocity  $v_{a,mix}$  and burner power  $P_B$  at a semi-industrial test plant in the Allgaier test center are shown. At the beginning of the process wet product is entering the drum with a mass flow of  $\dot{m}_{p,r}$  at a temperature  $t_{p,r,f}$  and moisture content  $x_{p,r,f}$ . This material gets in contact with the burner flame and hot gases  $t_e$  that are obtained by burning gas. The power of the burner  $P_B$  is measured by means of a gas meter. Besides the hot gases and the wet material, ambient air at a temperature of  $t_{amb}$  is entering the process. The total air mass flow is described by  $\dot{m}_L$ . In the drum dryer the material is dried and heated up to a temperature of  $t_{p,tr}$  and a residual moisture content of  $x_{p,tr}$ . In accordance to this during drying the air is cooled down to  $t_{a,real}$  and its humidity rises. At the outlet of the drying drum there are unavoidable leakages so that the drying air at a temperature of  $t_{a,real}$  gets mixed with ambient air at a temperature of  $t_{amb}$ . The resulting exhaust air temperature  $t_{a,mix}$  and the air flow velocity  $v_{a,mix}$  are measured in the exhaust air duct.

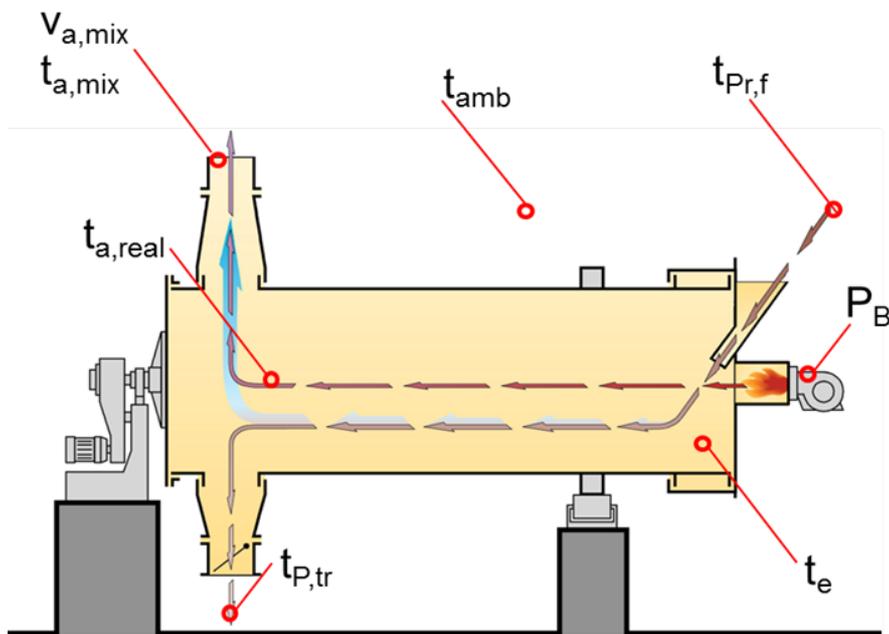


Figure 3: Scheme of the semi-industrial test plant TT 20 /4 at Allgaier in Uhingen.

These parameters are entered in equations (1), (2) and (3), where  $\dot{Q}_{\text{tot}}$  is the total thermal heat input that is required for the drying process. It should be noted that these equations are simplified:  $h_{1+x}$  represents the enthalpy of humid air,  $h_{p_r}$  represents the enthalpy of the solids,  $\dot{Q}_r$  the thermal radiation losses and  $\dot{m}_{L,L}$  the leakage air mass flow. As a result the hot inlet gas temperature  $t_e$  is calculated, which cannot get measured directly due to irregularities in the flow of flue gases and ambient air and the mixing of both.

$$\dot{Q}_{\text{tot}} = \dot{m}_L [(h_{1+x})_a - (h_{1+x})_e] + \dot{m}_{p_r} (h_{p_r,a} - h_{p_r,e}) + \dot{m}_{L,L} c_{p,L} (t_{a,\text{mix}} - t_{\text{amb}}) + \dot{Q}_r \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{\text{tot}} = \dot{m}_L c_{p,L} (t_e - t_{a,\text{real}}) \quad (2)$$

$$P_B = \dot{m}_L c_{p,L} (t_e - t_{\text{amb}}) \quad (3)$$

### ***Tests and results***

Within all tests wet sand and some other products with inner moisture were dried to a residual moisture content  $x_{p,\text{tr}}$ . Unnecessary overheating of the solids was generally avoided which means that the drying process works in the most efficient way.

In a first test period drying of natural sand with three different grain size ranges (0.1 mm to 0.4 mm, 0.4 to 1.0 mm and 1.0 mm to 2.0 mm) was investigated in the rotary drum dryer in order to find out whether there is an impact of the grain size range on the specific water evaporation capacity  $\omega$ . In figure 4 exemplary silica sand and its appearance is shown.



Figure 4: Silica sand with three grain size ranges.

The tests were carried out at inlet moisture  $x_{Pr,f}$  of 4 % and 8 %. The mass flow was varied during the tests and it was found that the impact of the grain size is negligible for products with surface moisture only.

In total, together with the first test row, 72 experiments were carried out. Figure 5 contains an excerpt of these tests. While the black line “before” shows the presently known evaporation capacities, Figure 5 shows and explains the general behavior of sand (grain size 0.4 ... 2.0 mm) at different moisture contents. The measurement point with the highest water evaporation capacity is characterized by the maximum conveying capacity of the dryer. It might be seen that the water evaporation capacity of sand at a moisture content of 4 % (red squares) is significantly higher than the values at a moisture content of 2 %. It follows logically that an increase of the feed moisture content to 8 % (blue diamonds) leads to a higher specific water evaporation capacity.

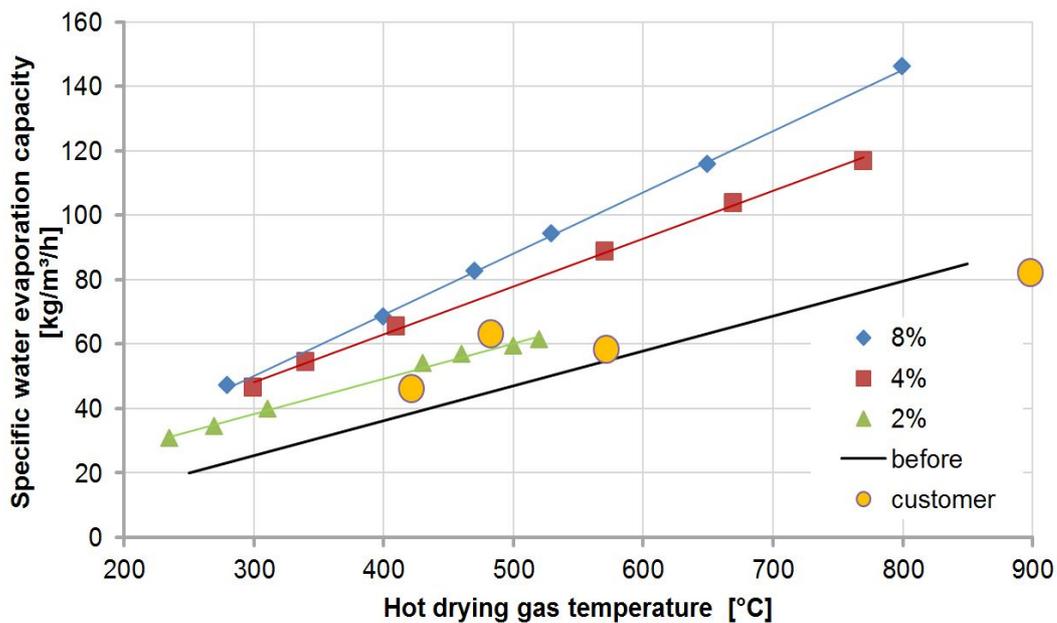


Figure 5: Specific water evaporation capacity  $\omega$  vs. heating gas temperature  $t_e$  in sand drying and results from customer's plants. [6]

For both, red squares and blue diamonds, the limiting factor was also the conveying capacity of the present drying drums. It is significantly higher than the limit at a moisture content of 2 % since the mass flow needed to reach a high specific water evaporation capacity is lower.

Moreover high moisture contents of silica sand are not usual and so the impact of moisture contents higher than 4 % have been neglected in the past.

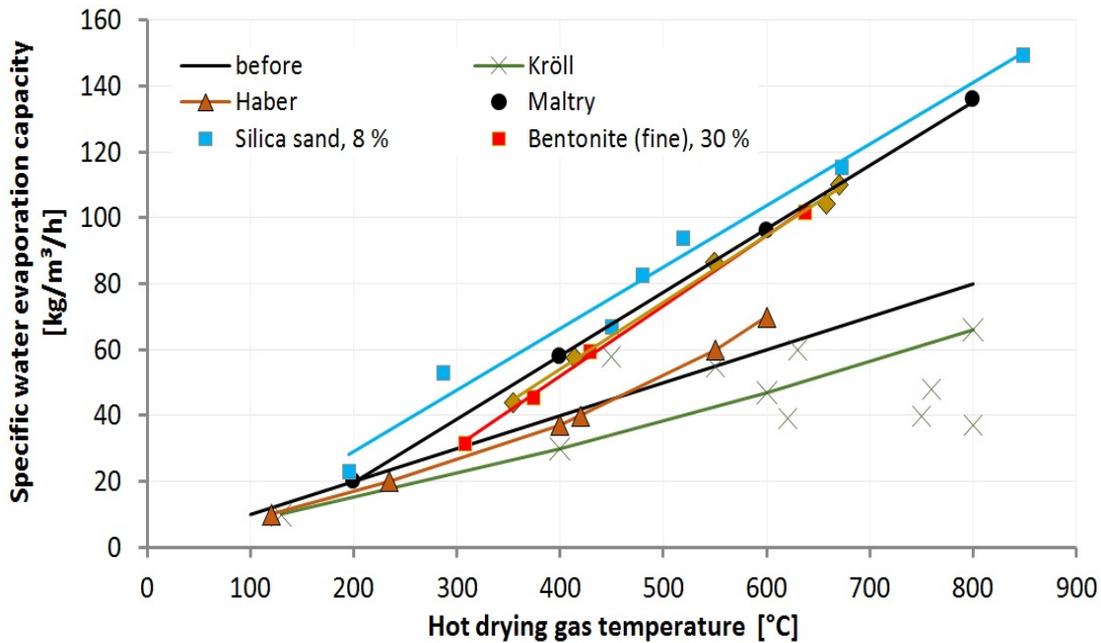


Figure 6: Specific water evaporation capacity  $\omega$  vs. hot drying gas temperature  $t_c$  .[5]

Further to the tests with sand additional tests with pumice and with bentonite as exemplary products with inner moisture were carried out. The same procedure to measure the maximum drying capacity and to calculate the specific water evaporation capacity per volume of the dryer was used. As for the sand, higher values of the specific water evaporation capacity  $\omega$  for the solids with inner moisture was established than found in literature (Figure 6). The black line “before” represents the presently used evaporation rates.

### *Tests at industrial plants*

The laboratory tests were carried out at conditions that usually do not exist in praxis: constant mass flow, constant moisture content of silica sand etc. However, the mass flow of material and its moisture content vary significantly in everyday praxis operation mode. In order to show the opportunities and limits of the new empirical correlation to design rotary drum dryers, the authors [5, 6] investigated existing industrial drying plants in everyday operation. Results from three different customer’s drying plants are presented in figure 5 as well.

The two spots marked with 1) show two different operation modes of a rotary drum dryer (type: Allgaier TT 90/6,5) that dries silica sand with a grain size of about 4 mm and a moisture content of 7 %. The dried silica sand that leaves the dryer at the outlet is

completely dry (“technically zero” moisture). As it can be seen in figure 5 both measurement points are significantly below the maximum possible specific water evaporation capacity. Normally the dryer should be able to operate close to the red or blue line. The operation mode of the left of those two points ( $t_e = 420$  °C) is characterized by an too high air stream that is sucked trough the drying drum. Hence, the temperature of the heating gases  $t_e$  is rather low and the drying plant is operated in an inefficient way. On account of reducing the air flow by a reduction of the exhaust air fan power and an increase of the mass flow the operating point moves to a higher water evaporation capacity at higher inlet gas temperature. So the efficiency of the drying plant was significantly increased. The analyzed dryer’s operation is still not perfect since the temperature  $t_e$  and the water evaporation capacity could be further increased theoretically. However, this is not possible because the dew point was already very high in this special case and a further increase of the water load of the exhaust air would lead to water condensation in the exhaust air duct.

Another drying plant (marker: 2 at figure 5), type: Allgaier TT 120/9,5) is run at the original design point. Silica sand with a grain size of 0,1 – 2 mm is dried from a moisture content of 6 % to 0 %. This plant could be run with a higher wet material stream in order to increase the drying efficiency and capacity.

The third plant (marker: 3 at figure 5), type: Allgaier TT 120/11) is operated at a rather high hot gas temperature of 900 °C. The specific water evaporation capacity is lower than designed. In this case it was easily possible to recognize by just measuring temperatures, powers and mass flows (cf. figure 3), that there must be a technical problem at the specific plant. The problem was an erroneous control of the exhaust air fan. This leads to a high drying air stream in the drum.

### ***Conclusions***

In a semi-industrial laboratory rotary drum dryer several experiments with silica sand, pumice and bentonite were carried out. It was shown that for products with only surface moisture common grains (particle sizes 0.4 ... 2.0 mm) have no practical impact on the drying behavior. With the help of a thermal balance and the measurement of the moisture content and mass flow of the solids at the entrance and the outlet of the rotary drum dryer a relation between the heating gas temperature  $t_e$  and the specific water evaporation capacity  $\omega$  was established and compared with data from literature [3, 4].

The specific water evaporation capacity increases significantly with the increase of the moisture content of the solids. At moisture contents of 8 % a maximum of the specific water evaporation capacity is reached and a further increase of the moisture content does not lead to higher specific water evaporation capacities. The specific water evaporation capacity in modern rotary dryers for various specific cases was found up to 60 % higher than usual values in literature. With these results rotary drum dryers can be designed more compact today and at the same time more efficient.

As a side effect it was found that the method can be used as a service tool to decide easily whether there are any severe errors in the operation of existing industrial plants.

### **Combined drying and cooling in rotary drums**

After drying, the heated product must often get cooled. Cooling is necessary because of subsequent processing steps such as conveying, screening, storing, mixing or packing, which permit specific maximum material temperatures. Cooling is also required if temperature-sensitive additives are to be added to the dried solid, e.g. certain resins, for the manufacture of high-quality "ready mix" materials from sand for instance. As the equipment costs and energy costs are related to the technological design, cooling should only be undertaken to the actual temperature required. For applications in the construction material industry, this temperature is often approx. 55 °C to 60 °C and less frequently approx. 40 °C to 45 °C.



Figure 7: Rotary drums for combined drying and cooling of sand

### ***Drying and cooling in double shell rotary drums***

While drying and cooling was done in separate drums in the past, combined drying and cooling in one rotary drum of special design is a well-established technology at present. Best known are the double-shell rotary drums of brand name MOZER® TK. Hundreds of applications can be found in the worldwide minerals and building materials industry for drying and cooling mainly of sand and crushed lime stone. Examples are shown by figure 7. While drying takes place in the inner tube of the drum with parallel flow of the solid product and drying gas, cooling is done in the outer shell using ambient air in counter flow to the dry and hot product to be cooled. The working principle of combined double shell dryers/coolers are shown by figure 8.

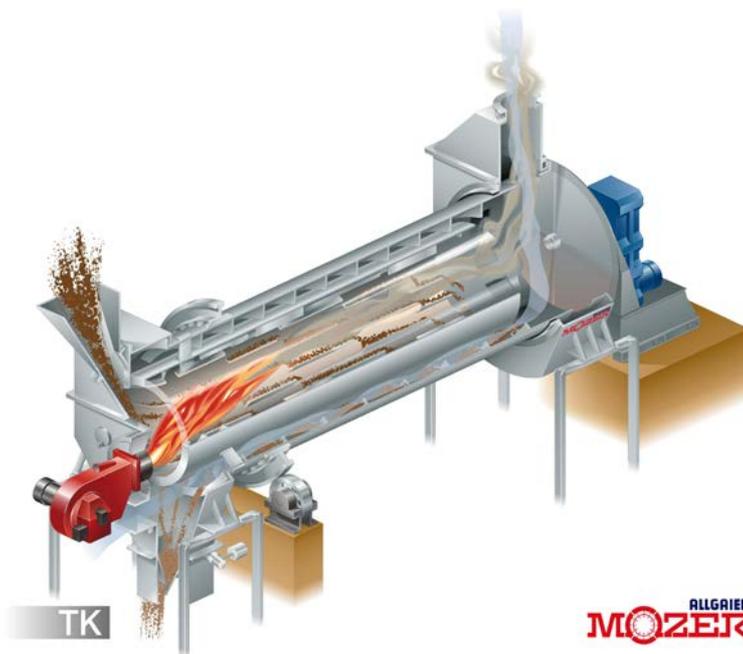
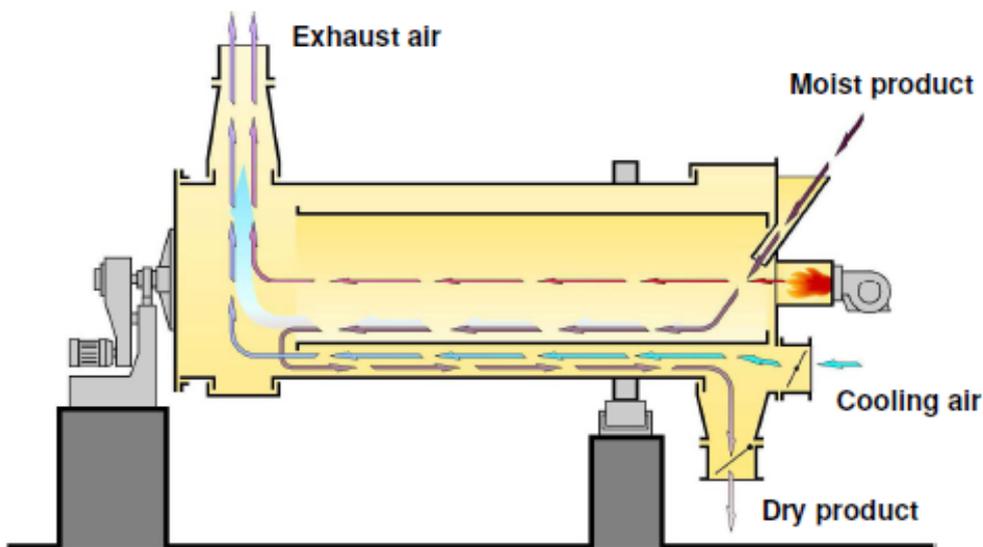


Figure 8: 2D and 3D principle drawing of a drum dryer system TK with air cooling

An advantage of the system is the compact design of short length and the possibility to drive the drum directly by a front mounted gear motor, one barrel ring and one pair of rollers only. The wet feed product inlet and the dry product outlet at the same side of the plant can be advantageous, when optional solid by-passing of the dryer/cooler is required for instance.

Since the hot inner drum gets in contact with the dried solid to be cooled, the cooling efficiency of the system is limited to final product temperatures of about 55 °C to 60 °C depending on the ambient conditions. However those cooling temperatures are sufficient in most cases of the minerals industry.

### ***Drying and cooling in single shell rotary drums***

In some cases, lower temperatures near the ambient (30 °C to 45 °C for instance) are required for the dried output materials. Adding the option of cooling to particularly low solid temperatures and efficient heat recovery with the resulting energy savings makes the TK-D Series a welcome complement to the TK double shell dryers/coolers.

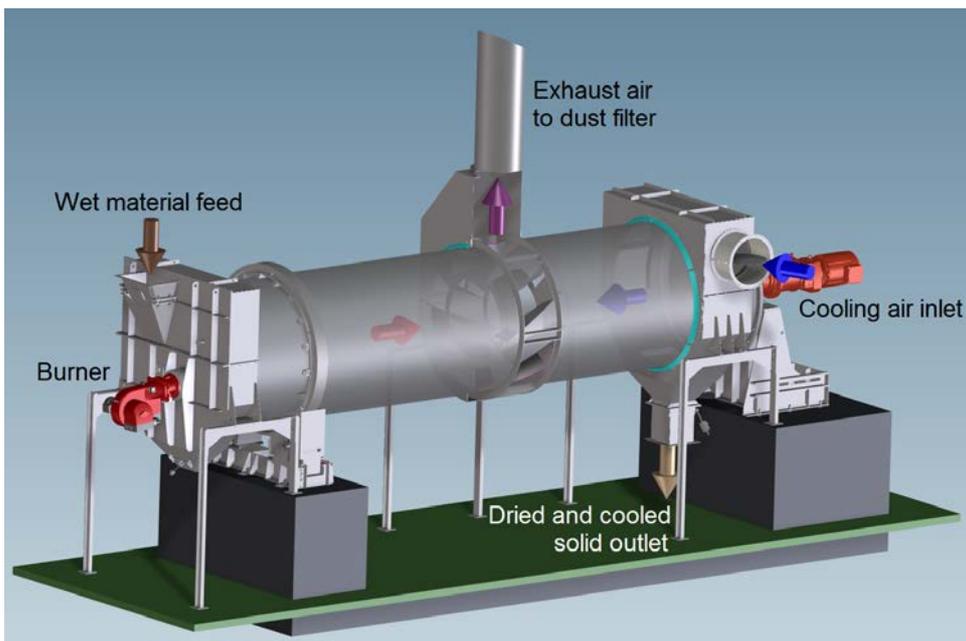


Figure 9: Rotary drum dryer system TK-D with countercurrent air cooling

In contrast to the double-shell TK drying/cooling drum, the TK-D is a single-shell drum, which has no contact points between the solid to get cooled and any hot inner drum surface in the entry area of the dryer. The dried solid is passed by a specially designed solid transfer compartment from the drying zone to the cooling zone, where the solids gets cooled by a countercurrent flow of ambient air (Figure 9). Thanks to this

design, the TK-D drying/cooling drum outputs low-temperature dried solids approaching ambient air temperature used. In standard applications the both exhaust air streams from the drying and from the cooling compartment are draught from the transfer compartment through a single chamber bag filter by the exhaust air fan (Figure 10).

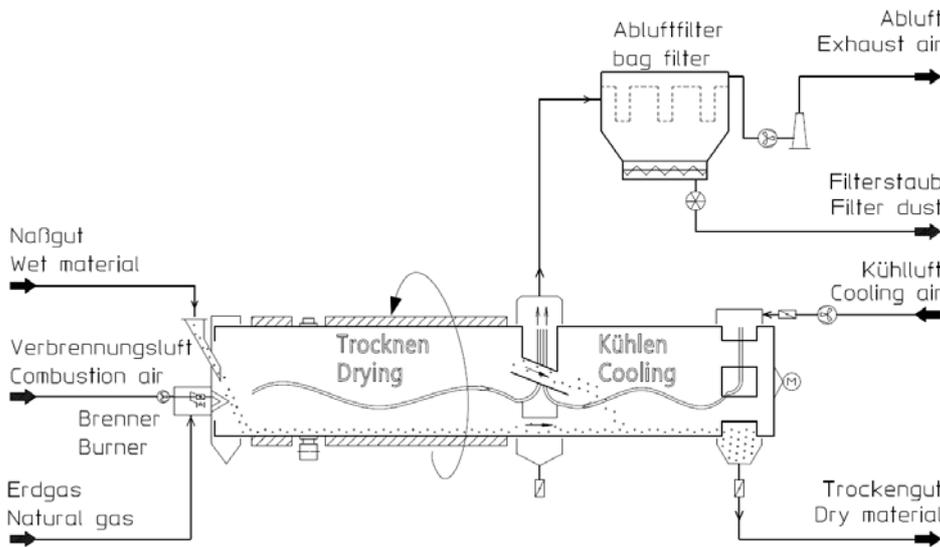


Figure 10: Single extraction of the exhaust air streams at TK-D

With a two-part configuration of the central transfer compartment, exhaust air streams from the drying zone and from the cooling zone can be individually extracted and de-dusted. While the moisture-laden dryer exhaust air is de-dusted and released to the atmosphere, the warm, dry and de-dusted cooling exhaust air can be returned to the process as preheated drying air resulting in heat recovery from the dry, warm solid (Figure 11). This provides savings of the primary heating energy such as gas or oil up to 10 %.

The separate supply and exhaust of the gas streams additionally allow different processing possibilities for the solid and the gas (air):

- Co-current flow or counter-current flow drying, independent of one another, can be combined with
- Counter-current flow or co-current flow cooling

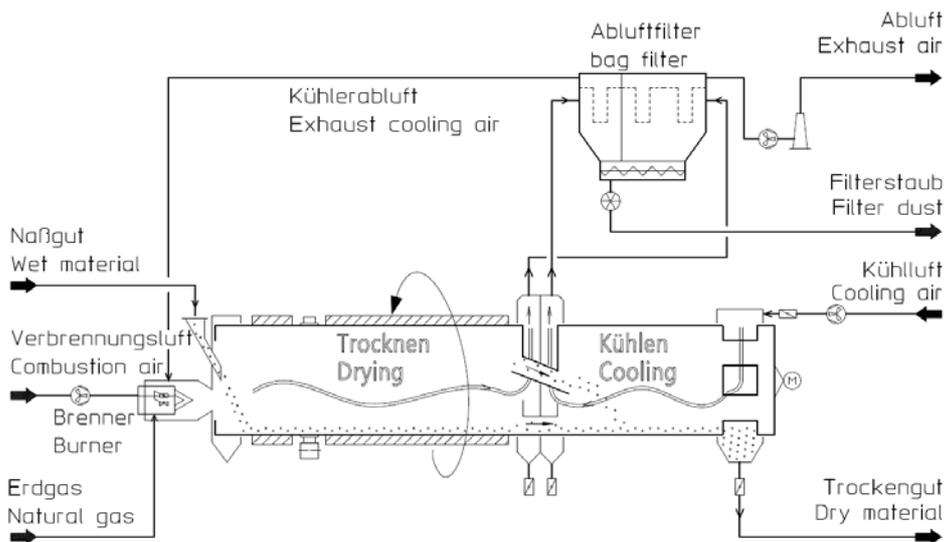


Figure 11: Separated extraction of the exhaust air and heat recovery

The use of counter-current flow routing of the air and the stream of solids allows a particularly efficient high-temperature process for e.g. calcining of solids immediately followed by cooling. The heating zone can be configured and optimized completely independently of the cooling zone.

#### ***Evaporative cooling in TK+***

In times of rising energy prices, the efficient usage of resources is an important method of increasing cost-effectiveness and the competitiveness of production. Because thermal drying requires up to ten times more energy compared to purely mechanical water removal, there is particular interest in using drying systems that are as energy-efficient as possible. In addition to the above described methods, evaporative cooling is another method to reduce the energy consumption. Progress towards this issue is supported by Allgaier's MOZER<sup>®</sup> TK+ technology [7]. It is mainly used for products with surface moisture only. The combined drying and cooling drum system TK+ offers a concept that effectively cools the dried sand by means of evaporative cooling and leads to a fuel-saving of up to 15 %.

While in the majority of cases, cooling of the hot sand is undertaken using dry ambient air, during evaporative cooling, cooling of the solids is done by evaporation residual portions of remaining moisture from the particles. Thus instead of exchange of measurable or "sensible" heat between air and material, evaporative cooling is the cooling of the material using "latent" heat, which is the heat of evaporation or vaporization of the water. Theoretically, cooling to the "wet bulb temperature" in

accordance with the psychrometric principle is possible. As a consequence, the advantage of evaporative cooling is, that energy is saved during drying by using the residual heat in the material while the product is also cooled simultaneously.

On the TK+ system, a primary flow of about 85 % to 90 % of the moist sand is dried in the inner tube of the double shell dryer/cooler. After the drying in the inner tube, the remaining sub-flow of moist sand is applied to the system in a controlled manner. The hot dried product is mixed with the cold product that has not yet been dried, referenced as "bypass product" (Figure 12).

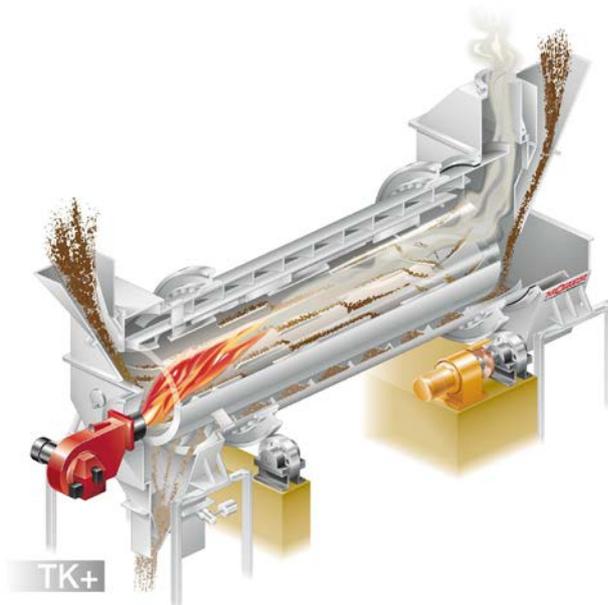
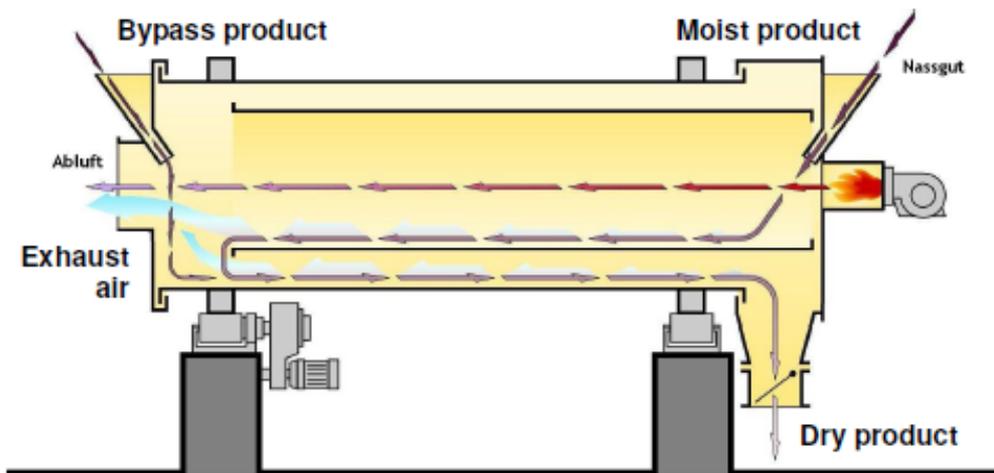


Figure 12: 2D and 3D principle drawing of a drum dryer system TK+ with bypass feed and evaporative cooling

The hot dry product from the inner drum and the bypass product are intensively mixed in the outer drum by lifting plates. The combined material is conveyed against a very small flow of cooler ambient air. During this process, the water contained in the bypass material evaporates, while at the same time the hot product is cooled by the effect of evaporative cooling.

A proportionally smaller amount, 85 % to 90 %, of fuel (natural gas, light heating oil, liquefied petroleum gas) is required to dry the reduced main flow of moist sand. Also, the quantity of cooling air required is reduced due to the effect of evaporative cooling. As a consequence, system TK+ requires significantly smaller draught air fans and bag filter plants. In addition to the reduction in the amount of fuel required, there is also a reduction in the consumption of electrical energy. It is also possible to convert the standard TK system to the TK+ system without the need to modify or replace the existing dust removal plant.

#### ***Study confirms energy saving due to evaporative cooling***

Many years of experience and sophisticated calculation programs make it possible to calculate the effects described above. Therefore, it is possible to tailor the plants to be delivered to each customer. An intensive study has been undertaken on a total of eleven plants supplied by Allgaier to verify whether the actual plant operations confirm the predicted energy consumption [8]. All available process and consumption parameters are measured with plants being able to supply information for several years in some cases. Both MOZER<sup>®</sup> TK system dryer/coolers and also TK+ system plants were studied. Comparative assessments of the parameters, determined using the existing design programs and the values measured on the plants, have shown close agreement with the original theoretical plant design. The study confirms that fuel savings of between 10 % and 15 % can be achieved with the aid of evaporative cooling on the usage of the TK+ system plants. It has also been confirmed that the electrical power consumption on TK+ plants with evaporative cooling is almost halved, due to the reduced amounts of waste air. Figure 13 shows the different fuel costs in absolute and relative terms (referred to a TK+ and 4 % sand moisture content) on the TK and TK+ systems with example sand moisture contents of 4 %, 5 % and 6 %.

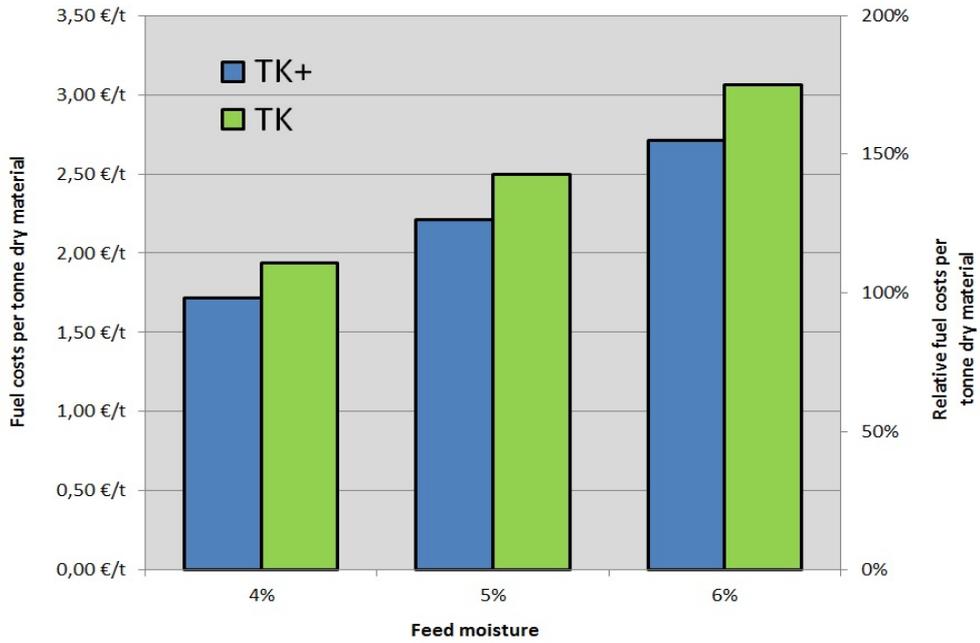


Figure 13: Comparison of fuel costs per metric ton of dry material in TK and TK+ at different solid's feed moistures. [8]

Figure 14 shows the electricity costs for both systems, resulting from the different amounts of air (shown in absolute and relative terms referred to a TK+ and 4 % sand moisture content).

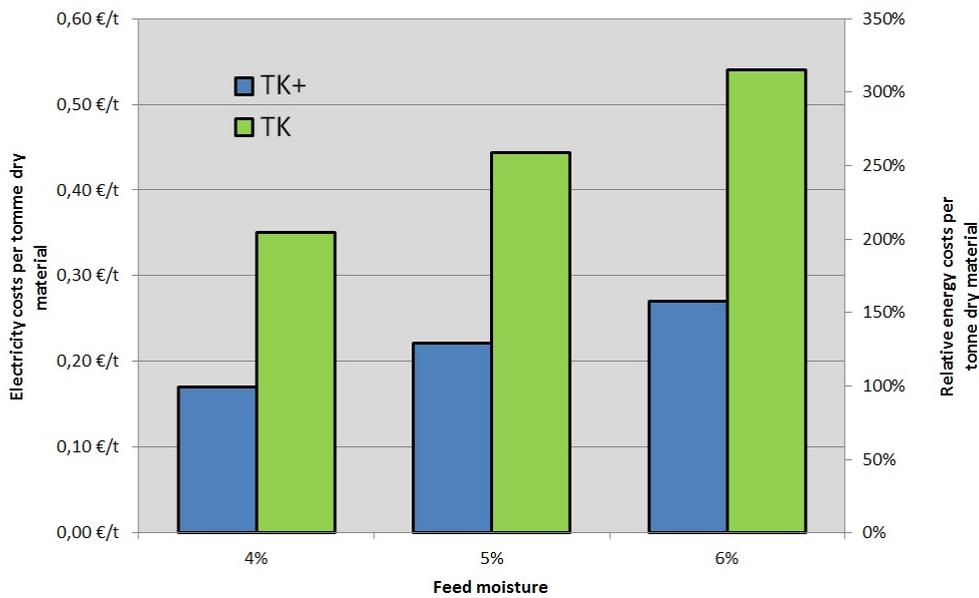


Figure 14: Comparison of electricity costs per metric ton of dry material in TK and TK+ at different solid's feed moistures. [8]

Figure 15 shows the mean total energy costs for drying one metric ton of sand based on the example of an initial sand moisture content of 5 %.

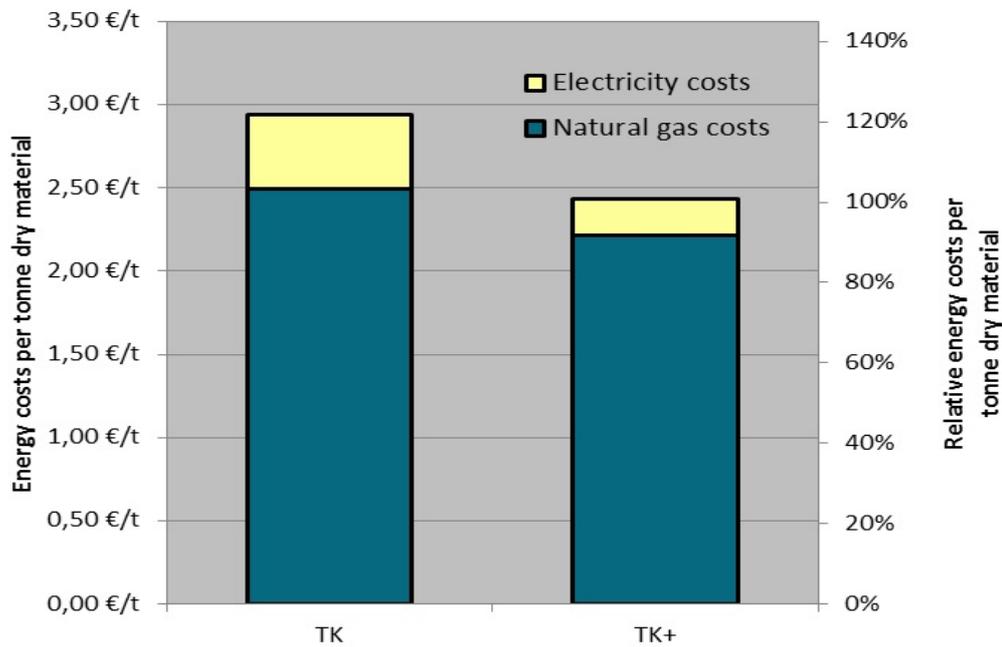


Figure 15: Total energy costs per metric ton in TK and TK+ at solid's feed moistures of 5%. [8]

It therefore becomes clear that the potential savings with a system TK+ drying-cooling drum are dependent on the sand moisture content. Higher sand moisture content increases the advantages of a TK+. However, it should be generally noted to start drying with the lowest possible sand moisture content. The initial sand moisture content can be influenced, e.g., by storage of the sand at a pile for several days for natural water drainage or by roofing the storage facility and the resulting protection against the rain.

***Evaporative cooling or air cooling?***

A decision as to which of the available dryer-cooler systems is optimal for a specific task must be made depending on several factors on case-by-case basis. An amortization calculation can be used to show which system is optimal for the related application. A drying plant based on the drying-cooling drum TK+ requires greater expenditure for the controlled feed of the main flow of moist sand and dosing the bypass flow. Several technical variants are available for this controlled moist material dosing. It is possible to use matched bucket conveyors, belt conveyors or a solution with a controlled material

gate. The additional expense for the material feed, the mature electronic control program and the higher process-equipment related expenses for the manufacture of the combined drying-cooling drum TK+ result in a somewhat higher plant price for the TK+ systems compared to the standard TK systems. In general, the fixed investment costs of a technology diminish proportionally with increasing overall plant size. As the additional expense for the detailed aspects of a TK+ also reduce relative to plant size with increasing plant size, the additional costs for a system TK+ drying-cooling plant have less impact at higher capacities.

Figure 16 shows as an example the procurement costs for both systems normalized to a system TK plant with a dry product mass flow of 15 t/h.

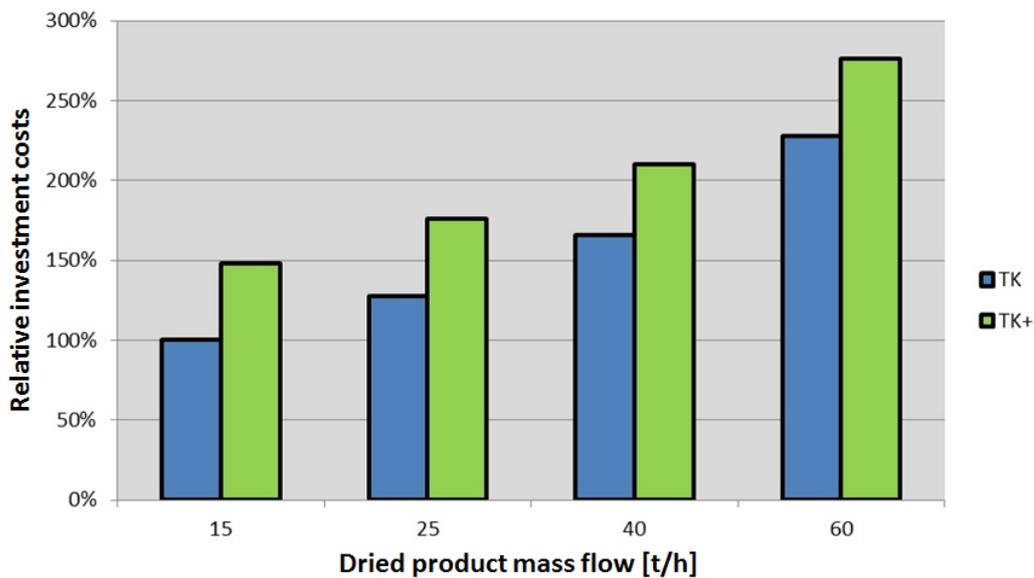


Figure 16: Relative investment costs versus dry product mass flow. [8]

Due to the significantly lower energy costs (fuel costs + costs for electrical energy) on the usage of evaporative cooling, the additional costs for the bypass flow distribution and the control of TK+ plant can be generally amortized after 5000 to 8000 operating hours. The amortization periods shown in Figure 17 were calculated using German energy prices from 2013. If energy costs as expected continue to increase in relation to labor and material costs, the amortization period will reduce further.

Particularly on plants with high throughput and high initial moisture content, it is worthwhile to use energy-saving technologies like that of the MOZER<sup>®</sup> TK+ system. However, it is to be noted that low sand moisture content reduces the absolute

investment and energy costs for any drying plant. Hence the above statement should not be misunderstood; that any mechanical pre-drying or dewatering of wet products will always be reasonable, if that is possible.

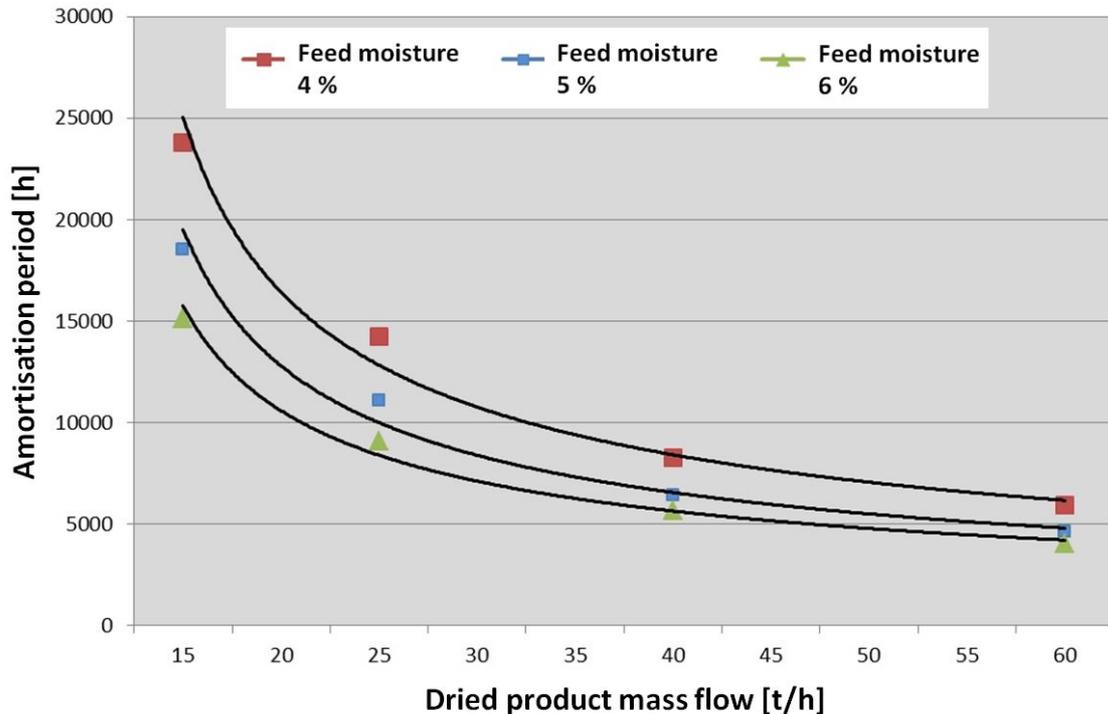


Figure 17: Amortization periods versus dry material throughput at different solid feed moistures. [8]

### Rotary driers for drying seriously abrasive products

Rotary driers can also be used for very robust applications such as abrasive products which might cause significant wear to the dryer's body and the blades and vanes inside. An interesting example is the drying of glass waste prior to color sorting [9]. Today, glass waste is a major secondary raw material. In fact, the glass industry can use it as cullet to make new glass products while simultaneously reducing the energy consumption levels of glass melting furnaces. Reduction in the molten glass temperature when using recycled glass allows the energy costs of glass production to be reduced considerably. Each 10 % of recycled glass used as a raw material in the molten glass represents an energy saving of about 2 %. The requirements on achieved glass quality have risen significantly over recent years in the business of preparing recycled

glass. Higher and higher recycling rates are being achieved in the molten glass used for producing bottles, while a low scrap rate continues to be demanded. Therefore, efficient and high-performance sorting systems are required for glass processing and color sorting. Today, modern color sorting systems are able to separate individual particle sizes as small as 2.5 mm effectively – however only if the raw material is provided in dry and clean condition. Additionally, the recycled glass contains other disruptive substances such as ceramics, stones, porcelain (CSP), corks, plastics, metal caps and adhesive labels, as well as all other kinds of rubbish. Recycled glass is predominantly stored outdoors, therefore greater or smaller amounts of water also get into the outdoor storage facility depending on the season and the associated quantity of rain. As a result, recycled glass has a moisture content between 1 % and 6 %, which fluctuates throughout the year. In order to sort collected glass waste (bottles and glassware, as well as the contaminants and foreign matter they contain) with an optoelectronic color sorting system, such as an MSort for example, the wet raw material, which is also soiled and mixed with foreign matter, must first be dried and preferably simultaneously cleaned and de-labeled.



Figure 18: Rotary drying system for recycled glass

Drum dryers usually meet all the product-specific criteria for drying recycled glass, which explains why over recent years there have been more and more drum dryers

entering service for drying recycled glass. One side effect during the drying of recycled glass in drum dryers is the associated cleaning of the material by galling of the material during drying. An impressive example of product received from a rotary dryer (see figure 18) is shown by Figure 19.



Figure 19: Recycled glass < 10 mm before and after drying

The hot drying air is cooled down very quickly in the input area of the rotary dryer due to contact with the moist product, thereby minimizing the danger of deflagration of the organic components due to the burner flame. Nevertheless, the waste air pipe is equipped with a spark monitoring system and extinguishing device for safety's sake, in order to prevent the possibility of a fire in the waste air filter. External hot air generators are used if particularly high proportions of organic material are present in the contaminated raw glass. That way the very hot flue gases from the burner are mixed with ambient air to a rather homogeneous air flow of moderate inlet drying air temperatures. During the drying process, the glass is heated up to temperatures between 60 °C and 75 °C and dried to residual moistures between 0.5 % and 1 %.

### ***Wear protection***

Recycled glass is a very abrasive product, which explains why the materials used for its processing must be selected very carefully. Suitable design of the installed components allows the wear to be reduced. In order to extend the service life of dryers for glass processing, extra-thick walls are used in the drums. Areas where there is direct contact between glass and the apparatus wall are exposed to particularly high wear; therefore they are lined with wear protection plates. The wear protection plates may be designed to be bolted on so that they can be exchanged easily (see Figure 20).



Figure 20: Bolted-on components installed in a drum dryer

Attention is paid to avoiding the solid material from sliding on the lifting and guidance paddles, or else keeping this level of sliding low, and also care is taken to ensure that when the material falls it drops onto a bed of the dried solid material. All this makes it possible to achieve durable dryer solutions even for highly abrasive solids such as recycled glass.



Figure 21: Crossways installed components in the drum dryer

Recycled glass should be smashed up as little as possible during the preparation process, therefore the heights through which the glass falls at the transition points and within the dryer are minimized. As a result, drying drums for glass are optionally equipped with special crossways installed components. The crossways installed components (see Figure 21) achieve very good results with regard to retaining the particle size during the drying procedure.

### ***Combined cleaning and drying of recycled glass***

Cleaning and label removal can be significantly improved by a combined drying and cleaning drum dryer RTT, which combines both useful properties for glass processing [10]. For this purpose upstream the drying zone of the rotary drum a compartment of bigger drum diameter and consequently longer duration time for the glass is used. This patented technology involves the glass material to be cleaned being churned in a cleaning drum ahead of the drying compartment for up to 20 minutes without significant product damage (see figure 22 as a view into the cleaning zone of an RTT).



Figure 22: View into the cleaning compartment of a combined drying cleaning drum

The individual glass particles rub against each other due to the churning, at the same time as removing the adhering labels. This is deliberately done while the raw material is still damp and involves a long holding time, because numerous experiments done by the author et.al. have shown that this method achieves the best cleaning results.

## Flow Chart Cleaning- Drum- Dryer Type RTT D ZL OB K G

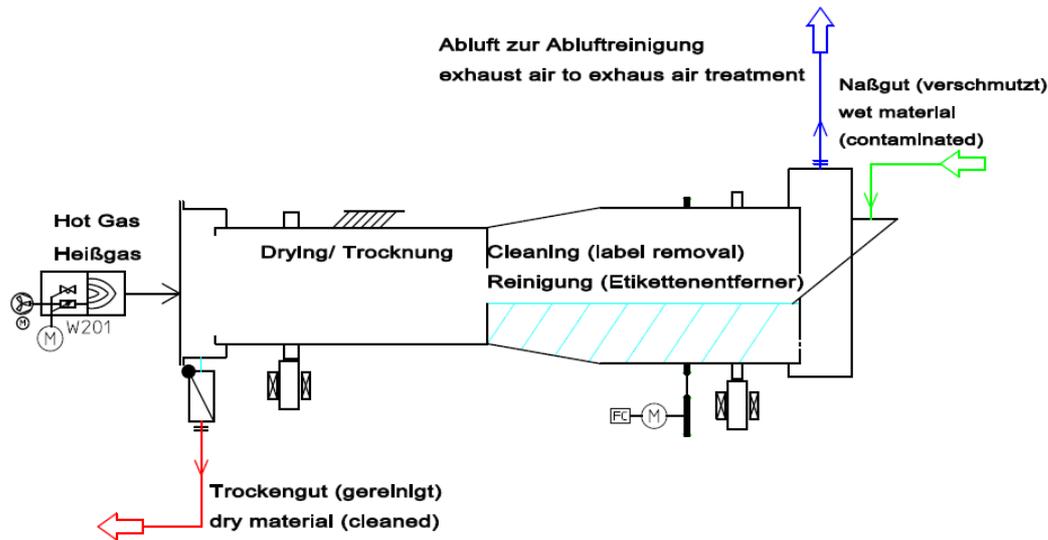


Figure 23: Process diagram of the cleaning drum dryer RTT

Following this, the cleaned glass material moves into the drying zone of the drum, where it is dried (Figure 23 shows a flow chart of the process). Drying glass cullet in the drum dryer offers the advantage that the necessary amount of energy is low and thus drying is very effective, both in the counter-flow and parallel-flow principles.

### Drying limestone and cleaning it without the use of water

A similar plant design is used by another unique technology for drying and subsequent cleaning of dirty limestone in a rotary drum [11, 12]. At many of the quarries used to mine limestone for the construction materials industry and for making fillers and pigments, the processing that follows yields screened stone with a size of 0 to 60 mm. In most open-pit mines in Europe at least, this stone has large amounts of loam silt and clay stuck to it as a result of the composition of the soil layers found above the corresponding limestone deposits. Until recently, this screened limestone required the use of expensive stone washers in order to be further processed into high-grade materials, and accordingly was often taken without any additional processing and used as low-grade screened stone for road building instead. In heavy frost or in arid regions with lack of processing water stone washing plants are limited in their usability. Moreover the use of stone washing plants requires costly sludge treatment, waste water removal and waste disposal.

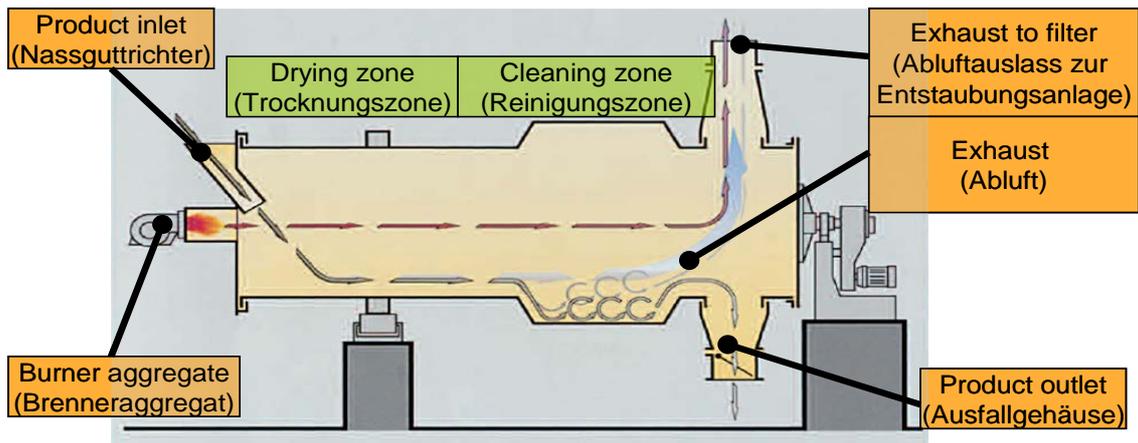


Figure 24: Scheme of system TRH for dry cleaning of stone

However, the very unique TRH drum dryer shown in figure 24 is a method that dry screens limestone and simultaneously free it from silt and clay without any need for water or expensive stone washer systems. As in the above described RTT system, the TRH system uses a drum compartment of increased diameter but with some special blades and vanes. In the TRH the cleaning compartment follows the drying compartment of very quick drying at increased temperatures. Loam and clay is loosened from the surfaces by the combination of quick drying and intensive attrition of the stones. The fines are removed from the dryer together with the exhaust air or can be separated from the good product by rather simple screening machines downstream the dryer.



Figure 25: Drying system TRH for screened limestone

In fact, the high-grade lime stone obtained with this method is of equal or even better quality to those obtained with the usual complex stone washer plants despite considerably lower capital costs, as well as significantly lower operating costs that result from not having to use water or deal with wastewater. In addition, the use of this system significantly reduces the amount of equipment and conveyor units needed while also requiring a lot less installation space.

Figure 26 shows an exemplary product sample received from the TRH (right) versus the dirty product fed to the plant (left).



Figure 26: Lime stone samples from before and after the dryer/cleaner TRH

The above mentioned advantages were proven by a study in cooperation with customers [13]. The efficiency of this innovative, technological solution was compared with stone washer systems with and without drying for the washed material. The results show clear advantages in terms of power consumption, capital costs, operating costs, and maintenance costs (Figure 27).

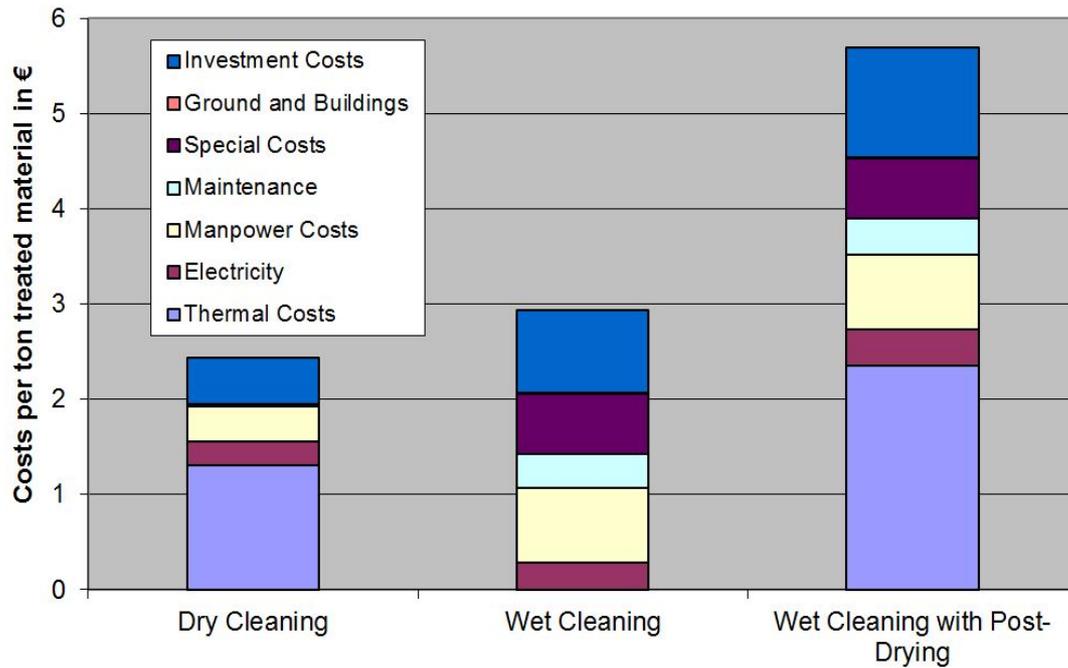


Figure 27: Processing costs of TRH versus costs of stone washing without and with subsequent drying. [13]

### Development of a new indirect rotating tube cooler for bulk materials

In many industrial cases, it is necessary to cool warm or hot product from drying. Particularly hot bulk materials from high temperature processes such as calcining, oxidation or combustion processes require a special cooling from temperatures of about 700 °C or even 1200 ... 1400 °C. Examples of products are pigments (for example, titanium dioxide), slags, metal oxides and hydroxides, cement clinker, sponge iron, scale, activated charcoal, catalysts and waste material from smelting plants. Further processing is often not possible without cooling products down to about 100 to 150 °C. In many cases, at least some thermal energy contained in the solids is to be recovered during the cooling that is necessary for engineering purposes. Besides using coolers with direct contact between ambient air and the material to be cooled, indirectly operated rotating tube coolers are also used with air or water. The term "indirect" means that the coolant does not come into direct contact with the hot product to be cooled. Instead, the heat is exchanged from the hot product to the coolant by way of a wall in the device that separates the media.

Indirect planetary rotary coolers of different designs using ambient air as coolant are known for decades [14].

A very efficient cooling technology is given by a rotating tube cooler that operates with water as coolant [15]. This new planetary cooler, named RK-W, provides many advantages over the previously known solutions. Figure 28 shows a three dimensional drawing of a cooler for an exemplary customer's project for cooling 40 tph metal oxide from 800 °C inlet to less than 150 °C outlet temperature.

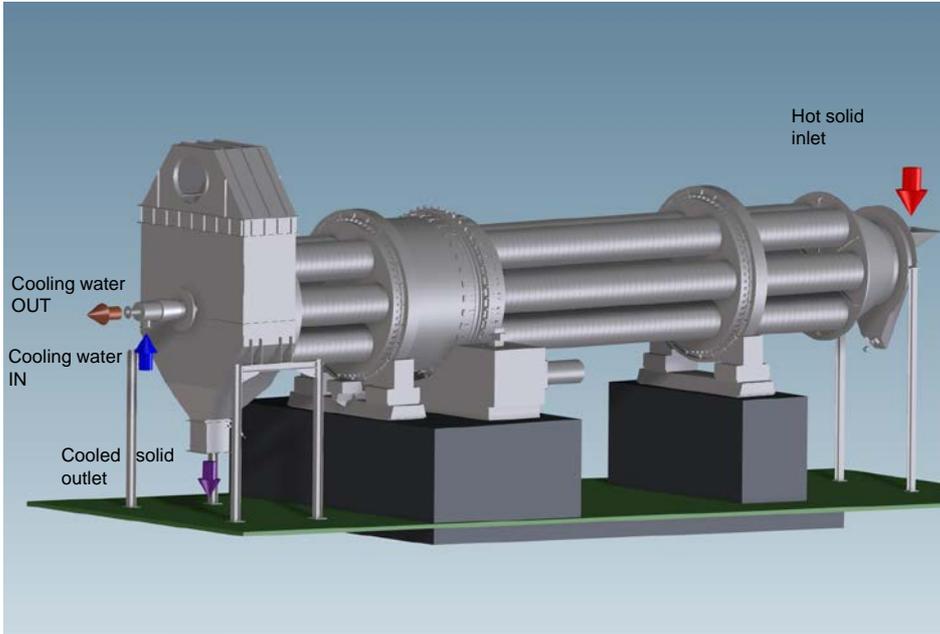


Figure 28: Indirect planetary rotary cooler for 40 tph solid

The cooler is built using several, for example, 6 or 8, double-walled tubes configured like planets with the cooling water flowing in the tube gap. This eliminates the necessity of using heavy and complex welded rotating drum housing as this was known from so-called Sectional Coolers proposed by BSH decades ago. In the latter coolers, pronounced thermal stresses may result in the material used because of the solid implementation that has little flexibility. These thermal stresses can result in material fracture and cracks in the welded structure.

However, the implementation of the new cooler results in a design that is tolerant to expansion by using commercially available tubes. This design led to a reduction of the weights and to a decrease in the welding work required during manufacture.

The structure of the new rotating tube cooler was optimized in terms of thermal stresses and service life using modern Finite Elements calculations (Figure 29).

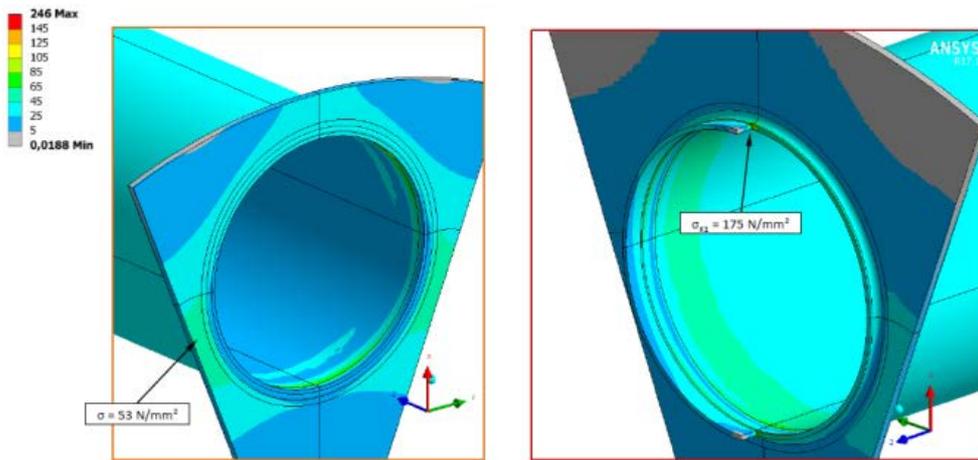


Figure 29: Results of FEM-calculation of the new cooler design

In the new cooler, all gaps of the double-walled tubes are completely filled with flowing water, which is not the case at the Sectional Coolers. This constantly cools all available heat exchanger surfaces carrying the hot product achieving an improvement in the cooling performance. The cooling water is supplied and removed by means of a sealed swivel joint and pipe connections running to and from the individual cooling tubes that carry the product and are designed as double-wall tubes. The hot solids introduced into the cooler move from the inlet to the outlet by means of the rotation and a slight slope of the cooler.



Figure 30: Batch laboratory cooler for determining the properties of bulk materials and heat transfer of real solids

To reliably design the processes, two laboratory test systems were built during the development period. Using these systems, it was possible to determine product-specific bulk material data and the heat transfer coefficients of real solids (Figure 30 and 31).



Figure 31: Test plant for continuous solids cooling

In cooperation with an external engineering office, DEM simulations were performed for a solids cooler using the bulk material and heat transfer properties of the real product determined during calibration tests. Calibration was done at a small rotating cylinder of 180 mm diameter and a solid filling of 2.5 kg metal oxide with bulk density of 2300 kg/m<sup>3</sup>. The front end and back side of the cylinder was made of transparent plastic material that the movement of the solid could be observed. The cylinder was driven at a rotational speed of 4.08 min<sup>-1</sup> (0,068 s<sup>-1</sup>) as an example. An angle of response of 33° was measured. By various DEM simulation procedures of this test equipment, corresponding parameters of the bulk characteristics have been examined to a particle-particle-friction coefficient of ff=0.4 and a rolling-friction coefficient of fr=0.2. Figure 32 show the profile of real product on the left side versus the result of the simulation on the right side with the use of the above mentioned friction coefficients for DEM simulation.

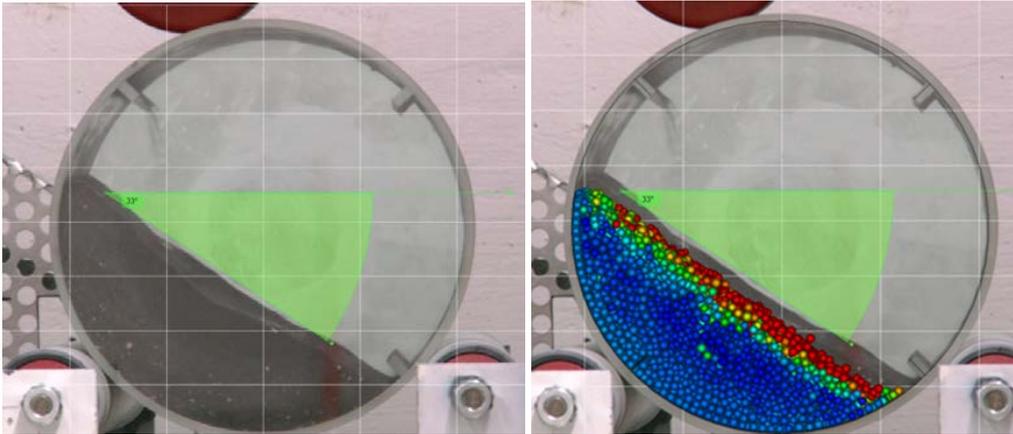


Figure 32: Results of calibration tests to determine bulk characteristics (Example: Zinc calcine, rotational speed  $4.08 \text{ min}^{-1}$ , angle of response  $33^\circ$ )

In the same way the parameters characterizing the thermal conductivity of the particles thCoP and the thermal conductivity of stainless steel thCoW were determined from the batch cooling experiments described above.

Finally with the elaborated calibration parameters, which show the characteristic of the real solid, full scale plant was simulated. Figure 33 shows the resulting solid temperature profile along the cooler length for a cooler of 10 m length, solid capacity of 40 tph Zink calcine with  $700^\circ\text{C}$  solid feed temperature.

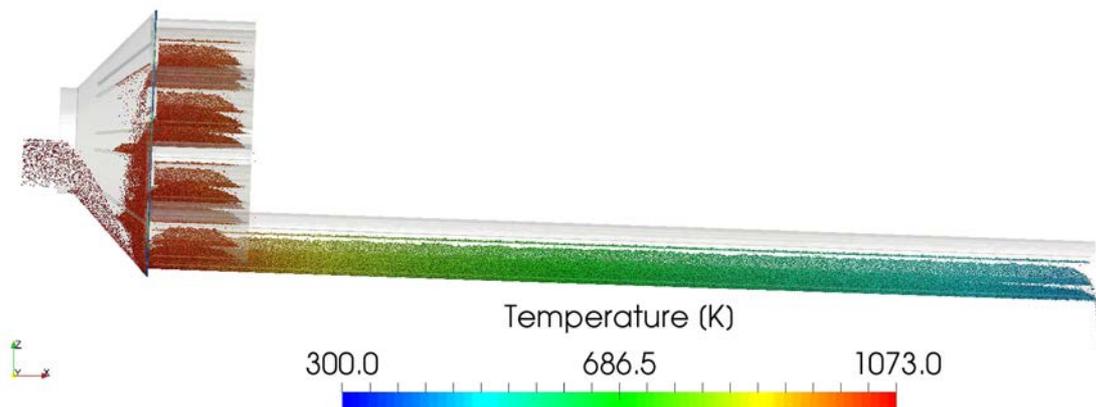


Figure 33: Results of a DEM-simulation of the rotary cooler (Zink calcine, 40 tph,  $700^\circ\text{C}$  inlet solid temperature)

By comparing the simulation results with thermal balances and heat transfer numbers to a traditional evaluation of Technical Center tests, it was possible to confirm the reproducibility of the results. Heat transfer coefficients between  $124$  to  $237 \text{ W/m}^2\text{K}$  for zinc calcine,  $120$  to  $208 \text{ W/m}^2\text{K}$  for silica sand and  $81$  to  $126 \text{ W/m}^2\text{K}$  for iron oxide were

examined. These results correspond with data from literature [16] exemplarily shown in figure 34.

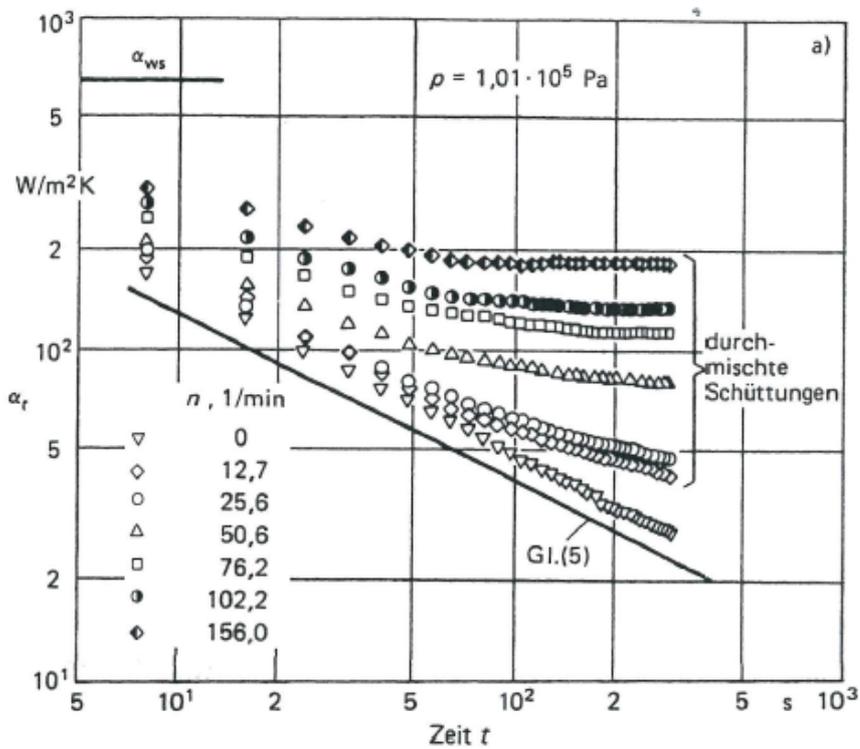


Figure 34: Heat transfer coefficients from a wall to mixed bulk materials, Data by Wunschmann [16]

In future as a result of the investigation, both continuous tests in the Allgaier Technical Center and the method of DEM simulation based on calibration tests for the properties of bulk materials and heat transfer of real products can be used to design a full scale cooler system.

### Summarization and perspective

As shown by the various examples, rotary drums for processing bulk material in general and for drying and cooling in special still become steadily improved. Experimental investigations about the value of the specific water evaporation capacity are described by the article in detail. New applications for the use of rotary drums are presented such as different methods for combined drying and cooling, drying of extremely abrasive solids like glass cullet, combined drying and label removing, dry lime stone cleaning or indirect cooling of very hot solids with water by a new planetary rotary cooler. Results from

experimental investigations at various full scale customer plants are presented, which show the praxis effects and give recommendations for end users. Finally an example for the use of modern simulation methods in the period of a development process is described by the example of a new indirect planetary rotary cooler.

However, the efficiency of rotary processes can always be improved. It is always a matter of long lasting experience and the use of modern calculation and design methods to find the right solution in the advantage of a client.

## Nomenclature

$f_f$		Particle-particle-friction coefficient for DEM simulation
$f_r$		Rolling-friction coefficient for DEM simulation
$h_{l+x}$	[J]	Enthalpy of humid air
$h_{Pr}$	[J]	Enthalpy of the solids
$\dot{m}_L$	[kg/s]	Total air mass flow rate
$\dot{m}_{LL}$	[kg/s]	Leakage air mass flow rate
$\dot{m}_{Pr}$	[kg/s]	Solid mass flow rate
$P_B$	[W]	Burner power
$\dot{Q}_r$	[W]	Losses by thermal radiation
$t_{amb}$	[K]	Ambient air temperature
$t_{a,mix}$	[K]	Resulting exhaust air temperature
$t_{a,real}$	[K]	Cooled drying air temperature
$t_e$	[K]	Hot inlet gas temperature
$thCoP$	[W/(m K)]	Thermal conductivity of the particles
$thCoW$	[W/(m K)]	Thermal conductivity of stainless steel
$t_{Pr,f}$	[K]	Solid feed temperature
$t_{P,tr}$	[K]	Solids product temperature
$v_{a,mix}$	[m/s]	Air flow velocity
$X_{Pr,f}$	[-]	Solid inlet moisture
$X_{P,tr}$	[-]	Residual solid moisture
$\omega$	[kg/(s m <sup>3</sup> )]	Specific water evaporation capacity

### Abbreviations

DEM	Discrete Element Method
RK-W	Indirect planetary rotary cooler
RTT	Combined drying and cleaning drum dryer
TK	Trocknen / Kühlen = Drying / Cooling
TRH	Dry cleaning of limestone

### Indices

amb	ambient
a,mix	air, mixed
a,real	real outlet
B	Burner
e	inlet
f	wet
L	Air
LL	Leakage air
Pr	Product
r	radiation
t	dry

### **References**

- [1] Trojosky, M. Selection criteria for the use of dryers in the mineral raw materials, chemical and recycling industries. Cement International 2009, 3, 58-68.
- [2] Trojosky, M. Auswahlkriterien für die Verwendung von Trocknern. Steinbruch und Sandgrube, 2009, 3.
- [3] Kröll, K. Die Vorgänge in Trocknungs- und Erwärmungstrommeln für rieselfähige Güter; Springer-Verlag: Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1950.
- [4] Maltry, W. Untersuchungen an Trommeltrocknern mit Kreuzeinbauten: Deutsche Agrartechnik, 1969
- [5] Ruoff, M. Experimentelle Untersuchung der spezifischen Wasserverdampfungsleistung im Innenraum von Trommeltrocknern. Bachelor Thesis, Allgaier Process Technology, 2017.
- [6] Kindler, A.; Ruoff, M.; Stölzner, G.; Trojosky, M. M. Specific water evaporation capacity of rotary drum dryers. Presented at 2<sup>nd</sup> Nordic Baltic Drying Conference NBDC, Hamburg, Germany, June 07-09, 2017.

- [7] Trojosky, M.; Roller, R.; Frey, M. Evaporative cooling as a method for reduction of the energy consumption on drying sand. *Cement International* 2015, 3, 56-60.
- [8] Frey, M. Vergleichende Ermittlung der Verbrauchswerte von ALLGAIER-Trocken-Kühl-Trommeln der Systeme MOZER® TK und TK+. Bachelor Thesis, Allgaier Process Technology, 2013.
- [9] Hesse, J.; Trojosky, M. Aufbereitung von Recyclingglas. *Schüttgut* 2012, 201, 8-10.
- [10] Trojosky, M.; Hesse, J.; Method and device for preparing broken glass. Patent WO 2011/054418 A1, September 23, 2010.
- [11] Trojosky, M.; Autenrieth, B.; Stölzner, G. Aufbereitung von Kalkstein-Siebschutt mittels einer kombinierten Trocken-Reinigungs-Trommel. *Aufbereitungstechnik* 2012, 3.
- [12] Trojosky, M. Processing of limestone screening debris by means of a combination of rotary dryer and cleaning drum from Allgaier. *Cement International* 2017, 3, 40-41.
- [13] Autenrieth, B. Untersuchungen zur trockenen Reinigung von Kalkstein mittels einer Trocken-Reinigungs-Trommel. Bachelor Thesis. Allgaier Process Technology, 2012.
- [14] Cooling hot bulk materials with indirect rotary drum coolers. Brochure, Allgaier Process Technology, 2016.
- [15] Trojosky, M. Entwicklung eines indirekten Drehrohrkühlers für Schüttgüter. Presented at Jahrestreffen ProcessNet-Fachgruppe "Trocknungstechnik", Halle-Merseburg, Germany, February 26-28, 2018.
- [16] VDI-Wärmeatlas, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf 1991, 1501, Bild 4, Mg 3