

**Магистрант Молбай А.А.**

ЕНУ им. Л. Н. Гумилева

## **Научно-исследовательский анализ эксергетической эффективности сушильной части бумагоделательной машины.**

Ключевые слова: бумагоделательная машина, эксергия, сушильная секция, сушильный цилиндр, нагревательная батарея

### **Введение**

Секция сушки бумагоделательной машины - это не только основная энергоемкая часть процесса производства бумаги, но и одна из основных секций, ограничивающих скорость, выход продукции и качество бумаги. Сушильная часть (наибольшая по длине) состоит из вращающихся, обогреваемых изнутри паром и расположенных обычно в 2 ряда в шахматном порядке цилиндров. Полотно прижимается к нагретой поверхности цилиндров при помощи сукон, улучшающих теплоотдачу и предотвращающих коробление и сморщивание поверхности бумаги при сушке. Полотно бумаги движется с верхнего цилиндра на нижний, затем на соседний верхний и т.д. При этом бумага высушивается до содержания остаточной влаги 5—7%. На современных Б. м. во второй половине сушильной части обычно помещают клеильный двухвальный пресс для поверхностной проклейки бумаги и нанесения поверхностного слоя. Сушильная часть некоторых Б. м. снабжена автоматическими регуляторами подачи пара в цилиндры, приспособлениями для автоматической заправки полотна бумаги на сушильные цилиндры и т.д. Пар собирается под колпаком, расположенным над всей сушильной частью Б. м., а затем отводится вытяжными вентиляторами наружу. Тепло используется в калориферах и теплообменниках. Принимая во внимание недостатки традиционной паровой сушилки, в этой статье представлен

анализ эксергетической эффективности процесса сушки [1]. Понятие эксергетической эффективности заключается в сопоставлении эффектов действия с необходимыми усилиями для его осуществления, и можно сделать вывод, что эффективность выражает сложную структуру причинно-следственных связей между положительными и отрицательными эффектами одного действия. То есть, деятельность более эффективна в энергетическом аспекте, если потери энергии от термодинамической границы этой деятельности меньше. Понятие энергоэффективности приобретает конкретный смысл только в том случае, если оно связано с четко определенной границей и с деятельностью, которая организовано протекает внутри этой границы.

Энергоэффективность предполагает множество способов действий, таких как:

- идентификация всех потоков энергии, участвующих в реализации процесса;
- идентификация потерянных потоков энергии;
- определение наиболее выгодных мер по снижению потерь с учетом их предварительной оценки затрат по сравнению с результатом прибыли за счет повышения энергоэффективности;
- применение мер, которые считаются эффективными, способными исключить потери энергии.

Таким образом, ограниченный рост энергоэффективности влечет за собой экономию энергии. Конечный результат повышения энергоэффективности заключается в сокращении счетов за электроэнергию или удельных расходов.

## 1 Потоки энергии сушильной секции

Контактная сушка с помощью цилиндров с паровым нагревом является преобладающим методом сушки в бумажных и картонных машинах.

Помимо проводящей теплопередачи между горячей поверхностью цилиндра и влажным полотном, очень важна роль воздуха, который является сушильной средой или окружает сушильную атмосферу. Сушка бумаги связана как с теплом, так и с массообменом [2].

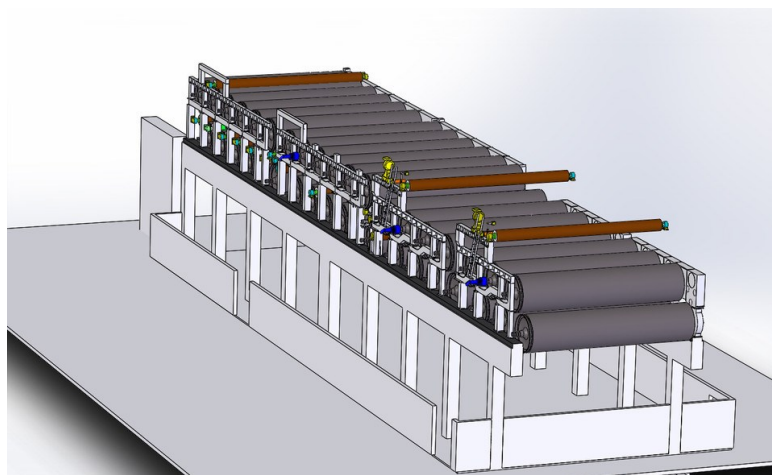


Рис 1. 3D-модель сушильной части бумагоделательной машины

Тепловая энергия, выделяющаяся при конденсации пара, передается через корпус сушилки на влажную бумагу, и это составляет аспект теплопередачи при сушке. В воздух попадает водяной пар, испаренный с бумаги. Удаление этого пара с листа в воздушный поток составляет аспект массопереноса при сушке бумаги. В результате работа сушильной секции должна быть оптимизирована как с точки зрения передачи тепла, так и с точки зрения удаления воды. Факторы, которые больше всего влияют на сушку бумаги, - это давление и температура пара, температура и влажность воздуха, энергоемкость пара и коэффициенты тепло-массопереноса.

При сушке бумаги преобладающим способом теплопередачи является теплопроводность для производства большинства сортов бумаги. Конвективная теплопередача также играет важную роль в системе вентиляции сушильных камер. Для сортов ткани, в которых горячий воздух воздействует на полотно, наиболее важна теплопередача за счет конвекции. Радиационная теплопередача обычно игнорируется при традиционной сушке бумаги, так как ее вклад в общую теплопередачу намного меньше, чем за счет теплопроводности и конвекции.

Основная форма одномерной стационарной теплопроводности показана в уравнении (1), а форма конвективной теплопередачи показана в уравнении (2):

$$Q = k \times A \times \Delta T / \Delta X \quad (1)$$

$$Q = h \times A \times \Delta T \quad (2)$$

Скорость передачи тепла от горячего пара внутри цилиндра к более холодной бумаге снаружи зависит от общего температурного градиента и различных сопротивлений теплопередаче:

$$Q = U \times A \times (T_{ab}/(T_p)) \quad (3)$$

Сопротивление из-за образования накипи внутри цилиндра может быть объединено как сопротивление из-за корпуса сушилки. Различные сопротивления тепловым потокам показаны в таблице 1.

Поскольку в стационарных условиях тепло, передаваемое через каждый слой, одинаково, все  $q$  равны. Тепловой поток равен общей движущей силе, деленной на полное сопротивление, поэтому:

$$q = \frac{\sum \Delta T_i}{\Delta R_i}; q = U \times A \times \Delta T$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_s A_1} \times \frac{L}{k_c A_2} + \dots + \frac{1}{h_a A}}$$

Таблица 1

Источник сопротивления	Удельное тепловое свечение, $q_i$
Паровая пленка	$q_1 = \frac{(T_1 - T_2)}{1/(A_1 h_s)}$
Слой конденсата	$q_2 = \frac{(T_2 - T_3)}{L_c/(A_2 k_c)}$
Корпус сушилки	$q_3 = \frac{(T_3 - T_4)}{L_s/(A_3 k_s)}$
Контактное сопротивление	$q_4 = \frac{(T_4 - T_5)}{1/(A_4 k_k)}$
Бумага	$q_5 = \frac{(T_5 - T_6)}{L_p/(A_5 k_p)}$
Воздушная пленка	$q_6 = \frac{(T_6 - T_7)}{1/(A_6 k_a)}$

Из уравнения (3) очевидно, что количество передаваемого тепла может быть увеличено за счет увеличения  $U$  (уменьшение слоя конденсата внутри цилиндра, устранение неконденсируемых веществ, увеличение натяжения сукна, увеличение площади контакта сукна, увеличение проницаемости сукна контакта, убедитесь, что поверхность сушилки чистая, оптимальная толщина корпуса); увеличение  $A$  (добавление большего количества сушильных цилиндров, увеличение площади контакта с сушилкой большего диаметра или одноярусная конструкция с большей оберткой листов); увеличение  $T_s$  (повышение температуры пара) и уменьшение  $T_r$  (снижение температуры листа за счет хорошей вентиляции кармана).

## 2 Эксергия и определение рациональной эффективности

Эксергетический анализ процесса сушки бумаги изучает потенциал системы сушки по отношению к окружающей среде и позволяет правильно составить баланс и определить потери и рациональную эффективность, возникающие в процессе сушки. Эксергия и анергия - это энергетические характеристики, которые зависят от состояния системы, от типа используемой энергии, от необратимости процессов и от состояния окружающей среды. Таким образом, эти характеристики содержат параметры окружающей среды, устанавливающие предел возможной эволюции рассматриваемой термодинамической системы. Эксергия тепла - это тот компонент тепла, который он может преобразовать в любой вид энергии. По результатам эксергетического анализа предложены улучшения. Предложения по улучшению основаны на двух критериях: эксергетических потерях и эффективности компонентов. На основе потерь эксергии известна максимальная величина экономии эксергии, в то время как эффективность компонентов указывает на технические возможности для улучшений.

В данной статье анализируются основные компоненты, в которых передача тепла значительна: сушильный цилиндр и тепловые батареи воздуха.

Общая форма рациональной эффективности  $\eta_{ex}$  определяется как отношение полезной эксергии  $E_u$  к использованной эксергии  $E_c$ :

$$\eta_{ex} = \frac{E_u}{E_c}$$

и эксергетические потери,  $\eta_e$  это :

$$\eta_e = E_c - E_u$$

С точки зрения процесса теплопередачи сушильный цилиндр может быть ассимилирован с теплообменником. Его зоной теплопередачи является оболочка цилиндра, где осуществляется теплопередача от пара к листу.

Температура конденсата постоянна и равна температуре насыщения, соответствующей давлению внутри цилиндра. Полезная эксергия-это тепловая эксергия, получаемая бумажным листом от всех сушильных цилиндров. Для цилиндра «i» это :

$$E_{u,i} = (1 - \frac{T_0}{T_{hm,i}}) \times k_i \times A_i \times \Delta t_{med,i} + W_i \times [h_{vap,i} - h_0 - T_0 \times (s_{vap,i} - s_0)]$$

где :  $T_0 = 18 + 273,15 [K]$  является эталонной температурой окружающей среды;

$T_{hm, i}$  - средняя температура листа на цилиндре “i”, [K];

$\Delta t_{med,i}$  - логарифмическая средняя температура между конденсатом внутри цилиндра и бумажным листом, [°C];

$k_i$ -температурный коэффициент по всему теплу, [Вт/м² °C];

$A_i$  - площадь контакта цилиндра «i» с листом бумаги, [м²];

$W_i$  - испаренная вода с листа на цилиндре «i», [кг],

$h_{vap,i}$  -энтальпия пара, удаленная с бумажного листа, [Дж/кг];

$h_0$  - энтальпия пара для эталонной температуры, [Дж/кг];

$s_{vap,i}, s_0$  - энтропия пара для средней температуры листа, соответственно для эталонной температуры [Дж / кг.K].

Используемая эксергия - это эксергия пара внутри всего цилиндра сушильной секции. Для цилиндра «i» эта эксергия составляет:

$$E_{c,i} = D_i \times [h_{ab,i} - h_{c,i} - T \times (s_{ab,i} - s_{c,i})]$$

где:  $D_i$  - расход пара внутри цилиндра «i», [кг / с];  $h_{ab, i}$  и  $h_{c, i}$  - энтальпия пара на впуске пара в цилиндр «i», соответственно энтальпия конденсата, откаченного из цилиндра «i», [Дж / кг];  $s_{ab, i}$  и  $s_{c, i}$  - энтропия пара на входе в цилиндр «i», соответственно энтропия конденсата, выведенного из цилиндра «i», [Дж / кг · К].  
Полезная эксергия для тепловых батарей воздуха, являющихся теплообменниками типа конденсатора, представляет собой тепловую эксергию, получаемую воздухом при средней температуре воздуха в батарее. Используемая эксергия из них-это тепловая эксергия, отдаваемая паром при температуре насыщения, соответствующей давлению внутри батареи [3].

Эти эксергии рассчитываются по следующему типу соотношений:

$$E = \left(1 - \frac{T_0}{T_m}\right) \times Q$$

где  $E$  – это тепловая эксергия, [W];

$T_m$  – это средняя температура внутри батареи, [K];

$Q$  – это тепло батареи, [W].

### 3 Численные результаты

В сушильной части машины полезная эксергия составляет только 14% от полезной энергии, а потери эксергии превышают потери энергии, 115%. Только тепловой КПД достигает примерно 88%, а эксергетический КПД не превышает 51%. В нагревательной батарее воздуха вес полезной эксергии к полезной энергии уменьшается с 12% до 2%. В то же время вес потерь эксергии увеличивается, а эффективность эксергии уменьшается. Эксергетическая эффективность уменьшается из-за уменьшения средней температуры холодного потока (воздуха) и увеличения средней разности температур между холодным потоком и увеличенным холодным потоком.

Замечено, что как эксергия, так и потери энергии в нагревательных батареях больше, чем в сушильных цилиндрах. Общая сумма потерь эксергии составляет 345 кВт, а общая сумма потерь энергии составляет 216 кВт.

КПД эксергии составляет 38%, а тепловой КПД - 84%. Уменьшение эксергетических потерь или увеличение эксергетической эффективности,

соответственно, возможно за счет уменьшения средней разницы температур между холодным и горячим потоками. В основном это достигается за счет уменьшения теплового сопротивления теплопередачи, устранения отложений на поверхностях теплопередачи, использования насыщенного пара и удаления неконденсирующихся внутри цилиндров [4].

## Заключение

Эксергетический анализ процесса сушки бумаги подчеркивает эксергетические потери и эксергетическую эффективность основного теплоснабжения бумагоделательной машины, которая является сушильной секцией. Эксергетический анализ проводился по теплоте пара, используемого в сушильных цилиндрах и нагревательных батареях воздуха. С тепловой точки зрения нагревательные батареи имеют те же характеристики, но отличаются с эксергетической точки зрения. Полезная эксергия увеличивается одновременно с увеличением средней разности температур между тепловыми потоками. Наибольшие значения потерь эксергии наблюдаются в нагревательных батареях. Эти потери могут быть уменьшены за счет увеличения теплопередачи в батареях и за счет увеличения средней температуры воздуха. Повышение эксергетической эффективности сушильного цилиндра ограничено качественными характеристиками бумажного листа. Они позволяют увеличивать температуру листа только в соответствии с допустимой температурой диаграммы соответствующего сорта бумаги. Кроме того, слишком сильно увеличивать ощущаемое напряжение-это недопустимое действие.

Для сушильных цилиндров большое значение имеет снижение теплового сопротивления теплопередачи от пара внутри цилиндра к бумажному листу.

## Литература:

1. Poirier, D.J. and Sparkes, D.G., in Symposium on Alternate Methods of Pulp and Paper Drying Proceedings, Helsinki, 1991.

2. Иванов С.Н. Технология бумаги. - 2-е изд. перераб. - М.: Лесная промышленность, 1970. - 696 с.
3. Goran, J., Nikola, T., Mirjana, S., and Vuk, A.i., Waste Heat Potentials in the Drying Section of the Paper Machine in UMKA Cardboard Mill, *Thermal Science*, 15 (2011), 3, pp. 735-747.
4. Kim K, Jeung Y, Lee D et al. 2019 *IEEE Trans. Power Electrocitcity* 27(5), 2376-84.