

УДК 681.5.015.2

UDC 681.5.015.2

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ  
ГОФРОКАРТОНА В ПЕРВОЙ СЕКЦИИ  
СУШИЛЬНОГО СТОЛА**

**MODELING OF PROCESS OF DRYING OF THE  
CORRUGATED CARDBOARD IN THE FIRST  
SECTION OF THE TABLE FOR DRYING**

Пиотровский Дмитрий Леонидович  
д.т.н., профессор

Piotrovsky Dmitriy Leonidovjch  
Dr.Sci.Tech., professor

Кротов Валерий Геннадьевич  
соискатель кафедры автоматизации производ-  
ственных процессов  
*ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный техно-  
логический университет»  
Краснодар, Россия*

Krotov Valeriy Gennadievich  
postgraduate student of chair of automation of produc-  
tions  
*Kuban State University of Technology  
Krasnodar, Russia*

В статье описан процесс сушки гофрокартона и  
приведена математическая модель. Рассмотрены  
вопросы использования полученной модели при  
исследовании процесса

The process of drying of a corrugated cardboard is  
described and the mathematical model is resulted in  
this article. Questions of use of the received model are  
considered at process research

Ключевые слова: ПРОЦЕСС СУШКИ  
ГОФРОКОРТОНА, ЧЕТЫРЕ СЕКЦИИ  
СУШИЛЬНОГО СТОЛА; СКОРОСТЬ СУШКИ;  
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРВОЙ  
СЕКЦИИ

Keywords: PROCESS OF DRYING OF THE  
CORRUGATED CARDBOARD, FOUR SECTIONS  
OF THE TABLE FOR DRYING, SPEED OF  
DRYING, MATHEMATICAL MODEL OF THE  
FIRST SECTION

Технологический процесс сушки гофрокартона имеет две составля-  
ющие, имеющие самостоятельное значение.

Во-первых – это сложная тепловая система, которая представляет со-  
бой сушильный стол. Он состоит из закрепленных в станине сушильных  
плит, обогреваемых паром.

Сложность теплофизических процессов, проходящих в этих плитах,  
значительно усложняют процесс их теплового регулирования (регулируе-  
ния их теплового режима). Регулирование теплового режима сушильных  
плит осуществляется дроссельным регулированием подачи пара в сушиль-  
ные плиты с помощью регулировочного клапана. Сложность зависимости  
режима подачи пара от положения штока значительно усложняет всю за-  
дачу.

Во-вторых – сложен процесс выпаривания влаги из гофрированного  
картона. Сложность структуры поперечного сечения гофрированного кар-

тона делает проблематичной априорный теоретический расчет тепломассообменных процессов в нем [3].

Однако, несмотря на всю сложность поставленной задачи, является необходимым ее решение, так как автоматизация технологического процесса производства гофрокартона на линии, обогреваемой паром, представляет собой актуальную задачу.

Технологический процесс сушки гофрокартона производится на сушильном столе типа АГП2СО9А. С накопительного моста на склеивающий агрегат подается двухслойный полуфабрикат приклеенной гофрированной бумагой вниз. Здесь на гофрированную бумагу наносится слой клея, затем полуфабрикат подается на сушильный стол. С рулона картона, разматывающегося на специальном раскате, через систему валиков подается третий слой плоского картона на сушильный стол, где приклеивается к полуфабрикату. Полученный гофрокартон высушивается до требуемой по стандарту ГОСТ 7376 – 89 [2] (общие технические условия 7376 - 89) влажности.

Сушка гофрокартона, и, соответственно, сушильный стол, разбита на две части. Это собственно сушка и охлаждение. Сушильная часть состоит из трех независимых частей с отдельным пароснабжением, что позволяет разделить процесс нагревания и сушки гофрокартона в сушильной части на три этапа. Сушка производится контактным способом, то есть полотно гофрокартона скользит по поверхностям сушильных плит, увлекаясь транспортным сукном и прижимаясь к плитам сушильного стола пружинящимися валиками. Конструктивно этапы нагревания гофрокартона осуществляются в секциях сушильного стола. В первой секции осуществляется первый этап (I этап). Во второй секции - второй этап (II этап). В третьей и четвертой секциях - третий этап (III этап). Соответственно обогревание первой, второй и третьей (четвертой) секций осуществляется первым, вто-

рым и третьим паровым контурами со своими системами пароснабжения и конденсатоудаления [4].

В сушильной части сушильного стола осуществляется нагревание и сушка гофрокартона. Параллельно происходит процесс приклеивания третьего слоя картона к полуфабрикату. Затем полотно гофрокартона попадает в охлаждающую часть сушильного стола, по длине примерно равную сушильной, где происходит выравнивание температуры по поперечному сечению гофрокартона и частичное его охлаждение.

Сушка - это, с одной стороны, сложный процесс одновременно тепло- и массообмена, а с другой - технологический физико-химический процесс, при проведении которого должны быть не только сохранены исходные свойства материалов, но даже улучшены [1]. Гофрокартон является довольно специфическим материалом со сложной внутренней структурой, с воздушными каналами между гофрированной бумагой и плоскими слоями картона, которая приближенно может быть принята как пористая. Идущие в нем процессы при сушке имеют сложный характер. С одной стороны гофрокартон ограничен поверхностью греющей плиты, с другой - довольно плотным транспортным сукном. Влага испаряется в основном в воздушные каналы гофрокартона, расположенные перпендикулярно направлению движения гофрокартона по столу. Движение пара по каналам имеет сложный характер, что многократно усложняет процесс сушки (возможность его математического моделирования) [5].

Для структурной идентификации технологического процесса сушки гофрокартона необходимо определиться с переменными, параметрами технологического процесса.

Измеряемые параметры:

- температуры сушильных плит сушильного стола;
- линейная скорость движения полотна гофрокартона по сушильному столу;

- влажность полуфабриката на входе в сушильный стол;
- влажность гофрокартона после сушки на выходе из сушильного стола.

В каждой секции сушильного стола расположено по шесть сушильных плит. В первых двух секциях сушильного стола температура сушильных плит регулируется индивидуально для каждой плиты с помощью вентиля на паропроводе. В третьей секции первых две плиты регулируются индивидуально, остальные – по парам. В четвертой секции один вентиль регулирует температуры пары включенных последовательно сушильных плит, всего три пары. В качестве параметра температуры в каждой секции сушильного стола можно взять температуру лишь одной сушильной плиты, так как управляющий паровой контур для каждой секции сушильного стола свой (для третьей и четвертой секции один общий паровой контур).

Возможна организация измерения температуры всех плит секций сушильного стола и организация многосвязного регулирования, однако это приведет к неоправданному усложнению и удорожанию системы регулирования. Температура сушильных плит подстраивается с помощью вентиля только один раз. В остальное время температуре контрольной сушильной плиты соответствует однозначный температурный режим сушки гофрокартона в соответствующей секции сушильного стола. Для трех паровых контуров соответствуют температуры контрольных сушильных плит:

- $\Theta_1$  - температура пятой сушильной плиты первой секции сушильного стола,  $^{\circ}\text{C}$ ;
- $\Theta_2$  - температура пятой сушильной плиты второй секции сушильного стола,  $^{\circ}\text{C}$ ;
- $\Theta_3$  - температура третьей сушильной плиты третьей секции сушильного стола,  $^{\circ}\text{C}$ .

Следующим параметром, влияющим на процесс сушки гофрокартона, является время воздействия температуры на гофрокартон, которое за-

висит от линейной скорости движения полотна гофрокартона по сушильному столу.

Линейная скорость полотна гофрокартона по сушильному столу в общем случае является функцией времени. Если линейная скорость постоянна во времени, то она обратно пропорциональна времени прохождения участком полотна гофрокартона секции сушильного стола (или одной греющей плиты) [4].

Математическую модель технологического процесса сушки гофрокартона можно составить на основе уравнения материального баланса. Можно считать, что весь гофрокартон входя на сушильный стол, высушиваясь, покидает его. Поток гофрокартона (даже сырой) представляет собой плотное полотно, которое практически не растягивается и не сжимается, каждая часть которого синхронно движется по столу с другими частями. Это значит, что если в качестве координаты принять расстояние от начала сушильного стола, то частная производная по этой координате будет равна нулю:

$$dv_{\text{л}} / dL = 0, \quad (1)$$

где  $v_{\text{л}}$  - линейная скорость полотна гофрокартона по сушильному столу, м/мин;

$L$  - расстояние от начала сушильного стола до точки измерения линейной скорости, м.

Расход гофрокартона при сушке может быть определен по формуле:

$$G_{\text{зф}} = v_{\text{л}} * h * m, \quad (2)$$

где  $h$  - ширина полотна гофрокартона, м;

$m$  - масса  $1\text{ м}^2$  гофрокартона, м/м<sup>2</sup>;

$v_{\text{л}}$  - линейная скорость полотна гофрокартона по сушильному столу, м/мин.

В свою очередь, масса  $1\text{ м}^2$  гофрокартона состоит из двух частей:

$$m = m_{cx} + w, \quad (3)$$

где  $m_{cx}$  - масса абсолютно сухого вещества гофрокартона, содержащегося в  $1\text{ м}^2$  гофрокартона,  $\text{кг}/\text{м}^2$  ;

$w$  - масса воды, содержащейся в  $1\text{ м}^2$  гофрокартоне,  $\text{кг}/\text{м}^2$ .

Из уравнений (1) и (2) следует равенство:

$$\partial G_{z\phi} / \partial L = 0 \quad (4)$$

где  $G_{z\phi}$  - расход гофрокартона при сушке,  $\text{кг}/\text{мин}$ ;

$L$  - расстояние от начала сушильного стола до точки измерения, м.

Из уравнения (4) следует, что уравнение материального баланса можно записать в виде:

$$G_{z\phi_{вых}} = G_{z\phi_{вх}} + W, \quad (5)$$

где  $G_{z\phi_{вх}}$  - расход гофрокартона на входе в сушильный стол (сырого),  $\text{кг}/\text{мин}$ ;

$G_{z\phi_{вых}}$  - расход гофрокартона на выходе из сушильного стола,  $\text{кг}/\text{мин}$ ;

$W$  - количество воды, выпариваемой сушильным столом за 1 мин,  $\text{кг}/\text{мин}$ .

Из уравнений (2), (3) и (5) следует:

$$v_l * h * m_{cx_{вых}} + v_l * h * w_{вых} = v_l * h * m_{cx_{вх}} + v_l * h * w_{вх} - W, \quad (6)$$

где  $m_{cx_{вых}}$  - масса  $1\text{ м}^2$  абсолютно сухого гофрокартона на выходе в сушильный стол,  $\text{кг}/\text{м}^2$ ;

$m_{cx_{вх}}$  - масса  $1\text{ м}^2$  абсолютно сухого гофрокартона на входе в сушильный стол,  $\text{кг}/\text{м}^2$ ;

$w_{вх}$  - масса воды, содержащаяся в  $1\text{ м}^2$  гофрокартона на входе в сушильный стол,  $\text{кг}/\text{м}^2$ ;

$w_{вых}$  - масса воды, содержащаяся в  $1\text{ м}^2$  гофрокартона на выходе из сушильного стола,  $\text{кг}/\text{м}^2$ ;

$v_l$  - линейная скорость полотна гофрокартона по сушильному столу,

м /мин;

$h$  - ширина полотна гофрокартона, м;

$W$  - количество воды, выпариваемой сушильным столом за 1 мин, кг/мин.

Из уравнения (4) следует равенство:

$$m_{схвх} = m_{схвх} \quad (7)$$

Учитывая равенство (7), которое вытекает из закона сохранения массы, уравнение (6) можно записать в виде:

$$v_{свх} = v_{сх} - 1/(v_{л} * h * W) \quad (8)$$

Уравнение (8) содержит нелинейный компонент. Для линеаризации его необходимо разложить в ряд Тейлора по переменным  $W$  и  $v_{л}$ :

$$W / v_{л} = W_0 / v_{л0} + 1 / v_{л0} (W - W_0) - W_0 / v_{2л0} (v_{л} - v_{л0}) - 1 / v_{2л0} (W - W_0)(v_{л} - v_{л0}), \quad (9)$$

где  $W_0$  - некоторое фиксированное количество воды, выпариваемое сушильным столом за 1 мин, кг/мин;

$v_{л0}$  - некоторое фиксированное значение линейной скорости полотна гофрокартона по сушильному столу, фиксированная линейная скорость, м/мин.

Равенство (9) является приближенным, не учитывающим компоненты ряда Тейлора выше первой степени малости, но и оно является приближенным, так как содержит последним компонентом произведение переменных  $W$  и  $v_{л}$  (компонент суммы в правой части). Линеаризация возможна лишь при условии, что значения  $W$  и  $v_{л}$  отличаются от значения  $W_0$  и  $v_{л0}$  соответственно на величину, достаточно малую, чтобы пренебречь последним произведением в уравнении (9)

При принятии этого допущения выражение (9) можно записать в виде:

$$W / v_{л} = W_0 / v_{л0} - W_0 / (v_{2л0} * U), \quad (10)$$

где  $U$  - значение относительной скорости полотна гофрокартона по сушильному столу.

Относительную скорость и можно определить по формуле:

$$U = v_{л} - v_{л0} / v_{л0} \quad (11)$$

где  $v_{л}$  - переменное значение линейной скорости полотна гофрокартона по сушильному столу, м/мин;

$v_{л0}$  - фиксированное значение линейной скорости полотна гофрокартона по сушильному столу, м/мин.

Подставляя в уравнение (8) выражение (10) получается уравнение:

$$W_{вых} = W_{вх} - 1/(W * v_{2л0} * h) + W_0 / (v_{л0} * h * U), \quad (12)$$

где  $W_{вых}$  - масса воды, содержащаяся в  $1\text{ м}^2$  гофрокартона, выходящего из сушильного стола, кг/  $\text{м}^2$  ;

$W_{вх}$  - масса воды, содержащаяся в  $1\text{ м}^2$  гофрокартона, входящего в сушильный стол, кг/  $\text{м}^2$  ;

$v_{2л0}$  - линейная скорость полотна гофрокартона по сушильному столу (фиксированное значение), м/мин;

$h$  - ширина полотна гофрокартона, м;

$W$  - масса воды, испаряемая за 1 мин, переменное значение, кг/мин;

$W_0$  - масса воды, испаряемая за 1 мин, фиксированное значение, кг/мин;

$U$  - относительная скорость полотна гофрокартона по сушильному столу.

Масса воды, испаряемая сушильным столом за 1 мин, состоит из массы воды, испаряемой на каждом этапе процесса сушки гофрокартона за это время. Так как на сушильном столе реализовано три этапа, то значение  $W$  можно определить из выражения:

$$W = W_1 + W_2 + W_3, \quad (13)$$



где  $W_1$  - масса воды, выпариваемая из гофрокартона на первом этапе (первая секция сушильного стола) за 1 мин, кг/мин;

$W_2$  - масса воды, выпариваемая из гофрокартона на втором этапе (вторая секция сушильного стола) за 1 мин, кг/мин;

$W_3$  - масса воды, выпариваемая из гофрокартона на третьем этапе (третья и четвертая секция сушильного стола) за 1 мин, кг/мин. Подставляя выражение (13) в уравнение (12) получаем уравнение:

$$W_{\text{вых}} = W_{\text{ex}} - 1/(W_1 * v_{2л0} * h) - 1/(v_{2ло} * h * W_2) - 1/(v_{2ло} * h * W_3) + W_0 / (v_{л0} * h * U). \quad (14)$$

Влага, выпариваемая за 1 мин на каждом этапе сушки гофрокартона, может быть определена исходя из ряда предположений.

Во-первых, предполагается, что температура по длине греющей поверхности (вдоль направления движения полотна) изменяется мало для одной секции сушильного стола, то есть интенсивность испарения вдоль одной секции сушильного стола меняется мало.

Однако, если судить по конструкции сушильных секций, это условие может не выполняться. Тогда необходимо говорить о приведенной температуре и приведенном влагоотделении, при равномерном значении величины которых, вдоль одной секции стола выпаривается эквивалентное значение влаги, выпариваемой за 1 мин из гофрокартона при данном градиенте температур, настроенном с помощью вентилях вдоль одной секции сушильного стола.

### Литература

1. Асмаев М.П., Пиотровский Д.Л. Автоматизированные информационно-управляющие системы: Учеб. пособие. Краснодар, Издательство КубГТУ, 2009. 275 с.
2. ГОСТ 7376-89. Картон гофрированный, общие технические условия.
3. Кондрашкова Г.А., Леонтьев В.Н., Шапоров О.М. Автоматизация технологических процессов производства бумаги/ М: Лесная промышленность, 1989.-328 с.
4. Пиотровский Д.Л., Кротов В.Г. Алгоритм обработки экспериментальных данных процесса сушки гофрокартона// Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте 2010». Том 3. Технические науки. Одесса, Украина, 2010. С. 90-91

5. Пиотровский Д.Л, Кротов В.Г. Определение передаточных функций сушильного стола для процесса сушки гофрокартона// Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2009». Том 2. Технические науки. Одесса, Украина, 2009. С. 47-48