



## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРОВОГО БАЛАНСА АВТОКЛАВОВ ВО ВРЕМЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПРОПАРКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

Ненчо Делийски

### Abstract

*Non-stationary mathematical model of the steam balance of the autoclaves during the process of lumber steaming has been created and solved.*

*In the model the steam balance depends on the dimensions and initial temperature of lumber, on the build and the microstructure specifics of the wood species, and on the content and aggregate condition of water in wood. Other important factors are the low for the change in the values of the temperature of the steaming medium, the manufacture parameters of the autoclave, the thermo-physical characteristics of the material of the corpus, of its insulation layer, of the condensed water and the surrounding air, the degree of the loading of the autoclave with wood materials, etc.*

*The influence of the loading of the autoclave with wood materials on the steam balance and on its 6 components during low temperature steaming of beech lumber in autoclave has been graphically presented and analyzed.*

**Key words:** *mathematical model, autoclave, steaming of wood, lumber, steam balance*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Пропарка пиломатериалов в камерах и ямах, работающих при атмосферном давлении, характеризуется высокими удельными затратами пара и большой продолжительностью технологического процесса.

Значительное интенсифицирование и снижение удельной энергоемкости процесса пропарки достигается при его осуществлении в герметизируемых и хорошо теплоизолированных автоклавах, которые могут работать как при атмосферном, так и при повышенном давлении.

В специализированной литературе приводятся весьма ограниченные и противоречивые сведения об экспериментально установленных затратах пара при пропарке деревянных материалов различного предназначения.

F. Fessel [4] приводит сведения о среднем расходе пара в  $17 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$  при пропарке  $10 \text{ m}^3$  буковых пиломатериалов в камере в течении 100 h. С учетом продолжительности и объема пропарки, этот расход соответствует удельному расходу пара, равному  $1700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Этот расход хорошо согласуется с удельным

расходом пара в  $1800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , установленным при нашем участии во время пропарки в камере буковых пиломатериалов толщиной  $40 \text{ mm}$  в течении  $54 \text{ h}$ .

При высокотемпературной пропарке таких же пиломатериалов в автоклаве в течение  $8,5 \text{ h}$  при температуре пропаривающей среды  $t_m = 130^\circ\text{C}$  нами установлен удельный расход пара, равный  $250 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

А. Kuhlmann в своей диссертации [5] устанавливает следующий тепловой баланс при пропарке в яме кряжей из африканской породы габун при производстве лущеного шпона в зависимости от диаметра кряжей  $D$ ,  $t_m$  и степени заполнения рабочего объема ямы кряжами:

- нагревание древесины:  $5 \div 18\%$ . Уменьшение температуры пропаривающей среды увеличивает относительное участие этих расходов в тепловом балансе;
- теплоотдача в окружающий воздух из-за нехорошего уплотнения крышки ямы:  $41 \div 62\%$ . Снабжение крышки водяным затвором уменьшает эти расходы;
- теплопередача через дно и стены ямы:  $12 \div 19\%$ . Использование водо- и кислотнотстойчивого бетона снижает эти расходы;
- нагревание стен, дна и крышки ямы:  $13 \div 16\%$ . Увеличение толщины конструктивных элементов обуславливает нарастание этих расходов;
- нагревание конденсата в яме:  $2 \div 6\%$ . Значительная часть введенного в яму пара не конденсируется, а выходит наружу через неуплотненные участки крышки и через поры и трещины в бетоне;
- теплоотдача паропровода, питающего яму:  $0,3\%$ .

По мнению М. Ławniczak [6], приведенные в [5] результаты являются пока единственным обобщенным исследованием теплового баланса сооружения для пропарки древесины. Указанную в этом источнике верхнюю границу полезных расходов, равную  $18\%$ , можно считать максимально возможным значением коэффициента полезного действия (к.п.д.) традиционных сооружений для пропарки древесины, работающих при атмосферном давлении.

Это подтверждают и исследования М. Sohor & P. Kadlec [7], показывающие, что для испарения воды при индиректном обогреве расходуется около  $15 \div 20\%$  вводимой тепловой энергии, для нагревания конструктивных элементов ям – около  $20 \div 25\%$ , а при хорошей теплоизоляции и уплотнении крышки потери через нее можно свести до  $40\%$  вместо обычных для практики около  $70 \div 80\%$ .

Предметом настоящей работы является симуляционное исследование с помощью собственной аналитически-экспериментальной [2] математической модели расходов насыщенного водяного пара во время низкотемпературной пропарки пиломатериалов в автоклаве и определение отдельных составляющих парового баланса этого сооружения.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСХОДОВ ПАРА ПРИ ПРОПАРКЕ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ В АВТОКЛАВЕ

Вводимое в автоклав количество пара  $Q_{sa}$  расходуется для следующих целей:

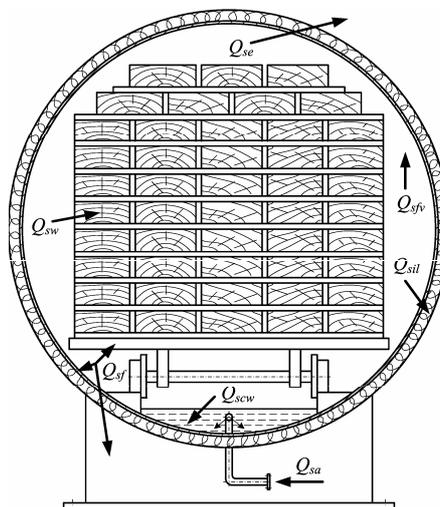
- нагревание подверженных пропарке деревянных материалов ( $Q_{sw}$ );
- нагревание стального корпуса автоклава и металлических тележек, на которых расположены деревянные материалы ( $Q_{st}$ );
- нагревание теплоизоляционного слоя автоклава ( $Q_{sil}$ );
- осуществление тепловой эмиссии автоклава в окружающую среду ( $Q_{se}$ );

- заполнение паром свободной (незанятой древесиной и тележками) части рабочего объема автоклава ( $Q_{sfv}$ );
- нагревание собирающегося в нижней части автоклава конденсата, образующегося от вводимого в автоклав пара до выравнивания температуры конденсата с  $t_m$  во время повышения  $t_m$  в режимах пропарки ( $Q_{scw}$ ).

На основе изложенного анализа нами предложена в [2] показанная на рис.1 структурная модель распространения пара, вводимого в автоклав.

Для формирования научно обоснованных технологий и управления процесса пропарки пиломатериалов в автоклавах необходимо располагать моделью, включающей в себя математическое описание всех перечисленных расходов пара.

Такое описание удельных (по отношению к  $1 \text{ m}^3$  пропариваемой древесины) расходов  $Q_s$  для случаев пропарки в автоклавах призматических деревянных материалов сделано нами в [2]. Это описание можно использовать для симуляционного исследования парового баланса автоклавов для случаев как высокотемпературной (что сделано в [2]), так и низкотемпературной (при  $t_m < 100^\circ\text{C}$ ) пропарки пиломатериалов.



**Рис.1.** Структурная модель распространения вводимого в автоклав количества пара  $Q_{sa}$  при пропарке пиломатериалов

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРОВОГО БАЛАНСА АВТОКЛАВА ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПРОПАРКЕ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

С использованием составленной в [2] температурно-энергетической модели процесса пропарки призматических деревянных материалов в автоклавах нами проведено симуляционное исследование составляющих парового баланса достаточно широко используемых в Болгарии автоклавов с внутренним диаметром  $D_a = 2,4 \text{ m}$ , длиной цилиндрической части  $L_a = 9,0 \text{ m}$ , толщиной корпуса из нержавеющей стали  $d_{af} = 0,008 \text{ m}$ , толщиной теплоизоляционного слоя  $d_{il} = 0,10 \text{ m}$  и непокрытой теплоизоляцией части корпуса  $K_{ils} = 0,05$ .

Один такой автоклав установлен нами в 1994 г. в Sundermann s.r.o. в г. Banska Stiavnica (Словакия) и уже 12 лет в нем осуществляется бесперебойная пропарка пиломатериалов (рис.2).

Симуляционное исследование с помощью математической модели осуществлено для случаев пропарки насыщенным водяным паром в автоклаве несодержащих лед буковых пиломатериалов с толщиной  $d = 60$  mm, начальной температурой  $t_{w0} = 0^{\circ}\text{C}$ , влагосодержанием  $u = 0,6 \text{ kg.kg}^{-1}$ , средне статистическими базисной плотностью  $\rho_b = 560 \text{ kg.m}^{-3}$  и границей насыщения клеточных стен  $u_{fsp} = 0,31 \text{ kg.kg}^{-1}$  [1].



Рис. 2. Общий вид автоклава, используемого для пропарки пиломатериалов в Sundermann s.r.o. в г. Banska Stiavnica (Словакия)

Симулирована низкотемпературная пропарка пиломатериалов при  $t_m = 80^{\circ}\text{C}$  с продолжительностью 48 h, обеспечивающая достижение насыщенного красного цвета пропаренной древесины.

Исследовано влияние степени заполнения автоклава пиломатериалами  $P_a = 30\%$ ,  $P_a = 50\%$  и  $P_a = 70\%$  на составляющие парового баланса автоклава.

На рис. 3 показано изменение составляющих парового баланса автоклава во время пропарки пиломатериалов при  $P_a = 30\%$ .

На рис. 4а и 4б показано изменение в зависимости от  $P_a$  составляющих парового баланса автоклава в конце 48-часовой пропарки соответственно в  $\text{kWh.m}^{-3}$  и в процентах по отношению к суммарному потреблению автоклавом  $Q_{sa}$ .

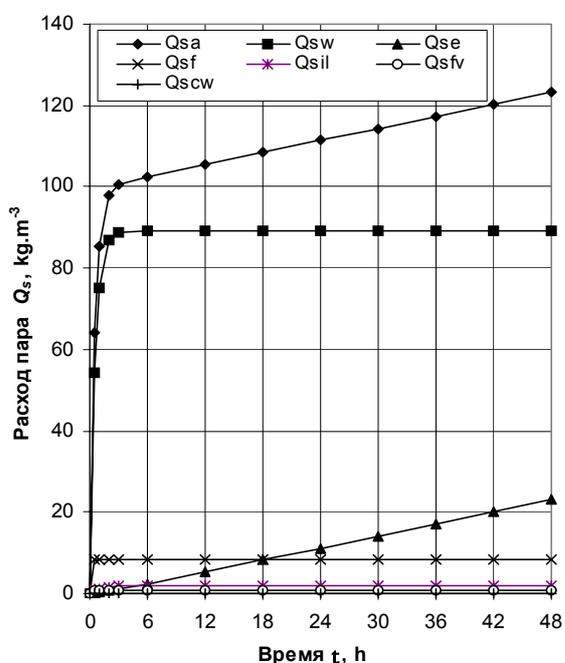
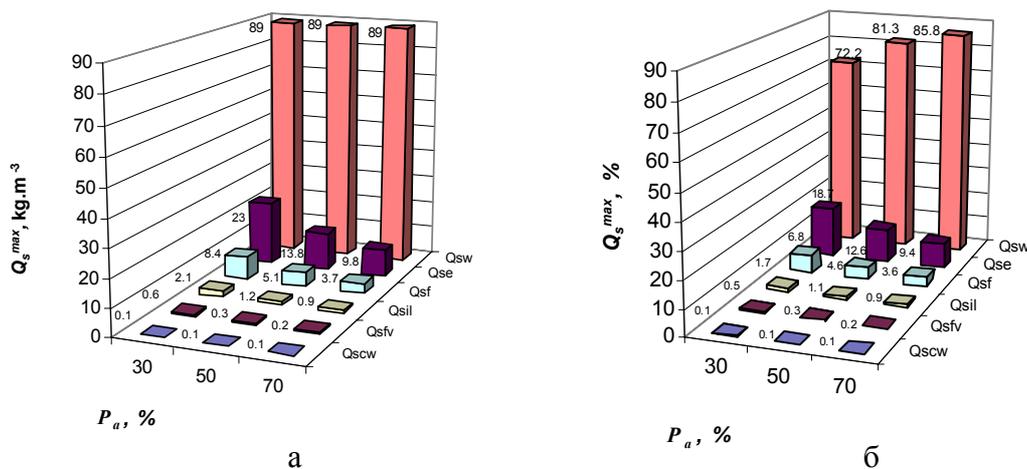


Рис.3. Изменение во время пропарки с  $t_m = 80^{\circ}\text{C}$  составляющих парового баланса автоклава при его 30%-ом заполнении пиломатериалами с  $t_{w0} = 0^{\circ}\text{C}$



**Рис. 4.** Изменение в  $\text{kg.m}^{-3}$  (**а**) и в % по отношению к  $Q_{sa}$  (**б**) в зависимости от  $P_a$  составляющих парового баланса пропарочного автоклава с  $D_a = 2,4 \text{ m}$  и  $L_a = 9,0 \text{ m}$  в конце 48-часовой пропарки в нем при  $t_m = 80^{\circ}\text{C}$  буковых пиломатериалов с  $d = 0,06 \text{ m}$ ,  $t_{w0} = 0^{\circ}\text{C}$  и  $u = 0,6 \text{ kg.kg}^{-1}$

#### 4. ВЫВОДЫ

Анализ полученных результатов, часть которых показана на рис.3 и 4, позволяет сделать следующие основные выводы:

1. В начале пропарки с повышением  $t_m$  наблюдается плавное нарастание всех составляющих парового баланса автоклава.

2. При достижении режимного значения  $t_m = 80^{\circ}\text{C}$  перестают увеличиваться  $Q_{sf}$  и  $Q_{sfv}$ , так как при постоянной  $t_m$  остаются неизменными достигнутые уже теплосодержание корпуса автоклава и заполнение паром его незанятой пиломатериалами части объема.

3. После достижения постоянного значения  $t_m = 80^{\circ}\text{C}$  продолжают нарастать все остальные составляющие теплового баланса автоклава, а именно:

- $Q_{sw}$  вследствие продолжающегося нагревания пиломатериалов;
- $Q_{sil}$  из-за продолжающегося нагревания теплоизоляционного слоя автоклава;
- $Q_{se}$  вследствие увеличения температуры наружной поверхности теплоизоляционного слоя автоклава;
- $Q_{scw}$  из-за нарастания количества конденсата, собираемого в автоклаве во время пропарки.

4. Непрерывное увеличение  $Q_{sw}$ ,  $Q_{sil}$ ,  $Q_{se}$  и  $Q_{scw}$  по ходу пропарки обуславливает плавное нарастание суммарного потребления пара автоклавом во время всего режима пропарки.

После 48 h пропарки пиломатериалов с  $t_{w0} = 0^{\circ}\text{C}$  при 50%-ом заполнении ими автоклава с размерами  $D_a = 2,4 \text{ m}$  и  $L_a = 9,0 \text{ m}$  потребление составляет  $Q_{sa} = 109,49 \text{ kg.m}^{-3}$ . В этом потреблении наибольший удельный вес имеет  $Q_{sw} = 88,99 \text{ kg.m}^{-3}$ , за

ним следуют  $Q_{se} = 13,79 \text{ kg.m}^{-3}$ ,  $Q_{sf} = 5,11 \text{ kg.m}^{-3}$ ,  $Q_{sil} = 1,24 \text{ kg.m}^{-3}$ ,  $Q_{sfv} = 0,28 \text{ kg.m}^{-3}$  и  $Q_{scw} = 0,08 \text{ kg.m}^{-3}$ .

5. Увеличение степени заполнения автоклава пиломатериалами  $P_a$  вызывает уменьшение переменных составляющих парового баланса автоклава  $Q_{se}$ ,  $Q_{sf}$ ,  $Q_{sil}$ ,  $Q_{sfv}$  и  $Q_{scw}$  (а следовательно и суммарного потребления  $Q_{sa}$ ), но не влияет на  $Q_{sw}$ .

При увеличении  $P_a$  от 30% на 70% удельный расход пара автоклавом уменьшается с  $123,2 \text{ kg.m}^{-3}$  на  $103,7 \text{ kg.m}^{-3}$ . При этом удельный вес отдельных составляющих парового баланса равен соответственно:

- нагревание подверженных пропарке пиломатериалов  $Q_{sw}$ : 72,2% и 85,8%;
- осуществление тепловой эмиссии автоклава  $Q_{se}$ : 18,7% и 9,4%;
- нагревание корпуса автоклава и тележек в нем  $Q_{sf}$ : 6,8% и 3,6%;
- нагревание теплоизоляционного слоя автоклава  $Q_{sil}$ : 1,7% и 0,9%;
- заполнение паром свободного объема автоклава  $Q_{sfv}$ : 0,5% и 0,2%;
- нагревание конденсата в автоклаве  $Q_{scw}$ : 0,11% и 0,05%.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в настоящей работе результаты показывают, что коэффициент полезного действия автоклава, равный отношению  $Q_{sw}$  к  $Q_{sa}$ , в 3 ÷ 4 раза выше, чем к.п.д. традиционных сооружений для пропарки деревянных материалов.

Использованная при симуляционных исследованиях нестационарная модель парового баланса автоклавов во время пропарки пиломатериалов составлена, решена и верифицирована с учетом физики и энергетики этого процесса. В ней отражено комбинированное влияние моментных значений основных факторов на потребление пара и на отдельные составляющие парового баланса автоклавов, а именно:

- начальной температуры древесины;
- влагосодержания древесины;
- микроструктурных особенностей строения древесной породы;
- наличия или отсутствия льда в древесине в начале и в течение определенного интервала времени пропарки;
- температуры пропаривающей среды;
- температуры воздуха, окружающего автоклав;
- геометрических параметров автоклава;
- теплофизических характеристик древесины и материалов, из которых изготовлен и которыми теплоизолирован автоклав.

Математическую модель можно использовать для определения расходов пара и для исследования парового баланса автоклавов как при низкотемпературной, так и при высокотемпературной (при повышенном давлении) пропарке пиломатериалов. Она, а также реализующий ее решение софтвер, могут быть использованы в автоматических системах с модельным предсказывающим управлением [3] процесса пропарки деревянных материалов в автоклавах.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] ВИДЕЛОВ, Х., 2003: Сушене и топлинно обработване на дървесината. С., ЛТУ.

- 
- [2] ДЕЛИЙСКИ, Н., 2003: Моделиране и технологии за пропарване на дървени материали в автоклави. Дисертация за д.т.н., ЛТУ, София.
- [3] ХАДЖИЙСКИ, М., 2003: Математичните модели в съвременните системи за технологично управление. Автоматика и инаформатика, №3, с.7-12.
- [4] FESSEL, F., 1961: Dampfkammern und Dampfgruben für Schnittholz. Holz Zentralblatt, № 12.
- [5] KUHLMANN, A., 1961: Wärmeverbrauch und Wärmebilanzen beim Dämpfen von Gaboon für die Furnierherstellung. Dokt. Dissertation, Institut für Holzforshung-München.
- [6] ŁAWNICZAK, M., 1995: Zarys hydrotermicznej i plastycznej obróbki drewna. Czesć I. Warzenie i parzenie drewna. Poznań.
- [7] SOHOR, M., P.KADLEC, 1990: Hydrotermická úprava dreva pre výrobu dýh. Drevo, № 2