

ОПТИМИЗАЦИЯ УСТАНОВОК ИСКУССТВЕННОЙ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ

Бохан А.Н., к.т.н., Прус Ф.В., инж., Бохан А.А., студ.

Применение установок для искусственной сушки древесины позволяет получать древесину высокого качества и обеспечить непрерывность производства вне зависимости от климатических условий.

Важнейшая особенность древесины высушенной в сушильной камере является стабилизация, т.е. резкое уменьшение её способности к влагообмену с окружающей средой. Отклонения от конечной влажности находятся в очень узких пределах ($\pm 1\%$). Соблюдение технологического процесса сушки древесины даёт гарантию получения высокого качества конечного продукта.

Удельные энергозатраты в установках искусственной сушки древесины зависят в основном от вида древесины, от её начальной и конечной влажности, а также от потерь тепла в окружающую среду. Конечная влажность древесины применяется обычно в пределах $10 \pm 2\%$. Следует отметить, что в настоящее время удельные энергозатраты на сушку древесины имеют достаточно большой разброс в зависимости от типа и конструкций сушильных камер. Это даёт основания для постановки задачи по оптимизации режимов работы и совершенствованию конструкций сушильных камер.

Выполним оценку удельных энергозатрат и определим основные тепловые потоки на примере сушильных камер "Sorcal" и "Техносфера". В качестве теплогенератора для указанных типов камер используются газовые водогрейные котлы с автоматическим режимом управления.

В соответствии с технологическим процессом можно выделить пять стадий процесса: предварительный нагрев; сушка выше точки насыщения волокон ($U_{нв}$); промежуточный нагрев; сушка ниже точки насыщения волокон; кондиционирование.

При оценке энергозатрат, без существенной потери точности, можно принять к рассмотрению две наиболее длительные стадии: сушка выше точки насыщения волокон (т.н.в.) и сушка ниже т.н.в.

Первая стадия характеризуется температурой T_{1cp} и градиентом влажности:

$$G_1 = U_{д1} / U_{рав}$$

где $U_{д}$ – влажность древесины;

$U_{рав}$ (UGL) – равновесная влажность, при которой древесина находится в условиях гигроскопического равновесия с окружающей средой.

Для первой стадии можно принять $T_{1cp}=50^{\circ}\text{C}$, $G_{1cp}=2,6$.

Вторую стадию сушки можно характеризовать следующими усредненными параметрами: $T_{2cp}=70^{\circ}\text{C}$, $G_{2cp}=3,6$.

Количество влаги удаляемой из 1 м^3 древесины на первой и второй стадиях соответственно определяются выражениями:

$$m_{в1} = \frac{d_{\delta}(U_{н1} - U_{к1})}{100}, \quad m_{в2} = \frac{d_{\delta}(U_{н2} - U_{к2})}{100},$$

где d_{δ} – плотность сухой древесины, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$U_{н1}$, $U_{к1}$, $U_{н2}$, $U_{к2}$ – соответственно, начальная и конечная влажность древесины на первой и второй стадиях, в %.

Объём воздуха взятый из окружающей среды, необходимый для сушки м^3 древесины на первой и второй стадиях:

$$V_1 = \frac{m_{в1}}{P_{пв1} - P_{пв0}}; \quad V_2 = \frac{m_{в2}}{P_{пв2} - P_{пв0}},$$

где $P_{пв0}$, $P_{пв1}$, $P_{пв2}$ – соответственно содержание пара в воздухе окружающей среды, в камере на первой стадии и на второй стадии сушки.

Содержание влаги в воздухе зависит от температуры (T) и относительной влажности воздуха (ϕ), определяется по диаграммам.

Количество влаги в наружном воздухе ($T_0=10^{\circ}\text{C}$, $\phi_0=80\%$) составляет:

$$P_{пв0} = 0,8 \cdot P_{на\phi} = 0,8 \cdot 9,5 = 7,6 (\text{г}/\text{м}^3)$$

Аналогично определяется количество влаги в воздухе камеры на первой стадии ($T_1=50^{\circ}\text{C}$, $\phi_1=58\%$) и второй стадии ($T_2=70^{\circ}\text{C}$,

$$\phi_{2cp}=43\%): P_{пв1} = 61,2 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}, \quad P_{пв2} = 284 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}.$$

Выполнение расчёты показывают, что на первой стадии сушки из м^3 древесины следует удалить влаги $m_{в1}=245 \text{ кг}$ и для этого требуется воздуха $V_1=4570 \text{ м}^3$. На второй стадии соответственно $m_{в2}=80 \text{ кг}$, $V_2=290 \text{ м}^3$.

Для указанных условий можно определить количество тепловой энергии, необходимое для сушки м^3 древесины.

$$Q_{\text{потр}} = Q_{\text{вд}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{всп}} + Q_{\text{д}} + Q_{\text{пот}}$$

Тепло на нагрев и испарение воды:

$$Q_{\text{вд}} = m_{\text{вд}} \cdot c_{\text{вд}} \cdot (T_1 - T_0) + (m_{\text{вд}} - m_{\text{вд1}}) \cdot c_{\text{вд}} \cdot (T_2 - T_1) + r \cdot (m_{\text{вд1}} + m_{\text{вд2}}) + P_{\text{к}} \cdot m_{\text{вд2}}$$

где $m_{вд}$, $m_{вл1}$, $m_{вл2}$ – соответственно, масса воды содержащейся в M^3 влажной древесины, удаляемой на первой и второй стадиях сушки, кг;

$c_{вд}$ – удельная теплоёмкость воды – $4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$,

r – удельная теплота парообразования – $2400 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$,

$R_{кон}$ – удельная теплота удаления конституционной влаги (из мембранного слоя на второй стадии).

Тепло на нагрев воздуха

$$Q_{в} = V_1 \cdot d_{в} \cdot c_{в} \cdot (T_1 - T_0) + V_2 \cdot d_{в} \cdot c_{в} \cdot (T_2 - T_0),$$

где $d_{в}$ и $c_{в}$ – соответственно плотность воздуха ($\text{кг}/\text{м}^3$) и удельная теплоёмкость ($\text{кДж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}$).

Расход тепла на нагрев вспомогательного оборудования сушильной камеры:

$$Q_{всп} = \frac{m_{всп} \cdot c_{всп}}{V_{загр}} \cdot (T_2 - T_{кон}),$$

где $T_{кон}$ – температура кондиционирования при которой осуществляется выгрузка древесины;

$V_{загр}$ – объём полезной загрузки камеры.

Тепло на нагрев древесины:

$$Q_{д} = d_{д} \cdot c_{д} \cdot (T_2 - T_0)$$

Потери тепла через стенки и свод сушильной камеры в расчёте на M^3 древесины:

$$Q_{пот} = \frac{K \cdot (T_{срк} - T_0) \cdot F}{V_{загр}},$$

где K – коэффициент тепловых потерь через стенки и свод камеры, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

$T_{срк}$ – средняя температура внутри камеры.

Коэффициент K определяется по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{f}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

где α_1 – коэффициент теплопередачи от нагретого газа к стенке сушилки,

α_2 – коэффициент теплопередачи от стенки сушилки в окружающую среду,

λ – коэффициент теплопроводности тепловой изоляции стенок камеры,

f – толщина изоляции.

Расчёты показывают, что для сушильных камер фирмы "Техносфера" с тепловой изоляцией из стекловолокна коэффициент

$$K=0,4 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{°C}$$

В то же время в жилищном домостроении наблюдается тенденция увеличения теплового сопротивления наружных стен за счёт увеличения теплоизолирующего слоя. При этом значения коэффициентов тепловых потерь составляют $0,41-0,32 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{°C}$ [1], а по нормативным требованиям Германии для наиболее совершенных конструкций достигает значения $0,21 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{°C}$.

Учитывая то, что тепловая нагрузка сушильных камер значительно выше за счёт большей разницы температур внутреннего и наружного воздуха, а также вследствие того что время работы сушильных камер превышает отопительный период, теплоизолирующий слой сушильных камер целесообразно увеличивать и соответственно уменьшать K до значений $(0,2 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{°C})$.

Усредненный баланс расхода тепловой энергии при сушке древесины в тепловой камере по технологии фирмы COPCAL приведен на рис. 1.

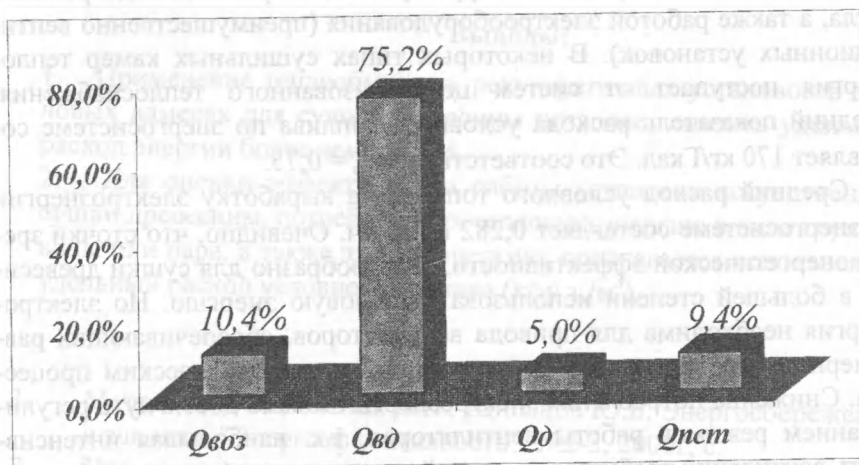


Рис. 1. Удельные составляющие энергозатрат при сушке древесины. $Q_{\text{воз}}$ -нагрев воздуха; $Q_{\text{вд}}$ -нагрев и извлечение воды; $Q_{\text{д}}$ -нагрев древесины; $Q_{\text{пст}}$ - потери энергии через стены и свод камеры.

При составлении баланса принят ряд допущений, не влияющих принципиально на структуру баланса. В частности полагаем, что обработке в тепловой камере подвергается древесина среднетвердых пород с плотностью $d_d = 550 \text{ кг / м}^3$ и преобладающей толщиной пиломатериалов 40 – 50 мм.

Оценим возможный потенциал энергосбережения при сушке древесины. Наибольшие возможности в снижении энергопотребления состоят в утилизации тепла уходящего с влажным воздухом. Применение теплообменных рекуперативных установок позволяет утилизировать большую часть тепла на нагрев воздуха $Q_{в}$, а также на нагрев и испарение воды $Q_{вд}$.

Причём доля утилизируемого тепла определяется в основном эффективностью теплообменной установки $\eta_{рек}$. Безвозвратно теряется и не подлежит утилизации составляющая тепла на извлечение конституционной (связанной) влаги, при этом происходят структурные изменения древесины, в том числе и усадка.

Анализ структуры расходования тепла при сушке древесины показывает, что применение теплообменных утилизационных установок при $\eta_{рек} = 0,6 - 0,7$ позволяет снизить удельное энергопотребление на 35 – 40 %. Улучшение же теплоизоляции стенок и свода камеры и снижение коэффициента потерь в два раза позволяет снизить удельное энергопотребление лишь на 5 %.

Поступление энергии в камеру обусловлено работой водогрейного котла, а также работой электрооборудования (преимущественно вентиляционных установок). В некоторых типах сушильных камер тепловая энергия поступает от систем централизованного теплоснабжения. Средний показатель расхода условного топлива по энергосистеме составляет 170 кг/Гкал. Это соответствует $\eta_{пр} = 0,75$.

Средний расход условного топлива на выработку электроэнергии по энергосистеме составляет 0,282 кг/кВт·ч. Очевидно, что сточки зрения энергетической эффективности, целесообразно для сушки древесины в большей степени использовать тепловую энергию. Но электроэнергия необходима для привода вентиляторов, обеспечивающих равномерные условия сушки, в соответствии с технологическим процессом. Снижение потребления электроэнергии можно достигнуть регулированием режимов работы вентиляторов, т.к. наибольшая интенсивность вентиляции требуется на второй стадии сушки (ниже т.н.в.).

При оценке эффективности сушильных камер различных типов в условиях нестабильности цен на энергоносители предлагается использовать показатель удельного расхода условного топлива на сушку м^3 древесины. Он может быть определён при известном потреблении

тепловой и электрической энергии на сушку древесины. Анализ энергетического баланса тепловой сушильной камеры показывает, что применение теплообменных утилизационных установок, уменьшение тепловых потерь и оптимизация режимов работы позволяет достигнуть удельного расхода условного топлива ниже 55 кг. у.т./м^3 .

Наиболее перспективным направлением снижения энергозатрат является технология вакуумной сушки [3]. В то же время следует отметить, что удельный расход энергии $13 \text{ кВт}\cdot\text{ч} / \text{м}^3$ указанный для данной конструкции камеры реально невозможен и носит скорее рекламный характер. Ошибка связана, прежде всего, с тем, что энергозатраты следует относить к объему фактически высушенных пиломатериалов. Объем высушиваемой древесины за один цикл для приведенной конструкции камеры не превышает 8 м^3 и удельный расход энергии составит при этом $50 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^3$ ($14,1 \text{ кг. у.т./м}^3$).

Снижение удельного расхода энергии при вакуумной сушке древесины связано не только с уменьшением затрат энергии на нагрев воды и древесины, а прежде всего снижением теплоты парообразования и энергозатрат на удаление конституционной влаги.

Существенные отличия технологии вакуумной сушке древесины позволяют предположить, что свойства пиломатериалов высушенных в вакуумной и тепловой камерах могут существенно отличаться, и представляют задачу для дополнительных исследований.

Выводы:

1. Применение теплообменных рекуперативных установок в тепловых камерах для сушки древесины позволяет снизить удельный расход энергии более чем на 40%.
2. Для оценки эффективности работы установок искусственной сушки древесины, потребляющих тепловую энергию в виде горячей воды или пара, а также электроэнергию, предлагается использовать удельный расход условного топлива (кг. у.т./м^3).

Литература:

1. Матросов Ю.А., Ливчак В.И., Щипанов Ю.Б. Энергосбережение в зданиях. "Энергоэффективность", №2-3, 2000г, с.
2. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: Справочник / Под общей ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1991г.
3. Сентябов В.И. Энергосберегающая технология вакуумной сушки древесины. "Энергоэффективность" №9, 1999г.