

УДК 621.577

Безродный М.К., Кутра Д.С.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ТЕПЛОНАСОСНЫХ СУШИЛОК ДРЕВЕСИНЫ В ПЕРИОДЕ ПАДАЮЩЕЙ СКОРОСТИ СУШКИ

Наведено результати термодинамічного аналізу ефективності роботи теплонасосних сушарок деревини з повною рециркуляцією сушильного агенту в періоді падаючої швидкості сушіння. Отримані значення питомих затрат енергії на випаровування вологи для всього сушильного процесу.

Представлены результаты термодинамического анализа эффективности работы теплонасосных сушилок древесины с полной рециркуляцией сушильного агента в периоде падающей скорости сушки. Получены значения удельных затрат энергии на испарение влаги для всего сушильного процесса.

The results of thermodynamic analysis of heat pump dryers of wood performance with full recirculation of drying agent in the period of dropping drying rate are presented. The values of specific energy consumption for evaporation of moisture for all drying process are gained.

$a$  – коэффициент байпасирования;  
 $c$  – удельная теплоемкость, кДж/(кг °С);  
 $d$  – влагосодержание, кг<sub>вл</sub>/кг<sub>св</sub>;  
 $e$  – затраты на испарение влаги, кДж/кг<sub>вл</sub>;  
 $j$  – интенсивность испарения, кг<sub>вл</sub>/час;  
 $r$  – удельная теплота испарения, кДж/кг<sub>вл</sub>;  
 $t$  – температура, °С;  
 $L$  – мощность, Вт;  
 $Q$  – тепловой поток, Вт;  
 $V$  – объемный расход, м<sup>3</sup>/с;  
 $W$  – влажность древесины;  
 $\eta$  – коэффициент использования энергии;  
 $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\tau$  – время, час;  
 $\varphi$  – относительная влажность;  
 КИЭ – коэффициент использования энергии;  
 СА – сушильный агент;

СК – сушильная камера;  
 СУ – сушильная установка;  
 ТН – тепловой насос;  
 ТНСУ – теплонасосная сушилка.

### Индексы:

б – байпас;  
 вл – влага;  
 и – испарение;  
 к – конденсация;  
 м – мокрый термометр;  
 общ – общий;  
 рец – рециркуляция;  
 ск – сушильная камера;  
 см – смесь;  
 св – сухой воздух;  
 су – сушильная установка;  
 тн – тепловой насос.

### Введение

Мировые тенденции на рынке топливно-энергетических ресурсов вынуждают человечество обращать внимание на возможности и перспективы использования различного рода ресурсосберегающих технологий не только для нужд гражданского теплообеспечения, но и для промышленных теплотехнологических процессов. К наиболее энергоёмким процессам промышленности можно отнести процессы сушки, в частности, сушки древесины, которая является одним из основных материалов строительной индустрии. Использование теплонасосных

технологий в деревообрабатывающей отрасли позволяет не только создавать рациональные схемы сушки и утилизировать вторичные энергоресурсы, а и приводит к значительному повышению энергоэффективности самого процесса сушки, что непосредственно связано с экономией энергии.

Несмотря на очевидную энергоэкономическую перспективу использования тепловых насосов (ТН) в процессах сушки древесины, в литературе отсутствуют аналитические зависимости и методики, позволяющие объективно оценить уровень эффективности применения

теплонасосных технологий в зависимости от различных схемных решений теплонасосных сушильных установок (ТНСУ), технологических условий процесса сушки, параметров работы самого теплового насоса.

В работах [1 – 3] авторами проведен сравнительный анализ термодинамической эффективности работы теплонасосных сушильных систем низкотемпературной сушки древесины с полной рециркуляцией отработанного сушильного агента (СА) и байпасированием теплового насоса для широкого диапазона изменения технологических параметров процесса при постоянных параметрах работы теплового насоса. Анализ произведен для периода постоянной скорости сушки древесины, продолжительность которого обуславливается совокупностью множества факторов, определяемых технологией сушки. Стоит отметить, что при низкотемпературной сушке древесины большинства сортов продолжительность первого периода сушки является преобладающей, однако эффективность работы теплонасосных сушильных систем во втором периоде (периоде падающей скорости сушки) требует, по мнению авторов, дополнительного исследования, так как имеет ряд особенностей.

Ниже приведен термодинамический анализ эффективности работы теоретических ТНСУ с полной рециркуляцией сушильного агента с ТН, работающим по циклу Карно в периоде падающей скорости сушки.

## 1. Постановка задачи и ее решение

### 1.1. Общие сведения

При сушке пиломатериалов применяются режимы с повышающейся по ходу процесса жесткостью. В начальной стадии при определенной заданной температуре поддерживается высокая степень насыщенности СА, затем при снижении влажности древесины температура повышается, а относительная влажность воздуха уменьшается. Такой характер изменения параметров сушильного агента при сушке обусловлен особенностями развития в древесине внутренних напряжений и требованием сохранения целостности высушиваемых досок или

заготовок.

Режимы низкотемпературной сушки листовых пиломатериалов предусматривают трехступенчатое (в отдельных случаях многоступенчатое) изменение параметров сушильного агента при переходной влажности древесины 30 и 20 % (35 и 25 % для хвойных соответственно). Первый период сушки (период постоянной скорости) имеет место при начальной влажности древесины  $W_H > 30$  % и характеризуется относительно постоянной интенсивностью испарения влаги из материала. Второй период (период падающей скорости сушки) имеет место в интервале влажности древесины от предела гигроскопичности  $W_{ПГ} = 35...30$  % до конечной влажности  $W_K$  (как правило, для материалов мебельного производства  $W_K = 12...8$  %).

Продолжительность сушки пиломатериалов от  $W_H$  до  $W_K$  может быть определена как [4]

$$\tau = 65S^2 \lg[(W_H - W_P)/(W_K - W_P)]/(a'10^6), \quad (1)$$

где  $\tau$  – продолжительность сушки, час;  $S$  – толщина пиломатериала, см;  $a'$  – коэффициент влагопроводности,  $\text{см}^2/\text{с}$ ;  $W_P$  – равновесная влажность древесины, %.

Коэффициент влагопроводности материала зависит от его температуры и с достаточной точностью может быть определен как [5]

$$a' = 10^{9,36 \lg(t_{\text{мат}} + 273)} \cdot 10^{-6}, \quad (2)$$

где  $t_{\text{мат}}$  – температура материала, °C;  $b$  – коэффициент, зависящий от породы материала ( $b = 22,6$  – сосна;  $b = 22,79$  – береза;  $b = 23,97$  – бук;  $b = 23,13$  – дуб).

Равновесная влажность древесины зависит от технологических параметров сушильного процесса ( $t_{\text{см}}$ ,  $\varphi_{\text{см}}$ ) и может быть определена по следующему соотношению [5]

$$W_P = 10,6^{\varphi_{\text{см}}} (3,27 - 0,015t_{\text{см}}). \quad (3)$$

Таким образом, зная породу пиломатериала и технологические параметры сушильного процесса можно определить продолжительность сушки древесины при известных  $W_H$  и  $W_K$ .

Как отмечалось выше, первый период сушки древесины характеризуется относительно постоянной скоростью испарения влаги из материала, поэтому тепловой поток, расходуемый на испарение в периоде постоянной скорости сушки является величиной неизменной, и, как показано в работах [1 – 3], может быть определен как

$$Q_u = V_{\text{см}} \rho_{\text{см}} \Delta d_{\text{ск}} r(t_{\text{м}}), \quad (4)$$

где  $\Delta d_{\text{ск}}$  – приращение влагосодержания СА при прохождении штабеля древесины, зависящее от технологического перепада температуры СА  $t_{\text{ск}}$  в сушильной камере, являющееся в первом периоде величиной постоянной.

Температурный перепад сушильного агента при прохождении камеры  $t_{\text{ск}}^{\text{техн}} = t_{\text{см}} - t_2$ , зависит от рода древесины, регламентируется технологией [6], и составляет:

- для хвойных пород  $t_{\text{ск}}^{\text{техн}} = 2...3 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;
- для березы, бука  $t_{\text{ск}}^{\text{техн}} = 1,5...2,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;
- для дуба, лиственницы  $t_{\text{ск}}^{\text{техн}} = 1...1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Во втором периоде сушки пиломатериала интенсивность испарения влаги из материала уменьшается с течением времени и поэтому в общем случае расходуемый тепловой поток является функцией не только технологических параметров, но и текущего значения времени

$$Q_u = V_{\text{см}} \rho_{\text{см}} \Delta d_{\text{ск}}(\tau_{\text{тек}}) r(\tau_{\text{тек}}). \quad (5)$$

Приращение влагосодержания при прохождении штабеля материала во втором периоде сушки может быть определено как

$$\Delta d_{\text{ск}}(\tau_{\text{тек}}) = \Delta t_{\text{ск}}(\tau_{\text{тек}})(0,4 + 0,00074d_{\text{см}}), \quad (6)$$

где  $d_{\text{см}}$  – влагосодержание СА на входе в штабель,  $\text{г}_{\text{вл}}/\text{кг}_{\text{св}}$ .

Температурный перепад СА при прохождении камеры в зависимости от текущего значения времени во втором периоде сушки может быть определен как

$$\Delta t_{\text{ск}}(\tau_{\text{тек}}) = t_{\text{ск}}^{\text{техн}} [(W_{\text{тек}} - W_p)/(W_H - W_p)], \quad (7)$$

где текущее значение влажности древесины  $W_{\text{тек}}$  может быть определено из (1) при кон-

кретном значении  $\tau_{\text{тек}}$ , известных технологических параметрах сушки, определяющих значение равновесной влажности (3) и начальной влажности

$$W_{\text{тек}} = W_p + (W_H - W_p)/10^{(\tau_{\text{тек}} a^{10^6/(65S^2)}). \quad (8)$$

В периоде падающей скорости сушки с понижением влажности древесины возрастает прочность связи гигроскопической межмицеллярной влаги с мицеллами и тем больше расходуется дополнительно теплоты на отрыв молекул воды от вещества древесины. Поэтому в статью расхода теплоты на испарение влаги  $r(t_{\text{м}})$  необходимо добавлять дифференциальную теплоту набухания гигроскопического вещества ( $\text{кДж}/\text{кг}_{\text{вл}}$ ), величина которой зависит от текущей влажности древесины  $W_{\text{тек}} = f(\tau)$  [7]

$$r_{\text{д}} = 2501/(W_{\text{тек}} + 1,7) - 20. \quad (9)$$

Таким образом, удельная теплота испарения влаги из материала во втором периоде сушки будет определяться в зависимости от времени как

$$r(\tau_{\text{тек}}) = r(\tau_{\text{м}}) + r_{\text{д}}(\tau_{\text{тек}}). \quad (10)$$

### 1.2. ТНСУ с полной рециркуляцией сушильного агента

Рассмотрим пример реализации сушильного процесса в теплонасосной установке с полной рециркуляцией сушильного агента (рис. 1).

Подробное описание схемы такой установки приведено в работах [1, 2]. Там же изложена методика и произведен анализ термодинамической эффективности работы ТНСУ данного схемного решения в первом периоде сушки древесины, который характеризуется постоянной интенсивностью испарения влаги из материала.

Во втором периоде сушки, исходными данными для анализа являются значения начальной и конечной влажности древесины ( $W_H, W_K$ ) и технологических параметров сушильного агента ( $t_{\text{см}}, \phi_{\text{см}}$ ) на всех стадиях периода.

Анализу подлежат временные зависимости изменения влажности древесины, а также па-



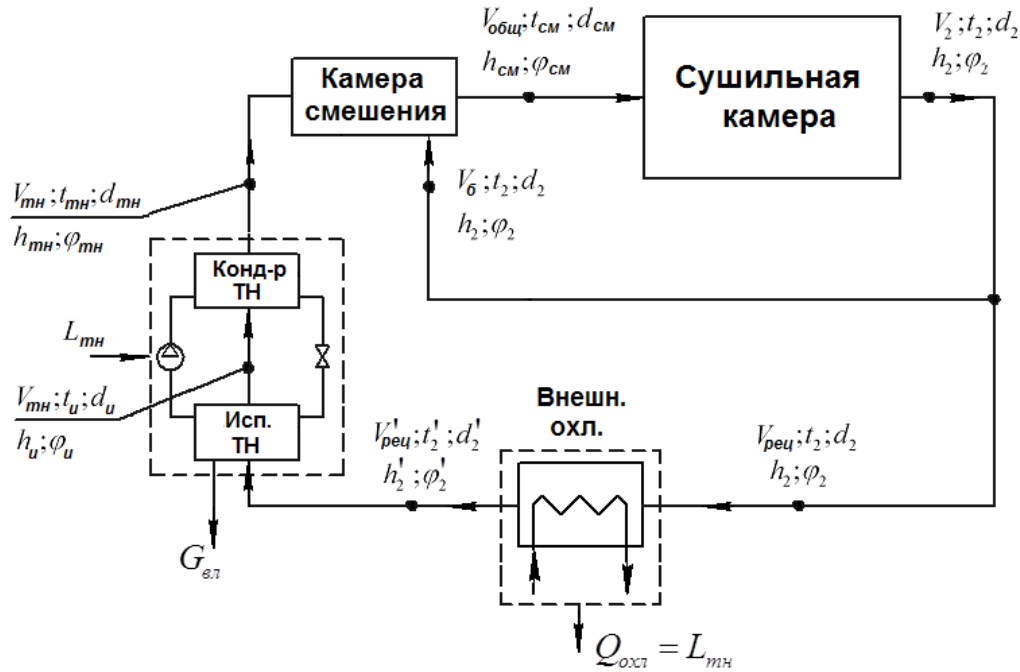


Рис. 2. Схема теплонасосной сушильной установки с полной рециркуляцией сушильного агента и байпасированием теплового насоса.

байпасированием теплового насоса.

Подробное описание такой схемы установки приведено в работах [1, 3]. В этих работах изложена методика и произведен анализ термодинамической эффективности работы ТНСУ данного схемного решения в первом периоде сушки древесины.

Основные аспекты протекания процесса сушки в периоде падающей скорости и определения параметров сушильного агента в этом периоде, описанные в пункте 1.1, правомерны также и для рассматриваемой схемы.

Основным отличием данной схемы является осуществление частичного байпасирования теплового насоса, величина которого характеризуется коэффициентом байпасирования и может быть выражена следующим образом

$$a = V_6 \rho_2 / V_2 \rho_2. \quad (15)$$

Тогда, расход сушильного агента через тепловой насос может быть определен как

$$V_{\text{реци}} = V_2 \cdot (1 - a). \quad (16)$$

Выражение для температуры сушильного агента на выходе из теплового насоса может

быть определено из теплового баланса камеры смешения и будет иметь вид

$$t_{\text{тн}}(\tau) = [t_{\text{см}} - a \cdot t_2(\tau)] / (1 - a). \quad (17)$$

Как видно из (17), температура СА на выходе из теплового насоса зависит от текущего значения времени во втором периоде сушки.

Выражение для влагосодержания сушильного агента на выходе из теплового насоса можно определить из материального баланса камеры смешения в зависимости от времени как

$$d_{\text{тн}}(\tau) = [d_{\text{см}} - a \cdot d_2(\tau)] / (1 - a). \quad (18)$$

Температура отработанного СА на выходе из внешнего охладителя  $t'_2$ , как и в предыдущем случае, определяется из теплового баланса внешнего охладителя (рис. 2)

$$t'_2(\tau) = t_2(\tau) - (c_{\text{св}} + c_n d'_{\text{тн}})(t_{\text{тн}} - t_u) / [\text{COP}(c_{\text{св}} + c_n d'_2(\tau))]. \quad (19)$$

Температуру сушильного агента на выходе из испарителя теплового насоса  $t_u$  в данном случае можно определить из формулы аппрок-

симации (20) как функцию  $d_u = d_{тн}(\tau)$ . Однако при реализации рассматриваемой схемы ТНСУ данная величина не постоянна с течением времени второго периода сушки и определяется соотношением

$$t_u = \ln(226,2d_u)/0,0596. \quad (20)$$

С учетом (5), а также соотношений, приведенных в работах [1, 3] для  $L_{тн}$  и COP, выражение для определения коэффициента использования внешней энергии на испарение влаги (11) во втором периоде сушки древесины можно представить в следующем виде

$$\eta_{cy}(\tau) = r(\tau)\Delta d_{ck}(\tau)(COP(\tau) - 1)/[c_{cb}(t'_2(\tau) - t_u(\tau)) + r\Delta d_{ck}(\tau) + c_n(d'_2(\tau)t'_2(\tau) - d_u(\tau)t_u(\tau))]\cdot(1 - a)^{-1}. \quad (21)$$

## 2. Анализ полученных результатов

Приведенная методика анализа эффективности работы полнорециркуляционных теплонасосных сушилок позволяет произвести численную оценку изменения во времени ключевых параметров работы такого рода установок. В качестве исходных данных к анализу были выбраны технологические параметры процесса низкотемпературной сушки дуба по мягкому режиму от начальной влажности  $W_H = 80\%$  до конечной  $W_H = 10\%$  с изменением режимных параметров при переходных влажностях  $W_{n1} = 35\%$  и  $W_{n2} = 20\%$ . Толщина пиломатериала  $S = 5$  см. В соответствии с [4] технологические параметры сушки в отдельных периодах равны значениям:

- $W_{ДР} = 80...35\% - t_{cm} = 47\text{ }^\circ\text{C}, \varphi_{cm} = 0,9;$
- $W_{ДР} = 35...20\% - t_{cm} = 50\text{ }^\circ\text{C}, \varphi_{cm} = 0,75;$
- $W_{ДР} = 20...10\% - t_{cm} = 62\text{ }^\circ\text{C}, \varphi_{cm} = 0,36;$

### 2.1. ТНСУ с полной рециркуляцией сушильного агента

На рис. 3, в соответствии с уравнениями (1) – (3), изображен характер изменения влажности древесины дуба во всем периоде сушки

пиломатериала. Как видно из иллюстрации, для принятых условий первый период сушки составляет примерно 1/3 времени от периода всей сушильной кампании.

Уравнение (14), позволяет построить график изменения коэффициента использования внешней энергии на испарение влаги из материала во всем временном диапазоне сушильного процесса (рис. 4).

Как видно из иллюстрации, наибольшее значение КИЭ наблюдается в первом периоде сушки пиломатериала, что связано с низким регламентируемым температурным уровнем технологического процесса именно в первом периоде по отношению к периоду падающей скорости сушки, высоким влагосодержанием сушильного агента и интенсивностью испарения влаги из материала, а соответственно большей способностью извлекать скрытую теплоту парообразования из отработанного СА.

Во втором периоде сушки интенсивность испарения влаги из материала с течением времени уменьшается, при этом повышается температурный уровень процесса с уменьшением влагосодержания СА. Совокупность этих факторов приводит к существенному снижению эффективности работы установки и на последней ступени сушильного процесса значение коэффициента использования энергии в диапазоне  $W_{ДР} = 20...10\%$ ,  $\eta_{cy} < 1$ .

Однако эффективность работы ТНСУ во всем периоде процесса конвективной сушки определяется среднеинтегральным значением коэффициента использования внешней энергии на испарение влаги, который может быть представлен как

$$\bar{\eta}_{cy} = \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} \eta_{cy} d(\tau), \quad (22)$$

где  $\tau_0$  – продолжительность всего процесса сушки, час.

Для принятых нами исходных параметров технологического процесса сушки дуба среднеинтегральное значение КИЭ всего сушильного процесса составляет 4,81. Стоит отметить, что, несмотря на низкую эффективность работы ТНСУ на последней стадии сушки, высокое

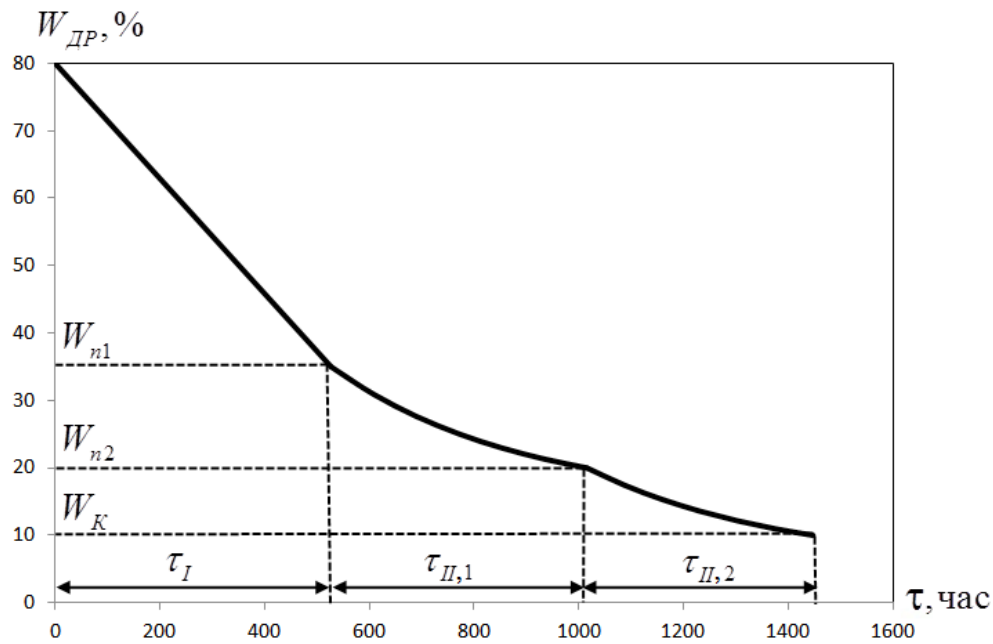


Рис. 3. Изменение влажности дубового пиломатериала при сушке во времени.

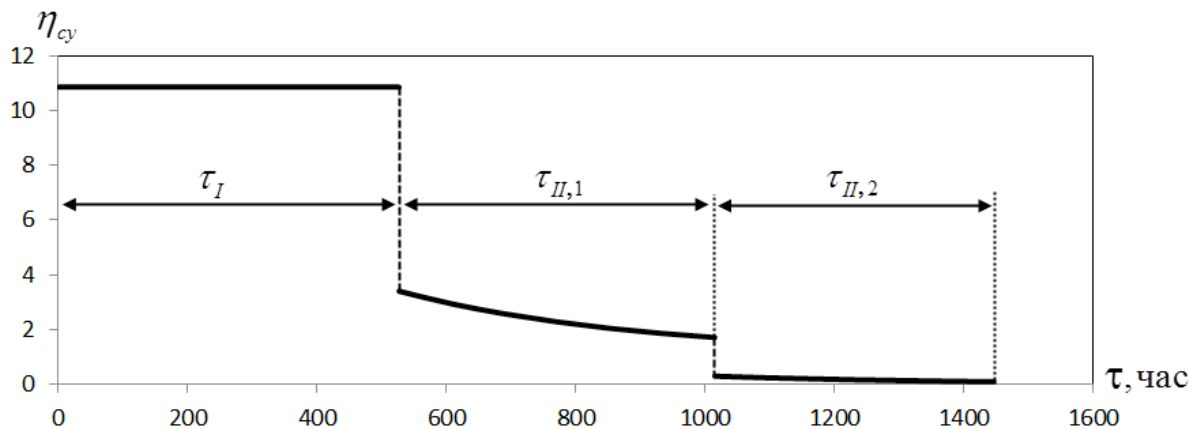


Рис. 4. Характер изменения КИЭ для ТНСУ с полной рециркуляцией сушильного агента.

значения КИЭ в первом периоде обеспечивает относительно высокую термодинамическую эффективность всего сушильного процесса.

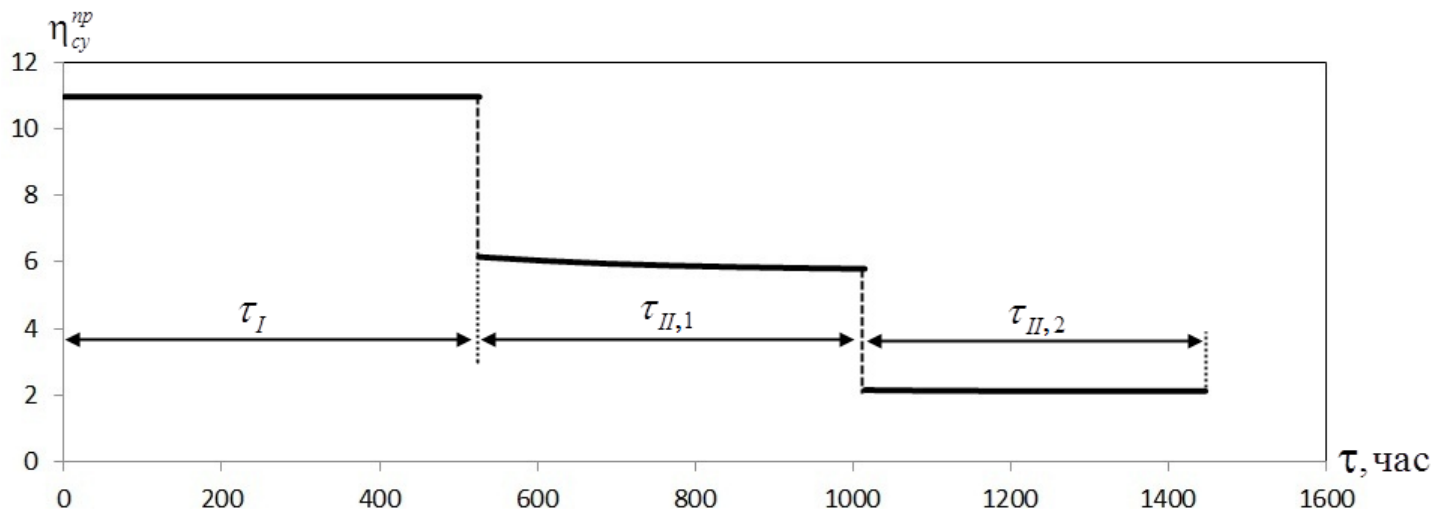
### 2.2. ТНСУ с полной рециркуляцией сушильного агента и байпасированием теплового насоса

Численный анализ, произведенный по изложенной для ТНСУ с полной рециркуляцией и частичным байпасированием ТН методике позволяет оценить изменение предельного зна-

чения коэффициента использования внешней энергии на испарение влаги во времени (рис. 5).

Как видно из иллюстрации, применение частичного байпасирования теплового насоса позволяет существенно повысить эффективность работы ТНСУ именно во втором периоде сушки пиломатериала. При этом величина изменения КИЭ в рамках периодов с течением времени является несущественной вследствие реализации оптимального байпасирования ТН.

Значение среднеинтегральной величины коэффициента использования внешней энер-



**Рис. 5. Изменение коэффициента КИЭ для ТНСУ с полной рециркуляцией сушильного агента и байпасированием теплового насоса.**

гии на испарение влаги для второго периода сушки при работе установки данного схемного решения, полученное с помощью уравнения (22), составляет 4,18, что в 3,1 раза выше, чем для установки без байпасирования. При этом среднеинтегральный показатель эффективности для всего сушильного процесса составляет 6,65, что на 38 % выше за аналогичный показатель для полнорециркуляционной ТНСУ без байпасирования.

### 3. Затраты энергии на сушку

Полученные временные характеристики эффективности работы теплонасосных сушилок не отражают полные затраты энергии за цикл, вследствие изменения интенсивности испарения влаги из материала на различных стадиях цикла.

В связи с этим, для характеристики общей эффективности работы рассматриваемых теплонасосных сушильных систем определим общие затраты энергии на сушку за весь цикл, рассчитанные на 1 кг сухого материала и характеризруемые следующим соотношением

$$l = \sum_{i=1}^{i=3} \int_0^{\tau_i} j_{вл,i}(\tau) e_i(\tau) d\tau, \quad (23)$$

где  $i=1, 2, 3$  – соответствующие периоды суш-

ки;  $j_{вл,i}(\tau) = dW(\tau)/d\tau$  – интенсивность испарения влаги из материала в различных периодах сушки, рассчитанная на 1 кг сухого материала,  $\text{кг}_{вл}/(\text{кг}_{с.м.} \cdot \text{час})$ ;  $e_i(\tau) = r(\tau)/\eta_{су}(\tau)$  – затраты энергии на испарение 1 кг влаги в соответствующих периодах сушки,  $\text{кДж}/(\text{кг}_{с.м.} \cdot \text{час})$ ;  $\tau_i$  – продолжительность отдельных периодов сушки, час.

С учетом изменения технологических параметров сушки по периодам, а также уравнения (8) для определения текущей влажности древесины, зависимость интенсивности испарения влаги  $j_{вл}$  от времени в различных периодах сушки имеют следующий вид (рис. 6).

Как видно из иллюстрации, наибольшая интенсивность испарения влаги наблюдается в первом периоде сушки древесины и является неизменной величиной. На протяжении полупериодов второго периода сушки  $j_{вл}$  экспоненциально уменьшается. При этом повышение интенсивности испарения влаги на начальной стадии второго полупериода может быть связано со значительным снижением степени насыщенности сушильного агента согласно технологическим рекомендациям [4]. Стоит также отметить, что представленный характер изменения интенсивности испарения влаги характерен для обеих рассматриваемых схем теплонасосных сушилок, ибо зависит только от технологических параметров тепловлаго-обра-



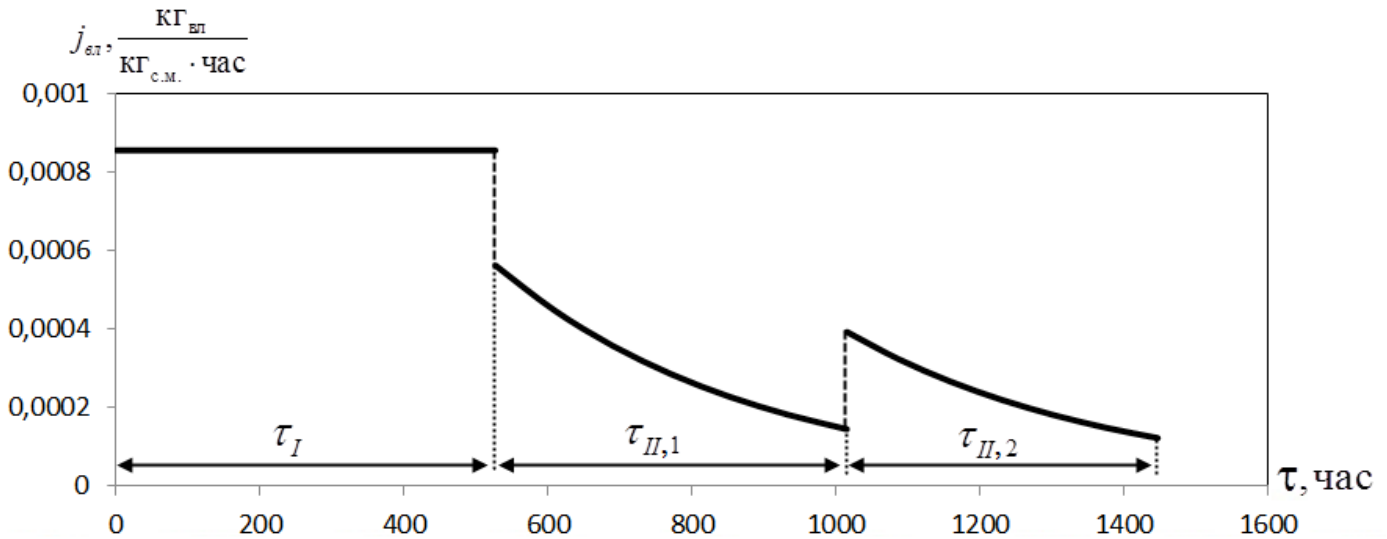


Рис. 6. Зависимость интенсивности испарения влаги во временном интервале сушильного процесса.

ботки древесины.

На рис. 7 представлена зависимость изменения во времени удельных затрат энергии на испарение влаги для рассматриваемых схем сушильных установок, полученная в соответствии с соотношением [1]

$$e(\tau) = r(\tau) / \eta_{cy}(\tau), \quad (24)$$

где  $r(\tau)$  – теплота парообразования в соответствии с (10), а  $\eta_{cy}(\tau)$  – КИЭ в соответствии с (14) и (21).

Как видно из рис. 7, а, при работе ТНСУ с полной рециркуляцией сушильного агента, значение удельных затрат энергии на испарение влаги существенно увеличивается в последнем периоде сушки древесины, что связано со значительным снижением термодинамической эффективности работы такой системы в этом полупериоде (рис. 4).

Для ТНСУ с полной рециркуляцией и байпасированием СА (рис. 7, б) значение удельных затрат энергии на испарение влаги во втором периоде сушки существенно ниже чем для предыдущей схемы ТНСУ вследствие повышения значения КИЭ на конечном этапе сушки за счет оптимального байпасирования теплового насоса.

После определения по уравнению (23) затрат энергии в каждом из периодов сушки с учетом графиков для  $j_{вл}$  и  $e$ , общие затраты энергии на испарение влаги, рассчитанные на 1 кг сухого материала за цикл, определяются как сумма затрат по периодам

$$l_{общ} = l_1 + l_{II(1)} + l_{II(2)}. \quad (25)$$

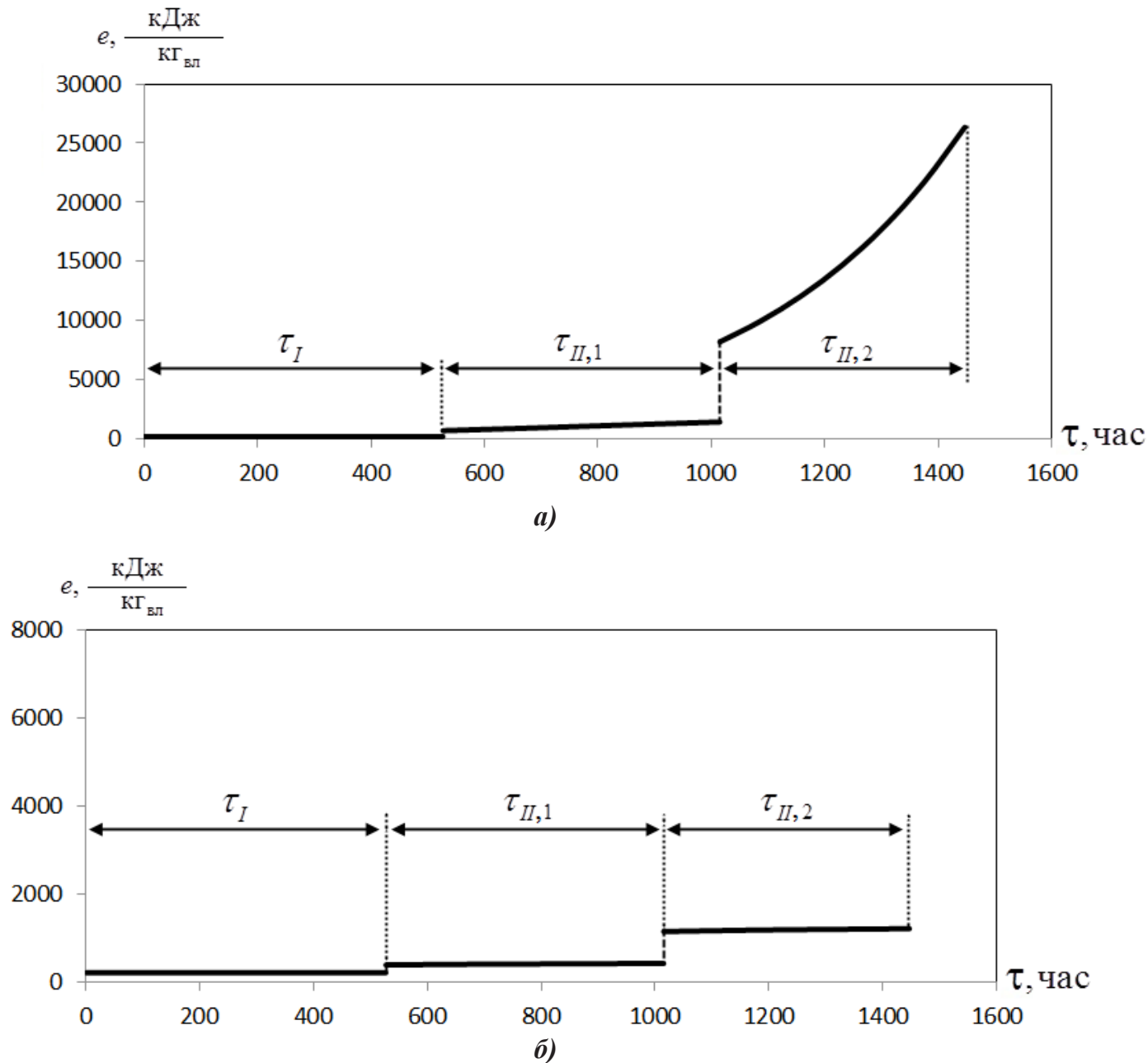
Общие затраты энергии на испарение 1 кг влаги за цикл

$$e_{общ} = l_{общ} / g_{вл} = l_{общ} / (W_H - W_K) \quad (26)$$

где  $g_{вл} = (W_H - W_K)$  содержание влаги на 1 кг сухого материала.

Расчеты показывают, что для схемы ТНСУ с полной рециркуляцией при принятых параметрах сушки, величина  $e_{общ1} = 2611,9$  кДж/кг<sub>вл</sub>, а для схемы ТНСУ с полной рециркуляцией и байпасированием теплового насоса –  $e_{общ2} = 401,2$  кДж/кг<sub>вл</sub>.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что применение схемы без байпасирования является неэффективным из-за больших затрат энергии на испарение влаги, особенно во втором полупериоде второго периода сушки. Эффективность работы схемы



**Рис. 7. Зависимость удельных затрат энергии на испарение влаги во временном интервале сушильного процесса.**

ТНСУ с байпасированием мало отличается от ее эффективности в периоде постоянной скорости сушки, данные по которой приведены в работе [1].

В связи с этим, для практического эксплуатации может быть рекомендована только схема теплонасосной сушилки древесины с полной рециркуляцией отработанного сушильного агента и частичным байпасированием теплово-

го насоса.

**Выводы**

1. Эффективность работы теплонасосных сушильных установок в периоде падающей скорости сушки существенно снижается по сравнению с первым периодом вследствие постепенного уменьшения количества испаряемой влаги, повышения температурного уровня технологического процесса и снижения отно-

сительной влажности сушильного агента.

2. Применение схемы установки без байпасирования является неэффективным из-за больших затрат энергии на испарение влаги, особенно во втором полупериоде второго периода сушки.

3. Частичное байпасирование теплового насоса позволяет существенно снизить общие затраты энергии на испарение 1 кг влаги за цикл вследствие повышения эффективности работы ТНСУ в периоде падающей скорости сушки. Общая эффективность работы установки такого схемного решения в 6,5 раз выше по сравнению с полнорециркуляционной установкой без байпасирования ТН.

4. Полученные значения удельных затрат энергии на испарения 1 кг влаги для всего сушильного процесса лишь незначительно отличаются от соответствующих затрат энергии для первого периода сушки. Это позволяет заключить, что для оценки эффективности работы теплонасосной сушилки с полной рециркуляцией отработанного сушильного агента и байпасированием теплового насоса за весь сушильный цикл могут быть использованы обширные данные, полученные в работе [1] для первого периода сушки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Безродный М.К., Кутра Д.С.* Эффективность применения тепловых насосов в установках сушки древесины. – Киев: Изд. «Політехніка», 2011. – 240 с.

2. *М.К. Bezrodny, D.S. Kutra.* Thermodynamic efficiency of heat pump dryers for drying of wood with the full recycling of the drying agent. VIII Minsk International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources”, Minsk, Belarus, 12-15 September, 2011. pp. 187 – 193.

3. *Bezrodny M.K., Kutra D.S.* Thermodynamic efficiency of heat pump dryer for drying of wood with full recycling and bypassing of the drying agent. «Innovations and Technologies News», 2011, № 3.

4. *Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки пиломатериалов / ОАО «Научдревпром – ЦНИИМОД».* – Архангельск, 2000. – 125 с.

5. *Шубин Г.С.* Сушка и тепловая обработка древесины. – М.: Лесная промышленность, 1990. – 336 с.

6. *Е.С. Богданов, В.А. Козлов, В.Б. Кунтыш, В.И. Мелехов.* Справочник по сушке древесины. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Лесная промышленность, 1990. – 394 с.

7. *Кречетов И.В.* «Сушка и защита древесины»: Учебник для техникумов. – М.: Лесная промышленность, 1987 – 328 с.

*Получено 13.02.2012 г.*