

УДК 674.047

Н. В. Мазаник, кандидат технических наук, доцент (БГТУ);
Д. П. Бабич, магистр технических наук, ассистент (БГТУ);
О. Г. Рудак, магистр технических наук, ассистент (БГТУ)

ПУТИ СНИЖЕНИЯ РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ СУШКЕ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ В КАМЕРАХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Изучена возможность применения конвертеров частоты вращения вентиляторов в конвективных сушильных камерах. Определены рациональные скорости перемещения сушильного агента через штабель. Показана эффективность использования конвертеров частоты для снижения расхода электроэнергии.

The possibility of using of fan frequency converters in convective drying kilns is investigated. The rational speed of the drying agent movement through the stack is defined. The efficiency of using frequency converter for reduction of energy consumption is shown.

Введение. В современных условиях постоянного роста цен на энергоносители вопросы энергосбережения приобретают ключевое значение с точки зрения обеспечения конкурентоспособности продукции деревообработки. Особенно заметный эффект мероприятия, направленные на снижение расхода энергии, имеют в таком энергоемком процессе, как сушка пиломатериалов. В настоящее время известно достаточно много способов уменьшения потребления тепловой энергии. К ним относятся:

- перевод сушильных камер, работающих на пару, на использование в качестве теплоносителя горячей воды;
- сокращение потерь тепловой энергии за счет улучшения теплоизоляции сушильных камер;
- повышение точности контроля и регулирования параметров сушильного агента;
- использование теплоты отработанного сушильного агента;
- использование солнечной энергии;
- применение конденсационных установок;
- внедрение осциллирующих и прерывистых режимов сушки.

В то же время гораздо более редкими являются исследовательские работы, направленные на оптимизацию потребления электрической энергии при сушке. Большинство из них концентрируются вокруг проблем сокращения аэродинамических потерь за счет оптимизации сечений циркуляционных каналов и совершенствования конструкций вентиляторов. Однако наиболее интересным и перспективным направлением исследований представляется разработка режимов сушки с регулируемой скоростью перемещения сушильного агента в штабеле пиломатериалов. Такое регулирование может быть реализовано путем включения в систему привода вентиляторов конвертеров, изменяющих частоту их вращения.

Основная часть. Высокая эффективность применения конвертеров частоты вращения

в сушильных камерах обусловлена законами пропорциональности расхода, давления, мощности и частоты, проиллюстрированными на рис. 1.

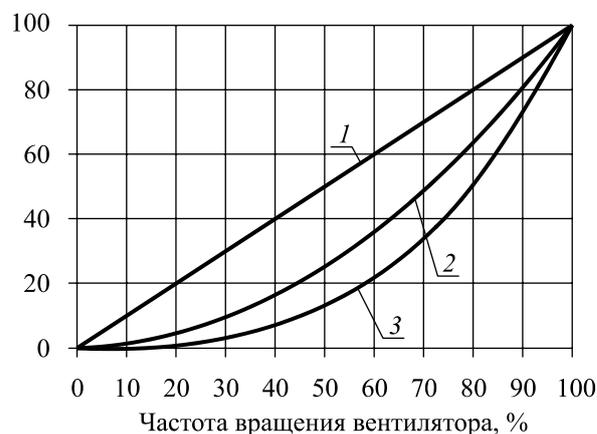


Рис. 1. Зависимость расхода, давления и энергопотребления вентилятора от частоты его вращения:

1 – расход; 2 – давление; 3 – энергопотребление

Так, очевидно, что расход воздуха может регулироваться путем изменения числа оборотов вентилятора. Однако в то время как при соотношении расход – частота вращения имеет место линейная зависимость, давление – частота вращения – квадратичная, то потребляемая вентилятором мощность при изменении частоты вращения изменяется пропорционально кубу этого изменения:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}; \quad (1)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2; \quad (2)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3, \quad (3)$$

где n_1 – номинальная скорость вращения вентиляторов; n_2 – пониженная скорость вращения вентиляторов; Q_1 – номинальный расход воздуха; Q_2 – пониженный расход воздуха; H_1 – номинальное давление; H_2 – пониженное давление; P_1 – номинальная мощность; P_2 – пониженная мощность.

Таким образом, при уменьшении частоты вращения вентилятора относительно номинального значения на 20% его производительность также уменьшается на 20% (т. е. до 80% от номинальной), в то же время потребление электроэнергии снижается уже на 50%.

Как известно, в настоящее время регламентируемыми параметрами режимов сушки являются температура, психрометрическая разность и относительная влажность сушильного агента. Стандартные режимы сушки, приведенные в руководящих технических материалах, разработаны для сушильных камер, обеспечивающих определенную скорость циркуляции воздуха. Для хвойных и мягких лиственных пород эта скорость составляет $1,0 \div 2,5$ м/с, для твердых лиственных пород – $0,8 \div 2,0$ м/с. При фактической скорости ниже или выше стандартного диапазона скорость сушки регулируют путем изменения психрометрической разности агента. В то же время у некоторых зарубежных производителей сушильных камер наблюдается тенденция к увеличению средней скорости потока агента в штабеле до 3–3,5 м/с. Поставщики оборудования заявляют о повышенной производительности таких камер. Для выяснения того, насколько обоснованным является такое утверждение, мы проанализировали влияние скорости циркуляции воздуха на скорость сушки сосновых пиломатериалов (рис. 2).

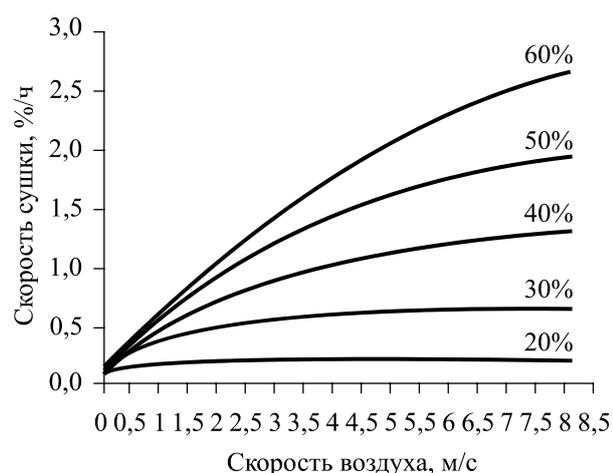


Рис. 2. Зависимость скорости сушки от скорости циркуляции воздуха в штабеле при различных значениях влажности пиломатериалов

Из графиков, представленных на рис. 2, можно видеть, что чем выше влажность древесины, тем сильнее влияет скорость циркуляции

на интенсивность десорбции. Это может быть объяснено тем фактом, что в начале процесса сушки влажность наружных слоев древесины высока, кроме того капиллярный подсос влаги из ближних слоев древесины полностью компенсирует потерю влаги за счет испарения. Таким образом, скорость испарения определяется в основном скоростью удаления молекул воды с поверхности циркулирующим потоком воздуха. По мере просыхания поверхностных слоев путь, который должна проходить влага для достижения поверхности, увеличивается, скорость сушки начинает зависеть в основном от процесса влагопроводности и становится малочувствительной к изменениям скорости циркуляции. Так, например, при влажности древесины ниже 30% изменения скорости воздушного потока в диапазоне 1,5–8 м/с практически не влияют на интенсивность испарения [1]. Таким образом, может быть сделан вывод о целесообразности уменьшения скорости циркуляции воздуха в камере по мере просыхания высушиваемого материала.

Мы произвели сравнительный анализ расхода электроэнергии на сушку пиломатериалов сосны толщиной 40 мм стандартным режимом и режимом, в котором производится поэтапное снижение частоты вращения вентиляторов по мере уменьшения влажности древесины. Расчет производился для камеры с пятью осевыми реверсивными вентиляторами с приводами от двигателей мощностью 3 кВт каждый. Суммарная установленная мощность, таким образом, составляла 15 кВт. Скорость сушильного агента в штабеле пиломатериалов при 100%-ной номинальной мощности вентиляторов равнялась 2,5 м/с (табл. 1).

Из таблицы можно видеть, что суммарные затраты электроэнергии на сушку пиломатериалов без использования конвертера частоты вращения вентиляторов составили 1215 кВт·ч, при применении регулирования частоты – 755,42 кВт·ч. Таким образом, экономия энергии составляет 37,8 %. Приведенный расчет убедительно доказывает целесообразность перевода сушильных камер на использование режимов сушки с регулируемой скоростью циркуляции агента. Однако возможность регуляции частоты вращения вентиляторов не менее важна даже при отсутствии специализированных режимов. Как известно, верхний предел скорости циркуляции в камере ограничивается требованиями обеспечения заданного качества сушки и зависит от породы и толщины пиломатериалов. Исследования, проведенные Центром лесной продукции Брукса и Политехническим институтом Виргинии [2], показали, что на первой ступени сушки оптимальной является скорость 1,8–2 м/с.

Таблица 1

**Сравнительный анализ энергозатрат на сушку
с регулированием частоты вращения вентиляторов и без него**

| Стадия цикла сушки | Текущая влажность материала, W , % | Продолжительность стадии цикла сушки, ч | Режим без регулирования частоты вращения вентиляторов | | Режим, предусматривающий регулирование частоты вращения вентиляторов | | |
|--------------------|--------------------------------------|---|---|------------------------------|--|---|------------------------------|
| | | | Скорость сушильного агента в штабеле, м/с | Расход электроэнергии, кВт·ч | Процент от номинальной частоты вращения вентиляторов, % | Скорость сушильного агента в штабеле, м/с | Расход электроэнергии, кВт·ч |
| Прогрев | 110 | 8 | 2,5 | 120 | 85 | 2,1 | 73,7 |
| 1 | 110-100 | 7 | 2,5 | 105 | 100 | 2,5 | 105,0 |
| 2 | 100-90 | 7 | 2,5 | 105 | 100 | 2,5 | 105,0 |
| 3 | 90-80 | 7 | 2,5 | 105 | 95 | 2,4 | 90,0 |
| 4 | 80-70 | 7 | 2,5 | 105 | 90 | 2,3 | 76,5 |
| 5 | 70-60 | 6 | 2,5 | 90 | 86 | 2,2 | 57,2 |
| 6 | 60-50 | 5 | 2,5 | 75 | 82 | 2,1 | 41,4 |
| 7 | 50-40 | 5 | 2,5 | 75 | 78 | 2,0 | 35,6 |
| 8 | 40-30 | 4 | 2,5 | 60 | 75 | 1,9 | 25,3 |
| 9 | 30-25 | 4 | 2,5 | 60 | 72 | 1,8 | 22,4 |
| 10 | 25-10 | 15 | 2,5 | 225 | 70 | 1,8 | 77,2 |
| ВТО | 10 | 2 | 2,5 | 30 | 80 | 2,0 | 15,4 |
| Кондиционирование | 10 | 2 | 2,5 | 30 | 80 | 2,0 | 15,4 |
| Охлаждение | 10 | 2 | 2,5 | 30 | 80 | 2,0 | 15,4 |
| <i>Итого</i> | | | | 1215,0 | | | 755,42 |

Данные результаты подтверждаются опытом других крупных производителей камер. Например, Muhlbock / Vanicek указывает на то, что максимально допустимой является величина 2–2,5 м/с и ее превышение приводит не только к ухудшению качества сушки, но и к сокращению ее скорости, поскольку на поверхности древесины при излишне большой скорости циркуляции образуется своеобразная «корка», препятствующая испарению [3]. При этом чем выше базисная плотность высушиваемой древесины, тем ниже должна быть скорость сушки и, соответственно, скорость циркуляции.

Однако известно, что при проектировании сушильных камер производители оборудования закладывают такие вентиляторы, которые по своим характеристикам способны обеспечить сушку самого быстросохнущего пиломатериала. За него обычно принимают сосновые доски толщиной 19–25 мм. При формировании штабеля из пиломатериалов большей толщины скорость циркуляции агента сушки в нем будет существенно выше оптимальной.

Чтобы продемонстрировать это, мы определили скорость циркуляции агента сушки в штабеле пиломатериалов при различном объеме циркулирующего воздуха ($V = 180$ тыс. м³/ч, $V = 190$ тыс. м³/ч, $V = 200$ тыс. м³/ч и $V = 210$ тыс. м³/ч). Расчет производился для камеры с поперечно-вертикальной циркуляцией

воздуха. Длина сушильного пространства камеры составляла 13 м, высота пакетных штабелей, уложенных без шпаций, – 3,225 м, толщина межрядовых прокладок 25 мм, межпакетных прокладок – 75 мм. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость скорости циркуляции сушильного агента в штабеле от толщины пиломатериалов

| Толщина пиломатериалов S , мм | Скорость циркуляции сушильного агента, м/с, при объеме циркулирующего воздуха, тыс. м ³ /ч: | | | |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|
| | 210 | 200 | 190 | 180 |
| 19 | 2,2 | 2,1 | 2,0 | 1,9 |
| 22 | 2,3 | 2,2 | 2,1 | 2,0 |
| 32 | 2,7 | 2,6 | 2,4 | 2,3 |
| 40 | 3,0 | 2,8 | 2,7 | 2,5 |
| 50 | 3,3 | 3,1 | 2,9 | 2,8 |
| 60 | 3,5 | 3,4 | 3,2 | 3,0 |

Можно видеть, что при любом рассмотренном объеме циркуляции скорость движения воздуха для части толщин материалов выходит за пределы оптимального диапазона 2–2,5 м/с (рис. 3). Таким образом, при сушке толстых досок возникает явный переизбыток мощности, который выливается в бесполезные затраты электрической энергии.

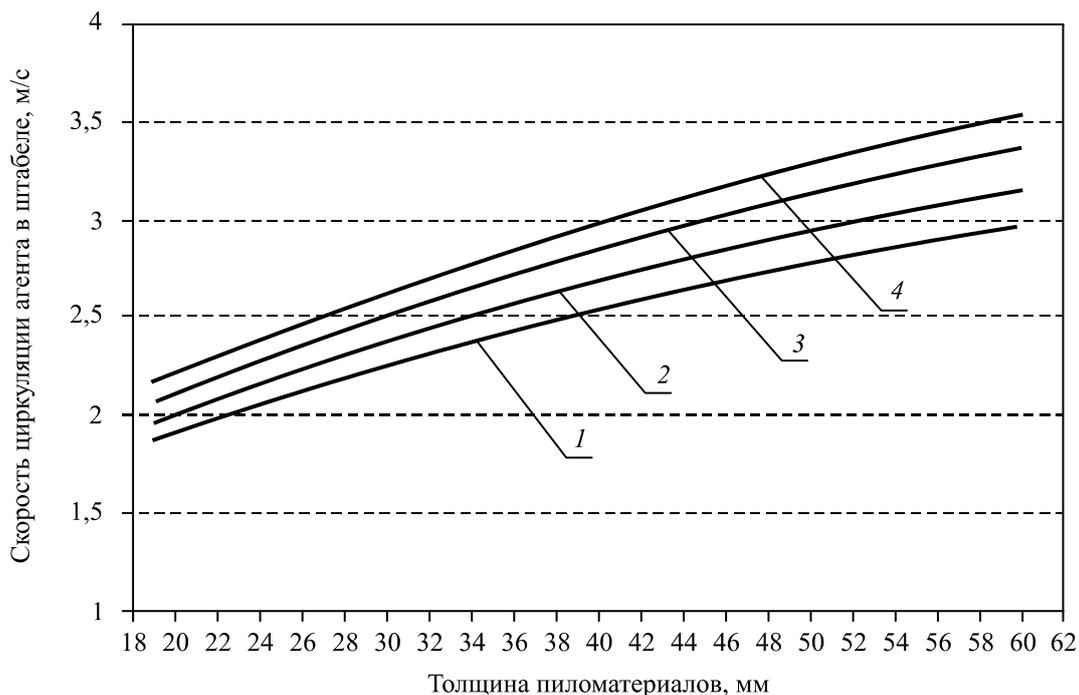


Рис. 3. Зависимость скорости циркуляции сушительного агента в штабеле от толщины пиломатериалов. Объем циркулирующего агента сушки: 1 – $V = 180$ тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$; 2 – $V = 190$ тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$; 3 – $V = 200$ тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$; 4 – $V = 210$ тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$

Таблица 3

Результаты расчета требуемой производительности вентиляторов для обеспечения скорости циркуляции агента в штабеле, равной 2,5 м/с

| Толщина пиломатериалов S , мм | Коэффициент заполнения штабеля по высоте β_v | Площадь живого сечения штабелей $f_{ш}$, м^2 | Требуемый объем циркуляции, тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$ | Процент использования номинальной производительности вентиляторов, % | Процент потребления установленной мощности приводов вентиляторов, % |
|---------------------------------|--|--|--|--|---|
| 19 | 0,402 | 26,38 | 237,4 | 100,0 | 100 |
| 25 | 0,465 | 23,93 | 215,3 | 90,7 | 73 |
| 32 | 0,522 | 21,72 | 195,4 | 82,3 | 53 |
| 40 | 0,572 | 19,77 | 178,0 | 75,0 | 43 |
| 50 | 0,620 | 17,93 | 161,3 | 68,0 | 32 |
| 60 | 0,657 | 16,52 | 148,6 | 62,6 | 23 |

В табл. 3 приведены результаты расчета, показывающего, на сколько может быть уменьшена производительность вентиляторов при условии, что в штабеле поддерживается постоянная скорость циркуляции, равная 2,5 м/с.

Заключение. Подводя итог вышесказанному, отметим, что регулирование скорости циркуляции агента сушки посредством использования конвертеров частоты вращения вентиляторов должно производиться в зависимости от трех факторов: породы пиломатериалов, их размерных характеристик и текущей влажности древесины. Как показали проведенные нами исследования, использование конвертеров позволяет существенно сократить расход электроэнергии на сушку пиломатериалов.

Литература

1. Steiner Y. Optimizing the air velocity in an industrial wood drying process: Master thesis // Department of ecology and natural resource management. Norwegian university of life sciences, 2008. 114 с.

2. Wengert E. M. Principles and practices of drying lumber // Brooks forest products center of Virginia, Virginia polytechnic institute. Lignomat, USA Ltd., 2006.

3. Muhlbock / Vanicek: классика сушки древесины [Электронный ресурс] // Оборудование и инструмент для профессионалов: электрон. версия газ. 2008. URL: <http://www.informdom.com/equipment/wood/article/538/> (дата обращения: 14.02.2014).

Поступила 26.02.2014