

DOI  
УДК 664.8/9

## АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ХМЕЛЕСУШИЛКИ С ЧАСТИЧНОЙ РЕКУПЕРАЦИЕЙ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

А. О. Васильев, К. В. Егоров, Р. В. Андреев, Н. Н. Пушкаренко, М. Н. Калимуллин

**Реферат.** Сушка является неотъемлемой частью технологического процесса производства товарного хмеля. В зависимости от объемов производства и уровня автоматизации процесса существует несколько способов высушивания шишек хмеля, среди которых можно отметить конвективный, микроволновой и сублимационный. При этом сушилки обладают разными соотношениями качества и производительности. Снижение энергозатрат на сушку хмеля представляет собой важное направление в развитии хмелеводства. В связи с этим модернизация и анализ производительности хмелесушилок является актуальной задачей в текущих условиях удорожания производства. Цель исследования – анализ производительности хмелесушилки МХС-25, модернизированной путем установки теплового насоса в контур циркуляции воздуха и обладающей настраиваемой рекуперацией тепловой энергии. Температура воздуха в сушильной камере контролировалась в диапазоне  $60 \pm 2^\circ\text{C}$ . Время предварительного нагрева, необходимое для достижения температуры воздуха, составило примерно 0,5 часа, что соответствует приблизительно 5% от общего времени сушки хмеля. Сравнение измеренных значений энергопотребления с расчетными показало, что экспериментальные значения находились в диапазоне от 10,2 кВт·ч до 11,5 кВт·ч, что в среднем за время эксперимента составило приблизительно 10,85 кВт·ч. Соответственно, расчетные значения находились в пределах 8,9 кВт·ч и 10,2 кВт·ч при среднем значении 9,55 кВт·ч. Ряд экспериментов по сравнению производительности сушки с использованием частично разомкнутого цикла показал, что достижении температуры окружающей среды  $24^\circ\text{C}$  и влажности 53% максимальное значение относительной скорости влагоотделения достигало  $6,23 \text{ кг}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$  с коэффициентом обхода 0,86, что было выше, чем для сушки с полностью замкнутым циклом  $5,54 \text{ кг}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ . Система с частичной рекуперацией тепла превосходит систему с полной рекуперацией с точки зрения энергоэффективности и повышения производительности сушки хмеля.

**Ключевые слова:** хмель, сушка, моделирование, тепломассоперенос.

**Введение.** Сушка является одним из самых энергоемких процессов, на долю которого приходится до 15–25% общего энергопотребления в хмелеводстве [1]. Сушка хмеля осуществляется несколькими способами, такими как воздушный, тепловой, вакуумный, СВЧ, из которых преимущественным является воздушный. Поэтому целесообразно проведение ряда исследований, направленных на повышение производительности этого простого, но достаточно энергоемкого процесса [2].

Системы сушки хмеля, основанные на принципе использования низких температур находят незначительное внедрение. В связи с этим становится актуальной задача разработки оптимизированной системы сушки, в которой этот процесс происходит с рекуперацией, или использованием остаточного тепла [3]. Оценка такой системы должна включать сравнение затрат и выручки, при которых комбинация использования атмосферного воздуха и остаточного тепла имеет экономический смысл [4].

Традиционный процесс сушки имеет существенный недостаток, связанный с относительно высоким энергопотреблением. Кроме этого, он обладает низким термическим КПД [5]. Это в значительной мере обусловлено выбросом недоувлажненного воздуха из сушильных камер, особенно на финальных этапах сушки. С другой стороны, использование сушилок с рекуперацией тепла может использовать оставшееся тепло отработанного воздуха для повышения эффективности процесса сушки. Сушилки данного типа, ко всему прочему, имеют

также ряд других преимуществ, такие как более высокая удельная скорость извлечения влаги, лучшее качество продукта сушки, отсутствие пересушивания и т. д. [6].

Рассматривая сушилки с точки зрения использования рекуперации тепла, можно выделить в них три типа: разомкнутого типа, частично разомкнутого типа и замкнутого типа.

Для сушилок разомкнутого типа существенными являются факторы состояния окружающей среды, поскольку в этом случае окружающий воздух является начальным источником тепла. Они имеют низкую производительность в сырую холодную погоду. В связи с этим были предложены некоторые решения для поддержки повышенной производительности при желаемой температуре сушки при негативных метеорологических условиях. Например, [7] представлена конструкция сушилки с двумя режимами сушки. Режим работы менялся между одноступенчатым и каскадным циклами, чтобы удовлетворить потребность в осушении при различных температурах окружающей среды. Однако такой подход при всех своих преимуществах не позволил повысить энергоэффективность и потребовал значительных стартовых вложений.

Рабочее пространство сушилок с замкнутым контуром полностью изолировано от окружающей среды, при этом рекуперация тепла достигается за счет рециркуляции возвратного воздуха сушильной камеры. Процесс характеризуется широким диапазоном условий сушки, и поэтому изучается и находит широкое применение в условиях холодного и

переменного климата, является приемлемым для термочувствительных материалов, требующих стабильных значений температур сушки, каким является пивоваренный хмель.

Из-за особенностей замкнутого контура избыточное тепло, вырабатываемое компрессорами, имеет особенность теряться через конденсаторы, что снижает энергоэффективность таких систем. Например, сообщалось, что тепло, отводимое от внешнего конденсатора, составляло не менее 35% от общей тепловой энергии, используемой для сушки хмеля, при использовании воздуха в качестве сушильной среды [8].

Чтобы синтезировать преимущества различных схем, были предложены сушилки с частично разомкнутым контуром, которые тщательно исследовались в России и за рубежом. Например, была разработана [9] и протестирована сушилка с частично разомкнутым контуром, при использовании которой энергопотребление снизилось на 32,55% по сравнению с обычной сушилкой горячим воздухом. Кроме этого, были теоретически рассчитаны [10] тепловые характеристики сушилок такого типа и обнаружено, что при температуре

окружающего воздуха от 8°C до 33°C их использование более эффективно.

Несмотря на наличие ряда обширных исследований, существует необходимость дальнейшего улучшения характеристик сушилок воздушного типа с частичной рекуперацией тепла и их внедрению в производство сельскохозяйственной продукции.

Цель исследования - анализ производительности хмелесушилки МХС-25, модернизированной путем установки теплового насоса в контур циркуляции воздуха и обладающей настраиваемой рекуперацией тепловой энергии.

**Условия, материалы и методы.** Исследуемая сушилка представляет собой мобильную сушильную камеру стеллажного типа, предназначенную для сушки хмеля в непосредственной близости к месту расположения хмельников. Данная хмелесушилка была установлена в ангаре с доступом атмосферного воздуха для смешивания с целью повышения энергоэффективности системы, избегая при этом прямого влияния условий окружающей среды. Принцип работы этой системы представлен следующим образом (рис.1).

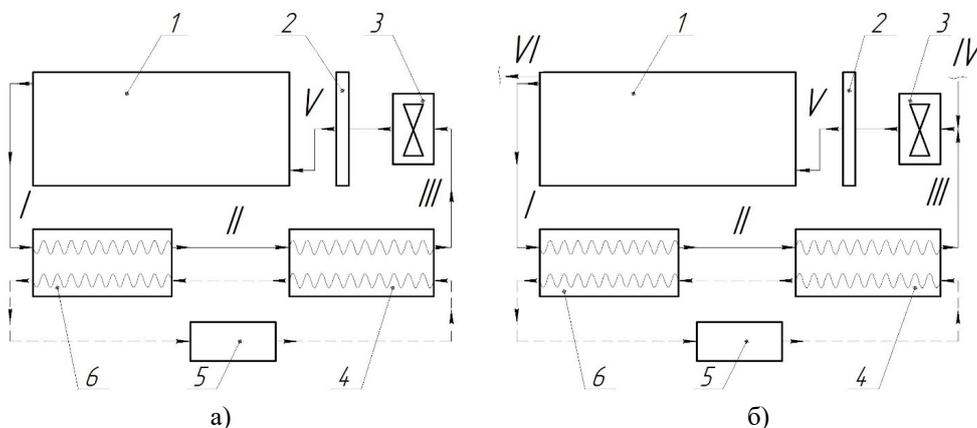


Рисунок 1 – Принципиальная схема работы хмелесушилки: а) – с полной рекуперацией, б) – с частичной рекуперацией: I –увлажненный воздух, II – охлажденный воздух, III – осушенный подогретый воздух, IV – атмосферный воздух, V- осушенная смесь атмосферного и охлажденного отработавшего воздуха, VI – воздух, выбрасываемый в окружающую среду; 1 – сушильная камера, 2 – подогреватель, 3 – вентилятор, 4 – конденсатор, 5 – компрессор, 6 – испаритель.

Воздушный цикл хмелесушилки с полной рекуперацией (рис. 1а) замкнут. В сушильную камеру 1 подается нагретый радиатором 2 осушенный воздух (V). После прохождения через насыпь хмеля и насыщения влагой отработавший воздух (I) поступает в испаритель 6, где его температура понижается и отделяется накопленная влага. На выходе из испарителя охлажденный воздух (II) подогревается теплом конденсатора 4 и вентилятором 3 осушенный подогретый воздух (III) нагнетается в сушильную камеру, пройдя дополнительный подогрев в радиаторе 2. При этом температура контролируется включением и выключением компрессора 5 для отвода избыточного тепла от хладагента, которое равно разнице между потреблением энергии, включая вентиляторы

3 и компрессоры 5, и явным теплом воды, конденсируемой испарителями 6. Воздушный цикл хмелесушилки с частичной рекуперацией (рисунок 1б) осуществляется схожим образом. Одновременно с осушенным подогретым воздухом (III) в сушильную камеру нагнетается также и атмосферный воздух (IV), где происходит их смешивание в определенном соотношении, регулируемом для контроля температуры и влажности приточного воздуха (V) в сушильную камеру. При этом количество приточного воздуха и отработанного воздуха, выбрасываемого в окружающую среду одинаковы (VI). Воздушный цикл хмелесушилки с полной рекуперацией частично открыт, в отличие от предыдущей схемы.

Удельное энергопотребление можно использовать как меру теплового КПД хмелесушилки. Соответственно, при достижении рабочего диапазона температур, воздушный цикл на психрометрической диаграмме может быть представлен в зависимости от цикла сушки. В хмелесушилке с полной рекуперацией, (рис. 2а), подогретый подсушенный воздух проходит через сушильную камеру, получает влагу из хмеля и одновременно охлаждается (V-I). После этого влажный воздух из сушильной камеры поступает в испаритель, где осушается за счет конденсации (I-II). Далее

происходит нагрев сначала в конденсаторе, затем в радиаторе (II-III) и (III-V), после чего цикл повторяется. Для воздушного цикла хмелесушилки с частично разомкнутым циклом (рис. 2б), который отличается от предыдущего тем, что смешанный воздух состоит из атмосферного воздуха (IV-V) и воздуха, прошедшего через испаритель (III-V). Этой смеси передается тепло конденсатора, после чего происходит нагнетание вентилятором с последующим подогревом в радиаторе в сушильную камеру, что соответствует изотермическому процессу (II-III-V).

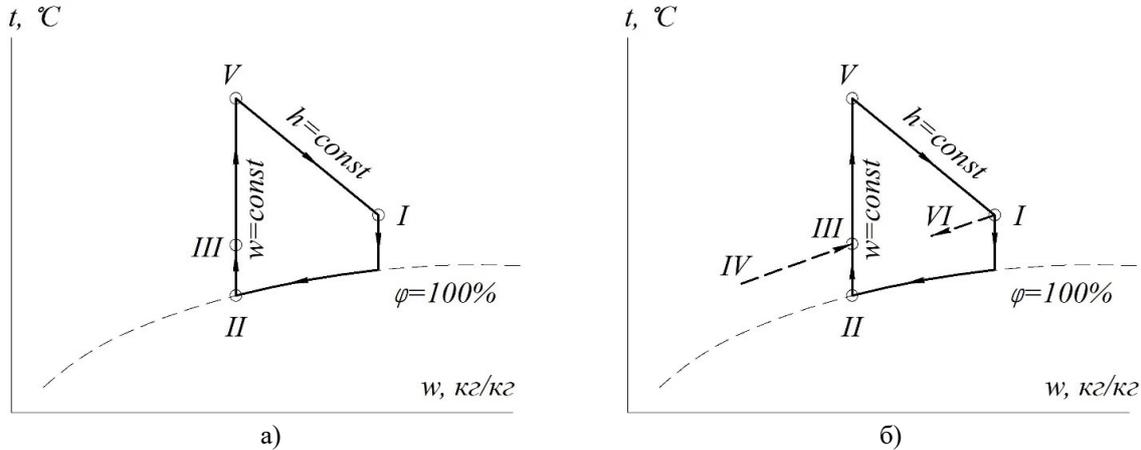


Рисунок 2 – Психрометрическая диаграмма цикла сушки хмеля: а) – при замкнутом цикле, б) – при частично разомкнутом цикле: I – увлажненный воздух, II – охлажденный воздух, III – осушенный подогретый воздух, IV – атмосферный воздух, V – осушенная смесь атмосферного и охлажденного отработавшего воздуха, VI – воздух, выбрасываемый в окружающую среду;  $h$  – энтальпия воздуха,  $t$  – температура воздуха,  $w$  – влагосодержание воздуха,  $\phi$  – относительная влажность воздуха

Общая методология, использованная в нашем исследовании, берет начало с разработки системы моделирования хмелесушилки с полной рекуперацией, за которой последовало экспериментальное исследование, проведенное на видоизмененном прототипе существующей экспериментальной хмелесушилки МХС-25. Для дальнейшего облегчения численной оценки производительности предлагаемая система моделирования была сначала проверена с использованием экспериментальных результатов вместе с выбором ряда ключевых показателей эффективности. На основе действующей системы моделирования и ключевых показателей эффективности была проведена серия исследований для изучения тепловых характеристик хмелесушилки при различных рабочих параметрах. Для количественной оценки энергетической выгоды также было проведено сравнение тепловых характеристик обеих систем.

Процесс сушки хмеля считался изоэнтальпийным процессом, как описано в уравнении (1). Учитывая общую скорость удаления влаги системой осушения, а также скорость удаления влаги  $v$  можно установить, как представлено в уравнении (2).

$$h_V = h_I \quad (1)$$

$$v = t \cdot m \cdot (w_I - w_V) \quad (2)$$

где  $h_I, h_V$  – энтальпия воздуха на выходе и на входе сушильной камеры соответственно, Дж/кг;  $t$  – время сушки хмеля, ч;  $m$  – массовый расход воздуха, кг;  $w_I, w_V$  – влагосодержание воздуха на выходе и на входе сушильной камеры соответственно, кг/кг. Коэффициент обхода  $k$  в системе можно определить с помощью уравнения (3):

$$k = \frac{m_I - m_{II}}{m_I} \quad (3)$$

где  $m_I, m_{II}$  – массовый расход воздуха, увлажненного после прохождения сушильной камеры и высушенного воздуха соответственно, кг. Влажный воздух, возвращавшийся из сушильной камеры, охлаждался и осушался хладагентом в испарителе. В результате прохождения через испаритель относительная влажность воздуха принималась равной 100% (рис. 2), а его температура соответствовала температуре воздуха на выходе из испарителя. Таким образом, используя диаграмму, можно получить энтальпию воздуха на входе и на выходе из испарителя, а также энтальпию конденсата,

которую целесообразно использовать для определения скорости теплопередачи  $Q$  согласно выражению:

$$Q = m_I(1-k)(h_I - h_{II}) - \frac{v \cdot h_k}{t}, \quad (4)$$

где  $h_I, h_{II}$  – значения энтальпии на входе и на выходе из испарителя соответственно, Дж/кг;  $h_k$  – энтальпия конденсата, Дж/кг.

На основе значений влажности воздуха на входе и на выходе из испарителя можно рассчитать степень удаления влаги испарителем, как описано в уравнении

$$v_B = t \cdot m_I(1-k)(w_I - w_{II}). \quad (5)$$

Для хмелесушилки с частично разомкнутым циклом агентом сушки выступала смесь воздуха из выхода конденсатора и атмосферного воздуха. Предполагалось, что часть воздуха, выходящего из сушильной камеры, выводится в окружающую среду для возможности подачи атмосферного воздуха на следующий цикл.

Учитывая вышесказанное, скорость удаления влаги из свежего воздуха определяется выражением

$$v_0 = t \cdot m_0(w_{II} - w_{IV}). \quad (6)$$

где  $m_0$  – массовый расход атмосферного воздуха, кг,  $w_{II}, w_{IV}$  – влагосодержание воздуха на выходе из компрессора и в окружающем воздухе соответственно, кг/кг.

Таким образом, с учетом (5) и (6) общая скорость удаления влаги системой представляет собой сумму скоростей удаления влаги из

свежего воздуха и испарителя. Для облегчения оценки производительности системы были выбраны ключевые показатели эффективности.

Удельная скорость удаления влаги:

$$n = \frac{m_I}{E}, \quad (7)$$

где  $E$  – общий расход электроэнергии, включая компрессор и вентилятор, кВт·ч.

Коэффициент производительности:

$$K = \frac{Q}{E}. \quad (8)$$

Коэффициент производительности отражает производительность хмелесушилки с частичной и полной рекуперацией.

Эти ключевые показатели эффективности широко использовались для оценки энергоэффективности в общедоступных источниках.

Габариты экспериментальной хмелесушилки составили 4 м (длина) × 2,5 м (ширина) × 2,5 м (высота).

Отработавший воздух из сушильной камеры охлаждался и осушался испарителями, а затем согревался в конденсаторе. Атмосферный воздух подавался в сушильную камеру и регулировался специальной заслонкой. Атмосферный воздух и воздух из конденсатора смешивались и подавались в подогреватель. После нагрева смешанного воздуха он снова подавался в сушильную камеру для сушки хмеля.

Чтобы получить четкое представление о характеристиках работы такой системы, была изучена серия случаев при различных температурах окружающей среды (табл.). В каждом случае исследовалась производительность системы.

Таблица – Значения параметров окружающего воздуха

Кодовое обозначение	Температура, °C	Влажность, %	Атмосферное давление, кПа
B1	10	80	98,92
B2	14	83	98,92
B3	18	75	99,05
B4	21	61	99,05
B5	24	53	99,05

В хмелесушилке на разной высоте по направлению движения воздуха было установлено три датчика температуры (Т1, Т2 и Т3) и влажности (Н1, Н2 и Н3) для определения параметров воздуха. Потребляемая мощность компрессора, вентилятора и электронагревателя определялась с использованием счетчика электроэнергии CE101 R5 145 М6. Датчики температуры и влажности были объединены в систему под управлением блока Arduino.

Значения были собраны с помощью инструмента сбора данных (MS Excel).

**Анализ и обсуждение результатов.** Представлены профили температуры и относительной влажности воздуха в сушильной камере в процессе сушки (рис.3). Температура воздуха в сушильной камере успешно контролировалась в диапазоне  $60 \pm 2^\circ\text{C}$ . Время предварительного нагрева, необходимое для достижения температуры воздуха, составило примерно

0,5 часа, что соответствует приблизительно 5% от общего времени сушки хмеля. Примерно через 7 ч в процессе сушки прерывистое включение-выключение кондиционера привело к незначительным колебаниям температуры и влажности воздуха в сушильной камере, что нашло подтверждение

в источнике [11]. При этом отклонения были незначительными, что свидетельствует о стабильном процессе сушки хмеля. За счет удаления влаги из хмеля в процессе сушки влажность воздуха постепенно снизилась приблизительно с 90% до 12%.

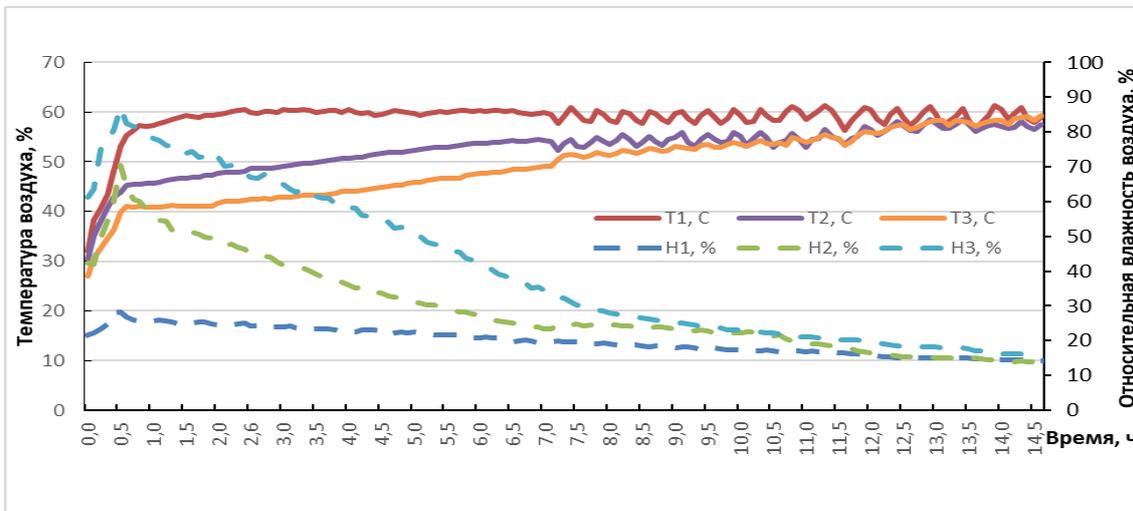


Рисунок 3 – График изменения температуры и влажности в хмелесушилке:  
T1, T2, T3 – температура воздуха на нижнем, среднем и верхнем ярусах сушилки соответственно, H1, H2, H3 – относительная влажность воздуха на нижнем, среднем и верхнем ярусах сушилки соответственно

В результате экспериментов были измерены потребление электроэнергии и коэффициент производительности. Температура и влажность атмосферного воздуха были измерены экспериментально, они менялись в зависимости от времени суток. Показано сравнение измеренных значений энергопотребления с расчетными, полученными теоретическим способом (рис.4). Экспериментальные значения находились в диапазоне от 10,2 кВт-ч до

11,5 кВт-ч, что в среднем за время эксперимента составило приблизительно 10,85 кВт-ч. Соответственно, расчетные значения находились в пределах 8,9 кВт-ч и 10,2 кВт-ч при среднем значении около 9,55 кВт-ч. Среднеквадратическая ошибка, рассчитанная для этих значений, составила 1,41. Данное отклонение может быть связано с потерями тепла через неплотности и стенки сушильной камеры.

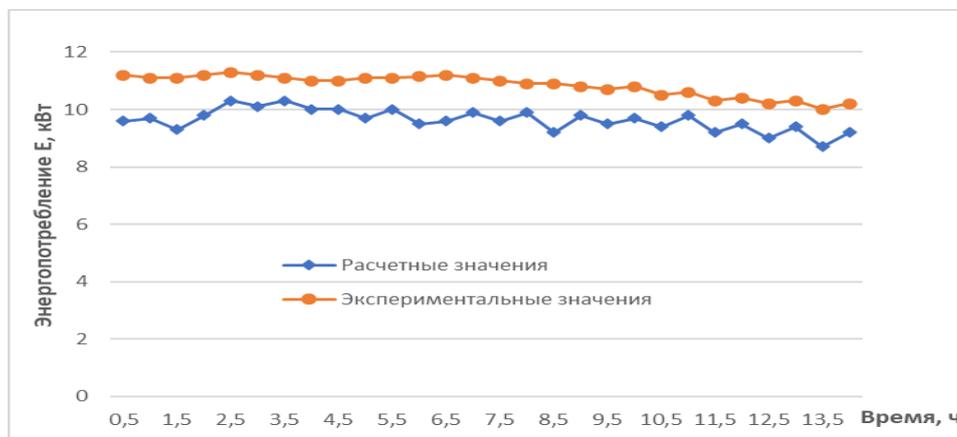


Рисунок 4 – График энергопотребления электрооборудования

Сравнение коэффициента производительности показывает соответствие измеренных значений расчетным. Измеренные и расчетные значения находились в пределах от 0,89 до 0,95 и от 0,87 до 0,96 соответственно, а значение среднеквадратического отклонения составило 0,06. На основании вышеизложенного

можно сделать вывод, что приведенная теоретическая модель может обеспечить надежный прогноз энергоэффективности для определения производительности хмелесушилок и, следовательно, может использоваться для дальнейшего анализа производительности хмелесушилок с рекуперацией тепла.

Представлены значения удельной скорости удаления влаги в зависимости от коэффициента обхода при различных состояниях окружающего воздуха (рис.5). В случае полной рекуперации ( $k=0$ ) состояние окружающей среды не оказывало влияния на удельную скорость удаления влаги. По мере увеличения коэффициента обхода наблюдалось повышение значений этого показателя до некоторого экстремума, затем снижение при значениях  $k=100\%$ , что соответствовало полностью разомкнутому циклу в хмелесушилке. При этом более высокие значения удельной скорости удаления влаги обнаружались при более высокой температуре окружающей среды. С изменением параметров окружающей среды до состояния В5 (табл.) максимальное значение относительной скорости влагоотделения достигало

6,23 кг/(кВт·ч), что соответствовало значению коэффициента обхода 0,86, что было выше, чем для сушки с полной рекуперацией 5,54 кг/(кВт·ч) независимо от состояния окружающей среды В1-В5 (табл.). Очевидна некоторая разница: полное энергопотребление для хмелесушилки с частичной рекуперацией и коэффициентом обхода 0,86 оказалось ниже, чем для случая с полной рекуперацией. С увеличением температуры окружающей среды энергопотребление имеет тенденцию к снижению. Следует отметить, что при пониженных значениях температуры окружающей среды (В1) удельная скорость удаления влаги снижалась до 5,38 кг/(кВт·ч), поэтому в этом случае использование замкнутого цикла хмелесушилки ( $k=0$ ) оказалось несколько более выгодным, чем разомкнутого ( $k=1\%$ ).

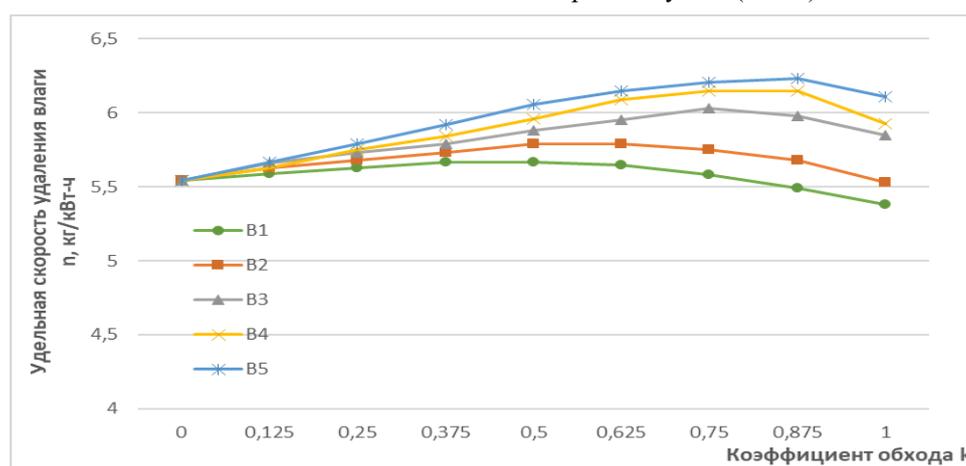


Рисунок 5 – График зависимости удельной скорости удаления влаги от коэффициента обхода при различных параметрах окружающего воздуха: В1-В5 – кодовые обозначения параметров (табл.)

Состояние окружающей среды оказывало наибольшее влияние на производительность хмелесушилки с частично разомкнутым и полностью разомкнутым циклами сушки, особенно характерно это проявляется при значениях коэффициента обхода в диапазоне  $k=0,75...1$ . Разница в скорости удаления влаги при этом достигала 13% (с 5,50 до 6,23 кг/кВт·ч). В каждом случае наблюдалась тенденция к снижению этого показателя. Когда был принят коэффициент обхода, соответствующий максимальному значению относительного влагоотделения, коэффициент производительности достигал 0,79, тогда как для цикла сушки с полной рекуперацией составлял лишь приблизительно 0,5.

**Выводы.** Анализ производительности хмелесушилки МХС-25, модернизированной путем установки теплового насоса в контур циркуляции воздуха и обладающей настраиваемой рекуперацией тепловой энергии показал преимущества применения частично

разомкнутого цикла сушки. Сформированная теоретическая модель позволила рассчитать значение энергопотребления, среднее значение которого составило 9,55 кВт·ч. Сравнение измеренных значений энергопотребления с расчетными показало, что экспериментальные значения находились незначительные отклонения со среднеквадратической ошибкой, 1,41. Значения удельной скорости удаления влаги при использовании частично разомкнутого цикла сушки достигали 6,23 кг/(кВт·ч), что соответствовало значению коэффициента обхода 0,86. При этом для сушки с полностью замкнутым циклом это значение достигало 5,54 кг/(кВт·ч) независимо от состояния окружающей среды. Отмечается, что при пониженных значениях температуры окружающей среды удельная скорость удаления влаги снижалась до 5,38 кг/(кВт·ч), поэтому в этом случае использование замкнутого цикла хмелесушилки оказалось несколько более выгодным, чем полностью разомкнутого.

#### Литература

1. Исследование технологического процесса сушки хмеля в сушилке ПХБ-750 / А. О. Васильев, Р. В. Андреев, Е. П. Алексеев [и др.] // Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 1(8). С. 96-102.
2. Оськин С. В., Цокур Д. С., Лоза А. А. Параметры сушилки сельскохозяйственной продукции // Вестник Казанского ГАУ № 3(75) 2024

Техника и оборудование для села. 2022. № 11(305). С. 40-43.

3. Лакомов И. В., Помогаев Ю. М. Энергетическая эффективность применения тепловых насосов при сушке сельскохозяйственного сырья // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2017. № 1(52). С. 109-113.

4. Учетное обеспечение обоснования затрат хмелеводства при его государственном субсидировании (на примере Чувашской Республики) / Е. А. Иванов, Л. Ю. Малинина, Н. Н. Пушкаренко [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2021. Т. 16. № 4(64). С. 96-104. – doi: 10.12737/2073-0462-2022-96-104.

5. Лакомов И. В., Помогаев Ю. М. Принципы энергосберегающей технологии сушки // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2016. № 1(48). С. 70-74.

6. Испытание мобильной хмелесушилки с оптимизированным тепловым балансом / А. О. Васильев, Р. В. Андреев, Е. П. Алексеев и др. // Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. № 3(14). С. 74-80.

7. Design and experimental study of an air source heat pump for drying with dual modes of single stage and cascade cycle / S. Jiubing, G. Ting, T. Yafen, et al. // Applied Thermal Engineering. 2017. vol.129. P. 280-289.

8. Plando, Jr. Performance Evaluation of Heat Pump Systems for Cold Climate Regions. International // Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology. 2023. Vol.07. P.872-876.

9. Performance Analysis of Heat Pump Dryer with Unit-Room in Cold Climate Regions / Y. Qingyun, C. Lin, L. Mao, et al. // Energies. 2019. 12(16):3125.

10. Thermal characteristics of a novel enclosed cascade-like heat pump dryer used in a tunnel type drying system / D. Quancheng, W. Dechang, Li Xuerui, et al. // Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 155. P.206-216.

11. Исследование параметров работы дегидрататора для реализации конвективной сушки влажосодержащих пищевых продуктов / Е. Н. Неверов, И. А. Короткий, А. К. Горелкина, А. Е. Задесенец и др. // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 2(70). С. 466-479.

#### Сведения об авторах:

Васильев Александр Олегович - кандидат технических наук, доцент кафедры технического сервиса, e-mail: 3777222@bk.ru

Егоров Кирилл Викентиевич – аспирант кафедры технического сервиса, e-mail: egorovkirill2018@mail.ru

Андреев Роман Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры технического сервиса, e-mail: rv\_andreev@mail.ru

Пушкаренко Николай Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технического сервиса, e-mail: stl\_mstu@mail.ru

Чувашский государственный аграрный университет, г. Чебоксары, Россия

Калимуллин Марат Назипович – доктор технических наук, первый проректор—проректор по научной работе и цифровой трансформации, доцент, профессор кафедры эксплуатации и ремонта машин, e-mail: marat-kmn@yandex.ru

Казанский государственный аграрный университет, г. Казань, Россия.

### ANALYSIS OF HOP DRYER PERFORMANCE WITH PARTIAL THERMAL ENERGY RECOVERY

A. O. Vasilev, K. V. Egorov, R. V. Andreev, N. N. Pushkarenko, M. N. Kalimullin

**Abstract.** Drying is an integral part of the technological process of commercial hop production. Depending on the production volume and the level of automation of the process, there are several ways to dry hop cones, including convective, microwave and sublimation. At the same time, dryers have different ratios of quality and productivity. Reducing energy costs for drying hops is an important area in the development of hop growing. In this regard, modernization and analysis of the productivity of hop dryers is a pressing issue in the current conditions of rising production costs. The aim of the research is to analyze the productivity of the MXS-25 hop dryer, modernized by installing a heat pump in the air circulation circuit and having adjustable heat recovery. The air temperature in the drying chamber was successfully controlled in the range of  $60 \pm 2$  °C. The preheating time required to achieve the air temperature was approximately 0.5 hours, which corresponds to approximately 5% of the total hop drying time. Comparison of the measured and calculated energy consumption values showed that the experimental values were in the range of 10.2 kWh to 11.5 kWh, averaging approximately 10.85 kWh during the experiment. Accordingly, the calculated values were in the range of 8.9 kWh and 10.2 kWh, averaging 9.55 kWh. A series of experiments comparing the drying performance using partial recovery showed that with an increase in the ambient temperature to 24 °C, the maximum relative moisture separation rate reached 6.23 kg/(kWh) with a bypass ratio of 0.86, which was higher than that of 5.54 kg/(kWh) for drying with full recovery. The partial heat recovery system is superior to the full recovery system in terms of energy efficiency and increased hop drying performance.

**Key words:** hops, drying, modeling, heat and mass transfer.

#### References

1. Vasilev AO, Andreev RV, Alekseev EP. [Study of the technological process of drying hops in the PKhB-750 dryer]. Vestnik Chuvashskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2019; 1(8). 96-102 p.

2. Oskin SV, Tsokur DS, Loza AA. [Parameters of the agricultural product dryer]. Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2022; 11(305). 40-43 p.

3. Lakomov IV, Pomogaev YuM. [Energy efficiency of using heat pumps in drying agricultural raw materials]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2017; 1(52). 109-113 p.

4. Ivanov EA, Malinina LY, Pushkarenko NN. [Accounting support for the justification of the costs of hop farming with its state subsidies (on the example of the Chuvash Republic)]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021; Vol. 16. 4(64). 96-104 p. – doi: 10.12737/2073-0462-2022-96-104.

5. Lakomov IV, Pomogaev YuM. [Principles of energy-saving drying technology]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2016; 1(48). 70-74 p.

6. Vasilev AO, Andreev RV, Alekseev EP. [Testing of a mobile hop dryer with optimized heat balance]. Vestnik Chuvashskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2020; 3(14). 74-80 p.

7. Jiubing S, Ting G, Yafen T. Design and experimental study of an air source heat pump for drying with dual modes of single stage and cascade cycle. Applied thermal engineering. 2017; Vol.129. 280-289 p.

8. Plando Jr. Performance evaluation of heat pump systems for cold climate regions. International Journal of advanced research in science, communication and technology. 2023; Vol.07. 872-876 p.
9. Qingyun Y, Lin C, Mao L. Performance analysis of heat pump dryer with unit-room in cold climate regions. Energies. 2019; 12(16): 3125.
10. Quancheng D, Dechang W, Xuerui Li. Thermal characteristics of a novel enclosed cascade-like heat pump dryer used in a tunnel type drying system. Applied thermal engineering. 2019; Vol.155. 206-216 p.
11. Neverov EN, Korotkiy IA, Gorelkina AK, Zadesenets AE. [Study of the operating parameters of a dehydrator for the implementation of convective drying of moisture-containing food products]. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie. 2023; 2(70). 466-479 p

**Authors:**

Vasilev Aleksandr Olegovich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Service, e-mail: 3777222@bk.ru

Egorov Kirill Vikentievich – postgraduate student of the Department of Technical Service, e-mail: egorovkirill2018@mail.ru

Andreev Roman Viktorovich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Service, e-mail: rv\_andreev@mail.ru

Pushkarenko Nikolay Nikolaevich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Service, e-mail: stl\_mstu@mail.ru

Chuvash State Agrarian University, Cheboksary, Russia

Kalimullin Marat Nazipovich – Doctor of Technical Sciences, First ViceRector - Vice-Rector for Research and Digital Transformation, Associate Professor, Professor of the Department of Operation and Repair of Machines, e-mail: marat-kmn@yandex.ru

Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.