

Ярусная хмелесушилка с источниками диэлектрического и конвективного нагрева (Просвирякова М.В., Горячева Н.Г., Михайлова О.В., Новикова Г.В., Уманский П.М.)

Процесс сушки является самым энергоемким в технологии переработки хмеля. При хранении хмеля-сырца из-за высокой влажности (76-82%) наблюдается самосогревание и ухудшение качества сырья, т.е. происходит окисление горьких веществ, а значит, снижение содержания альфа-кислоты и мягких смол, испарение и окисление эфирных масел. В настоящее время свежееубранные шишки хмеля сушат в хмелесушилках разного конструкционного исполнения, в том числе в хмелесушилке ХС-400, где реализован конвективный способ подвода тепла.

Конвективный способ сушки не обеспечивает полного сохранения потребительских свойств шишек хмеля, а именно биохимических и органолептических показателей. Даже при благоприятных условиях качество сушки остается низким из-за неравномерности сушки хмеля, связанные с неоднородностью структуры шишки, неравномерностью толщины слоя хмеля и неравномерным распределением нагретого воздуха в камере. Энергетические затраты на единицу продукции остаются высокими, а из-за нарушения технологии сушки до 40% первосортного хмеля классифицируется как второй сорт.

Сохранение естественного цвета, блеска, аромата, липкости, содержания лупулина возможно при использовании инновационной эндогенно-конвективной технологии сушки, позволяющей резко сократить продолжительность сушки и энергетические затраты.

СВЧ-конвективная хмелесушилка с эллиптическими тороидальными резонаторами, состоит из последовательно расположенных (в горизонтальной плоскости) резонаторов с криволинейными поверхностями, состыкованных через керамические двояковыпуклые перфорированные

плиты. Через воздуховоды к каждому резонатору от тепловой пушки подводится тепло. Концентрация энергии электромагнитного поля в объеме резонатора и уменьшение потерь на излучение достигается благодаря применению двояковыпуклой керамической плиты.

В СВЧ-конвективной хмелесушилке полусферический неферромагнитный резонатор состыкован с цилиндрической частью хмелесушилки соосно, а на боковой поверхности установлены воздуховоды с электрокалорифером. Полусферический резонатор разделен на зоны с помощью керамических перфорированных двояковыпуклых перегородок. Сверху резонатора установлены воздухоотводы от каждой зоны и бункера загрузки. Под бункером установлен диэлектрический распределитель.

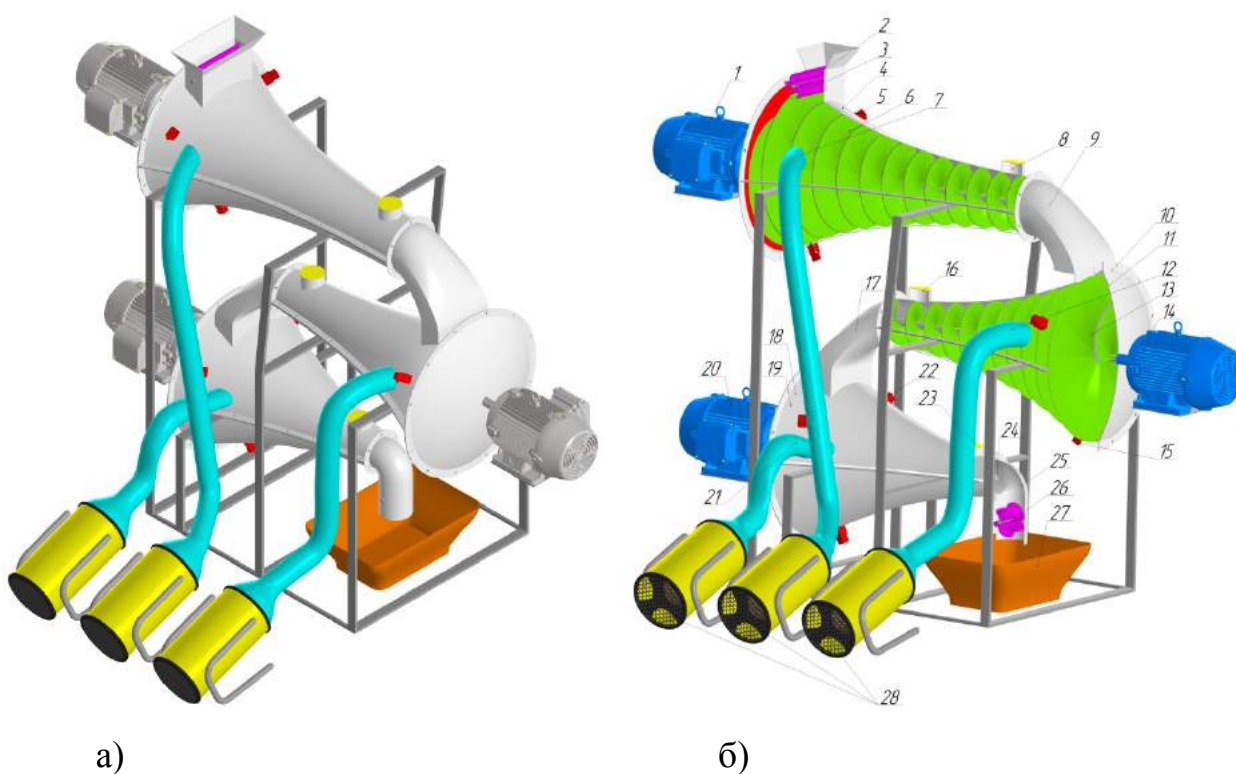
Хмелесушилка содержит последовательно расположенные в вертикальной плоскости тороидальные резонаторы с чередованием астроидальных резонаторов с усеченными вершинами и керамическими двояковыпуклыми перфорированными дисками в середине.

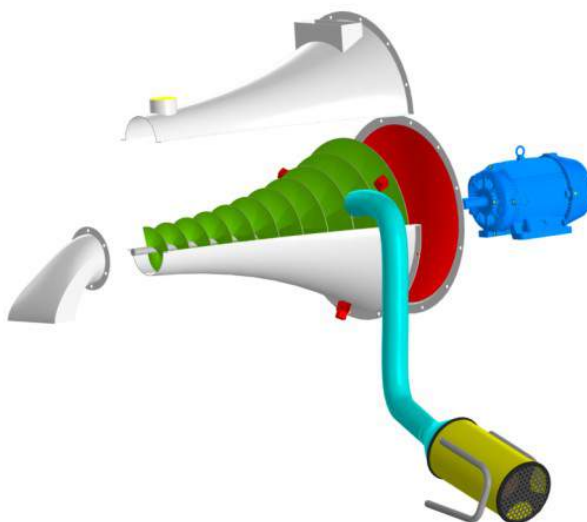
В указанных хмелесушилках остаются сложности согласования между собой технологических параметров, а именно толщины слоя, плотности сырья, скорости передвижения сырья, температуры нагрева сырья и воздуха в каждом резонаторе. Поэтому возникают трудности поэтапной регулировки скорости нагрева и сушки свежееубранного хмеля.

Основными критериями при конструировании хмелесушилки с источниками диэлектрического и конвективного нагрева являются трехэтапная сушка хмеля в непрерывно-поточном режиме работы с обеспечением разного температурного режима и разной напряженности электрического поля в резонаторах и электромагнитной безопасности без дополнительного экранирующего корпуса при использовании магнетронов воздушного охлаждения [31]. Для реализации этих критериев разработана хмелесушилка с источниками диэлектрического и конвективного нагрева непрерывно-поточного действия с магнетронами воздушного охлаждения, шлюзовыми затворами и поярусно расположенными

металлодиэлектрическими резонаторами в виде усеченных конусов с экспоненциальными образующими, внутри которых соосно расположены диэлектрические шнеки с переменным шагом и изменяющимся диаметром винтов.

Ярусная хмелесушилка с источниками диэлектрического и конвективного нагрева собрана из трех ярусно установленных секций (Рисунок 41). Каждая секция состоит из неферромагнитного резонатора (4, 10, 18) в виде усеченного конуса с экспоненциальной образующей и вогнутым основанием большого диаметра, на который соосно прикреплено керамическое вогнутое зеркало (3, 11, 19). Причем диаметры вогнутых оснований всех резонаторов равны между собой и кратны половине длины волны, а длины каждого резонатора разные, но кратны половине длины волны. Длина резонатора второго яруса меньше, чем резонатора первого яруса, но больше длины резонатора третьего яруса.





в)

Рисунок 41. – Ярусная хмелесушилка с источниками диэлектрического и конвективнонагрева: а) общий вид; б) общий вид в разрезе; в) резонатор второго яруса с основными узлами; 4, 10, 18 – объемные резонаторы; 6, 13, 24 – винтовые шнеки 1, 14, 20 – электроприводы шнеков; 3, 11, 19 – керамические вогнутые зеркала; 5, 15, 22 – волноводы с магнетронами воздушного охлаждения; 7, 12, 21 – воздухопроводы; 9, 17 – переходники; 8, 16, 23 – воздухоотводы - запердельные волноводы; 2, 26 – шлюзовые затворы; 28 – тепловые пушки

Каждый резонатор усечен на уровне критического сечения, на значительном расстоянии от вершин конуса, практически не нарушая структуры электромагнитного поля, что позволяет создать отверстия для передвижения сырья в другой резонатор через соответствующие переходники. Размеры резонаторов подобраны таким образом, чтобы в сужающихся частях возникли условия отсечки для высших типов колебаний волн. Вследствие чего в резонаторах такого конструкционного исполнения создаются условия для возникновения резонансных колебаний за счет переотражений электромагнитных волн высших порядков от критических сечений. Диаметры вогнутых оснований резонаторов равны между собой и кратны половине длины волны. Длины резонаторов по ярусам уменьшены и кратны половине длины волны, т.е. самая короткая длина резонатора – это длина резонатора третьего яруса.

Внутри каждого неферромагнитного резонатора соосно установлены диэлектрические винтовые шнеки (6, 13, 24) с электроприводами (1, 14, 20). По периметру каждого вогнутого основания неферромагнитных резонаторов (4, 10, 18) со сдвигом на 120° установлены волноводы с магнетронами воздушного охлаждения (5, 15, 22). Приемная емкость со шлюзовым затвором 2 из неферромагнитного материала установлена на первый резонатор 4 со стороны вогнутого основания. Неферромагнитный шлюзовой затвор 26 для выгрузки установлен под третьим резонатором в неферромагнитном переходнике 25. Между неферромагнитными резонаторами (4, 10, 18) имеются неферромагнитные переходники (9, 17). К каждому резонатору со стороны вогнутого основания подведены неферромагнитные воздуховоды (7, 12, 21) от индивидуальных тепловых пушек (28). Со стороны усеченной части резонаторов прикреплены воздухоотводы-запредельные волноводы (8, 16, 23) закрытые неферромагнитными мелкоячеистыми сетками. Длина второго резонатора больше третьего, но меньше первого резонатора. Сечение каждого резонатора изменяется по экспоненциальному закону. Причем значение экспоненты второго резонатора больше чем первого резонатора, но меньше, чем третьего резонатора. Экспоненты образующих резонаторов в каждом ярусе выше предыдущего резонатора. Хмелесушилка снабжена контрольно-измерительной техникой, датчиками влажности и температуры воздуха и сырья, в том числе прибором для контролирования мощности потока излучений. Допустимая мощность излучений 10 мкВт/см^2 , при превышении которой следует сократить продолжительность работы обслуживающего персонала [20], [74].

Исследования показали, что сушилка должна обеспечить поэтапное снятие влаги из шишек хмеля, находящихся в поярусно расположенных резонаторах, например в трех резонаторах 4, 10, 18. Первый этап сушки осуществляется при напряженности электрического поля $0,8\text{--}1,0 \text{ кВ/см}$ и температуре агента сушки $31\text{--}35 \text{ }^\circ\text{C}$. Второй этап сушки происходит при

напряженности электрического поля 1,0–1,5 кВ/см и температуре агента сушки 37–46 °С, третий этап сушки – при напряженности электрического поля 1,5–2,2 кВ/см и температуре агента сушки 65–75 °С. Для реализации такого технологического режима сушки предусмотрена регулировка: продолжительности нагрева в каждом резонаторе путем изменения частоты вращения соответствующих электродвигателей (1, 14, 20); производительности и мощности нагревательных элементов (ТЭН) соответствующих тепловых пушек 28; объема загрузки сырья в резонатор с изменением частоты вращения роторных питателей шлюзовых затворов 2, 26; мощности СВЧ генераторов 5, 15, 22. удельной мощности генератора, как отношение мощности генераторов к объему загрузки сырья в резонатор, и т.п.

Соответствующая высокая напряженность электрического поля в каждом резонаторе обеспечивается за счет интерференции концентрированных когерентных волн от керамических зеркал, обладающих малым значением тангенса угла диэлектрических потерь, а также из-за уменьшения поперечного сечения каждого резонатора по экспоненте, но с разными значениями экспоненты.

Технологический процесс сушки свежесобранного хмеля. Включаются все электрические тепловые пушки 28 на соответствующие производительности и мощности нагревательных элементов. Включаются электроприводы шнеков в следующей последовательности: третьего 20, второго 14, первого 1 шнеков. Частота вращения каждого мотора-редуктора разная, в пределах 0,25-1 об/мин, в зависимости от яруса. Обеспечивается температура сушильного воздуха на первом этапе сушки не более 31–35 °С. Загрузочная емкость заполняется свежесобраным хмелем и включается шлюзовой затвор 2, обеспечивающий дозированную подачу сырья в первый резонатор 4. После того как сырье с помощью первого диэлектрического шнека 6 начинает перемещаться внутри первого резонатора 4, включаются магнетроны 5 первого резонатора для возбуждения в нем электромагнитного

поля сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ). Волны за счет вогнутого керамического зеркала 3 концентрируются, и сырье в процессе перемещения вдоль резонатора подвергается воздействию ЭМП СВЧ. Под воздействием ЭМП СВЧ шишки хмеля эндогенно нагреваются равномерно по всему сечению, так как глубина проникновения волны соизмерима с размерами шишек хмеля. В связи с тем, что шаг винта разный и менее двух глубин проникновения волны (5-6 см) в хмель, поэтому сырье уплотняется и по толщине также равномерно нагревается. В процессе перемещения вдоль резонатора 4 с помощью витков шнека с переменными диаметром и шагом эндогенно нагретые шишки хмеля продуваются теплым воздухом, поступающим через воздуховод 7 от соответствующей тепловой пушки 28. В связи с тем, что при диэлектрическом нагреве градиенты температуры, влажности и давления направлены от центра к периферии шишек, поэтому выделенная влага с поверхности удаляется воздухом.

Отработанный влажный воздух уходит через воздухоотвод-запредельный волновод 8 и через перфорацию переходника 9. Скорость перемещения сырья через резонатор, а, следовательно, и продолжительность воздействия ЭМП СВЧ регулируется частотой вращения электродвигателя. Далее нагретое сырье до необходимой температуры просыпается через перфорированный переходник, где отсутствует излучение, так как резонатор усечен на уровне критического сечения, следовательно, волны отражаются от поверхности и направляются внутрь резонатора. Критическое сечение зависит от длины резонатора и показателя экспоненты (угла наклона) образующей. Показатель экспоненты второго резонатора выше, чем у первого, поэтому критическое сечение второго резонатора будет на уровне меньшей длины, т.е. длина второго резонатора меньше, чем длина первого резонатора, но больше, чем длина третьего резонатора. Далее сырье через переходник 9 попадает во второй резонатор 10, захватывается с помощью шнека 13, и тогда следует включить генераторы 15 на втором резонаторе. Частота вращения шнека 13 меньше, чем у шнека 1. В зауженной части

резонатора высокая напряженность электрического поля, и температура сырья в конце шнека достигает 46 °С. После того как частично высушенные шишки хмеля через перфорированный переходник 17 попадают в третий резонатор 18, следует включить генераторы 22. Тогда под воздействием ЭМП СВЧ сырье избирательно нагревается, поверхностная влага удаляется через воздухоотвод-запредельный волновод 23, высушенный хмель до 10-11 % выгружается с помощью роторного питателя 26 (шлюзового затвора) в приемную емкость 27. В данном резонаторе напряженность электрического поля достигает до 1,5-2,2 кВ/см, температура нагрева сырья достигает до 65-75 °С. В перфорированных переходниках 9, 17, 25 влажность и температура выравниваются по сечению шишек хмеля.

Итак, сушилка обеспечивает поэтапное снятие влаги из шишек хмеля, при движении через резонаторы, расположенные ярусами. Шишки хмеля подвергаются эндогенно-конвективному нагреву, высушиваются и выгружаются в приемную емкость. Во всех трех резонаторах доза воздействия ЭМП СВЧ, температура и напор подаваемого воздуха контролируются и регулируются в зависимости от влажности хмеля путем изменения мощности генераторов и нагревательных элементов, а также изменением частоты вращения электроприводов шнеков. Для соблюдения эффективных режимов нагрев шишек хмеля, регулирование осуществляется с разной скоростью в резонаторах (расположенных ярусами), в которых возбуждается электрическое поле разной напряженности, а сушка хмеля происходит в щадящем режиме, с сохранением потребительских характеристик и улучшением микробиологических показателей [75]. Шлюзовые затворы, воздухоотводы-запредельные волноводы и правильный выбор критического сечения на резонаторе обеспечивают электромагнитную герметичность без дополнительного экранирующего корпуса. Условия тепло- и массообмена при обдувании теплым воздухом зависит от параметров теплоносителя: температуры, скорости и относительной влажности.

Использование керамических вогнутых зеркал(сферическое зеркало –

собирающееся зеркало), как части резонаторов позволяет поддерживать свободные электромагнитные колебания разных видов.

Керамика обладает малыми тепловыми потерями, так как тангенс угла диэлектрических потерь всего $3 \cdot 10^{-3}$, следовательно, собственная добротность всех проектируемых резонаторов выше, чем без керамических зеркал. Концентрация энергии электромагнитного поля в объеме резонатора и уменьшение потерь на излучение достигается благодаря применению керамических вогнутых зеркал. Резонаторы с экспоненциальной образующей и керамическими вогнутыми зеркалами создают условия для рекуперации (повторного и многократного использования) электромагнитной мощности, излучаемой системой магнетронов [76], [35].

Хмелесушилку следует размещать в отдельном помещении, отгороженном неферромагнитной сеткой и снабдить пультом дистанционного управления.

Проведен предварительный расчет параметров процесса сушки хмеля воздействием электромагнитного поля сверхвысокой частоты.

Исходные данные: относительная начальная влажность хмеля $W_1 = 72$ %, относительная конечная влажность высушенного хмеля $W_2 = 10$ %, температура сушки конечная $T_2 = 65$ °С, начальная $T_1 = 20$ °С, плотность сухого хмеля $\rho = 20$ кг/м³, теплоемкость сухого хмеля $C_2 = 1700$ Дж/кг·°С, теплоемкость воды $C_e = 4190$ Дж/кг·°С.

Расчет мощности для нагрева хмеля и испарения влаги проведен на 1 кг исходного влажного хмеля. Приняты следующие обозначения:

- масса хмеля до сушки $g_1 = 1$ кг;
- масса сухого хмеля $g_0 = g_1 \cdot (1 - W_1) = 1 \cdot (1 - 0,72) = 0,28$ кг;
- масса удаленной влаги $g_2 = g_1 \cdot (W_1 - W_2) = 1 \cdot (0,72 - 0,1) = 0,62$ кг;
- масса оставшейся влаги $g_3 = g_1 \cdot W_2 = 1 \cdot 0,1 = 0,1$ кг;

Удельная энергия, необходимая для нагрева сухого хмеля:

$$\mathcal{E}_1 = g_0 \cdot C_2 \cdot (T_2 - T_1) = 0,28 \cdot 1,7 \cdot (65 - 20) = 364140 \text{ кДж/кг} = 101,15 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг} \quad (83)$$

Удельная энергия на нагрев и испарение удаляемой влаги:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_2 &= g_2 \cdot C_6 \cdot (T_2 - T_1) + r \cdot g_2 = 0,62 \cdot 4,19 \cdot (65 - 20) + 2287,4 \cdot 0,62 = \\ &= 1522 \text{ кДж/кг} = 423 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}; \end{aligned} \quad (84)$$

где r – теплота пароиспарения, кДж/кг.

$$\begin{aligned} r &= 589 - 0,399 \cdot T_{cp} - 0,00125 \cdot T_{cp}^2 = 589 - 0,399 \cdot 42,5 - 0,00125 \cdot 42,5^2 = \\ &= 569,79 - 4190 = 2287,4 \text{ кДж/кг}; \end{aligned} \quad (85)$$

Удельная энергия на эндогенный нагрев воды:

$$\mathcal{E}_{2 \text{ энд.}} = g_2 \cdot C_6 \cdot (T_2 - T_1) = 0,62 \cdot 4,19 \cdot (65 - 20) = 104 \text{ кДж/кг} = 28,86 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}; \quad (86)$$

Удельная энергия на испарение удаляемой влаги

$$r \cdot g_2 = 2287,4 \cdot 0,62 = 1418,19 \text{ кДж/кг} = 394 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг};$$

Удельная энергия на нагрев остаточной влаги:

$$\mathcal{E}_3 = g_3 \cdot C_6 \cdot (T_2 - T_1) = 0,1 \cdot 4190 \cdot (65 - 20) = 16760 \text{ Дж/кг} = 4,66 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}; \quad (87)$$

Суммарная удельная полезная энергия при СВЧ нагреве и испарении влаги:

$$\mathcal{E}_{\text{сум. энд}} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = 101,15 + 423 + 4,66 = 528,81 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}; \quad (88)$$

Суммарная удельная полезная энергия при СВЧ нагреве:

$$\mathcal{E}_{\text{сум. энд}} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = 101,15 + 28,86 + 4,66 = 134,67 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}; \quad (89)$$

Общая энергия, необходимая для диэлектрического нагрева свежесобранного хмеля и испарения влаги, с учетом термического КПД $\eta_T = 0,76$ и КПД хмелесушилки $\eta_{\text{суш}} = 0,8$, будет равна:

$$\mathcal{E}_{\text{об}} = \mathcal{E}_{\text{сум.}} / (\eta_T \cdot \eta_{\text{суш}}) = 528,81 / (0,76 \cdot 0,8) = 870 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг} = 0,87 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}; \quad (90)$$

Общая энергия, необходимая для диэлектрического нагрева свежесобранного хмеля

$$\mathcal{E}_{\text{об}} = \mathcal{E}_{\text{сум. энд}} / \eta_T = 134,67 / 0,76 = 233,15 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}; \quad (91)$$

Удельный расход тепла на диэлектрический нагрев $233,15 \cdot 3600 = 0,84$ МДж/кг, на испарение удаляемой влаги $394 \cdot 3600 = 1,42$ МДж/кг; общий расход тепла $0,84 + 1,42 = 2,26$ МДж/кг.

Для сравнения: в многоярусной конвективной хмелесушилке расходуется 3,86 МДж/кг тепла, т.е. примерно на 38-40% выше, чем в

проектируемой ярусной хмелесушилке с источниками диэлектрического и конвективного нагрева.

Удельная энергия на испарение удаляемой влаги с помощью конвективного тепла 394 кВт·ч /кг, следовательно, для массы удаленной влаги 0,62 кг, необходимо тратить энергию $394 \cdot 0,62 = 244,28$ кВт·ч. Далее можно вычислить необходимый расход воздуха, производительность, мощность электродвигателя вентилятора и нагревательного элемента.

Для определения продолжительности диэлектрического нагрева хмеля проведен расчет удельной мощности, генерируемой в шишках хмеля за счет диэлектрических потерь, при частоте $f = 2450$ МГц. Вычислено изменение фактора диэлектрических потерь хмеля (k) при изменении влажности от 20 до 72% ($k = 0,2-2$). Предварительный расчет удельной мощности проведен при напряженности электрического поля в объемном резонаторе $E = 1,6$ кВ/см. $P_{уд} = 0,555 \cdot 10^{-12} \cdot k \cdot f \cdot E^2 = 0,555 \cdot 10^{-12} \cdot 1,1 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 1600^2 = 3829$ Вт/см³. Тогда удельная мощность, генерируемая в 1 кг сырья, составит $P = P_{уд} / \rho = 3,829 / 0,17 = 22,52$ кВт/г = 22520 кВт/кг. Продолжительность нагрева $\tau = 233,15$ Вт·ч/кг / 22520 = 0,0104 ч = 0,62 мин. Производительность сушилки по диэлектрическому нагреву $1 / 0,0104 = 96,15$ кг/ч.

СВЧ-конвективная хмелесушилка разработана в виде трех состыкованных модулей для поэтапного равномерного снижения влаги, с использованием трех магнетронов по 850 Вт в каждом резонаторе (7,65 кВт). Производительность 95-100 кг/ч достижима, если нестандартная конструкция резонатора обеспечит возбуждение волны напряженностью электрического поля 1,6-1,7 кВ/см и продолжительность нахождения свежесобранного хмеля в каждом модуле по 20 мин. Объем сырья в каждом резонаторе 32-33 кг.

Для исследования динамики нагрева свежесобранного хмеля (влажность 79-82%) необходимо учесть изменения его электрофизических параметров в процессе воздействия ЭМП СВЧ, а именно:

изменения в зависимости от температуры диэлектрической проницаемости (ϵ), тангенса угла диэлектрических потерь ($tg\delta$), фактора диэлектрических

потерь (k) при частоте 2450 МГц, теплоемкости (C) и плотности (ρ).

Для определения количества теплоты, выделяемой в единице объема сырья, надо рассчитать удельные диэлектрические потери по формулам 92, 93. Удельные диэлектрические потери зависят от частоты (f , Гц), квадрата напряженности электрического поля (ЭП) (E , В/см), и фактора диэлектрических потерь хмеля (k). Удельную мощность можно определить также по формуле 93 при определенной скорости его нагрева ($\Delta T/\Delta \tau$), зная термический КПД ($\eta = 0,76$) и теплофизические параметры хмеля (C , Дж/кг·°C; ρ , кг/м³):

$$P_{уд} = 8,85 \cdot 10^{-14} (\Phi/\text{см}) 2 \pi f 10^6 k E^2 10^{-4} (\text{В}/\text{см}^2) = 0,556 \cdot 10^{-10} \cdot 2450 k E^2 = 1362,2 \cdot 10^{-10} k E^2, \text{Вт}/\text{см}^3; \quad (92)$$

$$P_{уд} = \frac{\Delta T}{\Delta \tau} \rho C \frac{1}{\eta} = \frac{\Delta T}{\Delta \tau} \rho C \frac{1}{0,76} = 1,32 \rho C \frac{\Delta T}{\Delta \tau}, \text{Вт}/\text{см}^3; \quad (93)$$

Результаты экспериментальных исследований динамики диэлектрического нагрева свежесобранного хмеля при разных удельных мощностях генератора, приведены на Рисунок 42 и сведены в Таблица 13.

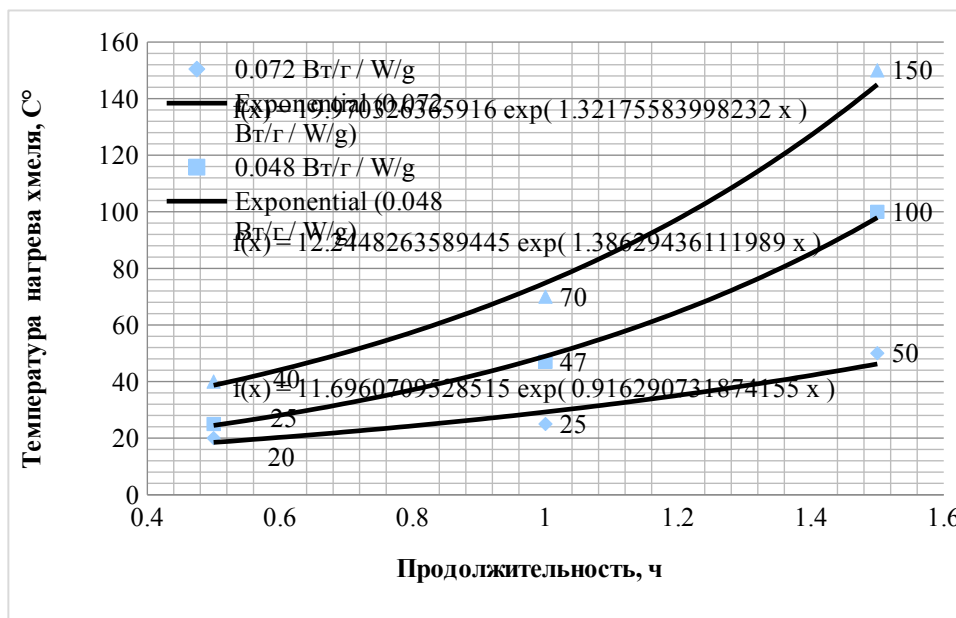


Рисунок 42. – Динамика диэлектрического нагрева хмеля при разных удельных мощностях генератора

Эмпирические выражения, характеризующие динамику нагрева хмеля

при разных удельных мощностях генератора:

$$T = 19,97 \cdot e^{1,32\tau} (0,072 \text{ Вт/г}); T = 12,245 \cdot e^{1,39\tau} (0,048 \text{ Вт/г});$$

$$T = 11,696 \cdot e^{0,92\tau} (0,024 \text{ Вт/г}); \quad (94)$$

Предварительные эксперименты показывают, что шишки хмеля, высушенные при температуре 65-70 °С по цвету, запаху и состоянию лупулиновых желез отнесены к первому сорту.

Для выявления эффективных режимов сушки свежесобранного хмеля воспользовались ротатбельным планированием второго порядка.

Таблица 13

Уровни варьирования факторов

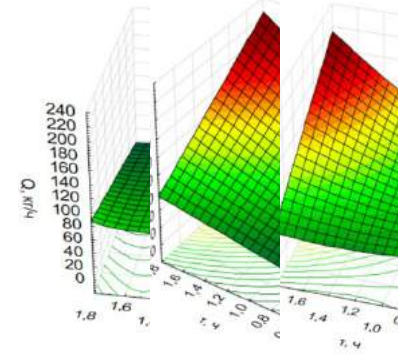
Факторы	Уровни факторов				
	- 1,414	-1	0	+1	+1,414
Продолжительность, ч	0,59 ч 35,36 мин	0,833 ч 50 мин	1,0 ч 60 мин	1,167 ч 70 мин	1,65 ч 99 мин
Мощность генератора, Вт	2400	3394	4800	5092	7200

Таблица 14


**Матрица ротатабельного планирования второго порядка
(метод наименьших квадратов полинома второй степени)**

Номер опыта	Кодированная матрица		Рабочая матрица		Параметр оптимизации		
	X_1	X_2	продолжительность, ч	общая мощность генераторов, Вт	производительность, кг/ч (Y_1)	энергозатраты, Вт·ч/кг (Y_2)	температура, °C (Y_3)
1	+	+	1,167	5092	85,7	59,42	82
2	-	+	0,833	5092	120,5	42,26	50
3	+	-	1,167	3394	85,7	39,6	40
4	-	-	0,833	3394	120,5	28,17	30
5	-1,414	0	0,59	4800	169,5	28,32	26
6	+1,414	0	1,65	4800	60,6	79,21	110
7	0	-1,414	1	2400	100	24	26
8	0	+1,414	1	7200	100	72	70
9	0	0	1	4800	100	48	47
10	0	0	1	4800	100	48	47
11	0	0	1	4800	100	48	47
12	0	0	1	4800	100	48	47
13	0	0	1	4800	100	48	47


Результаты построения матрицы - поверхности отклика и сечение двухфакторной модели: а) производительности; б) энергозатрат; в) температуры в зависимости от продолжительности воздействия ЭМП СВЧ и мощности генераторов: Y_1 – производительность (кг/ч), Y_2 – энергозатраты (Вт·ч/кг), Y_3 – температура (°C), X_1 – продолжительность воздействия (ч), X_2 – мощность генераторов (Вт)



а)



б)



в)

Примечание. Единовременная загрузка трех резонаторов 100 кг.

В Таблица 13 и Error: Reference source not found приведены принципы кодирования, уровни варьирования и матрица проведения эксперимента при сушке свежесобранного хмеля, влажностью 79-82 % с источниками диэлектрического и конвективного нагрева в непрерывно-поточном режиме с

поярусно расположенными резонаторами в виде усеченных конусов с экспоненциальными образующими [37].

Регрессионная модель изменения производительности Q (Y_1 , кг/ч), энергозатрат W (Y_2 , Вт·ч/кг), температуры T (Y_3 , °С) от продолжительности воздействия ЭМП СВЧ на свежесобранный хмель (τ , ч) и мощность генераторов (P , Вт):

$$Q = 270,9 + 0,11 \tau - 269,35 P + 4,8 \cdot 10^{-8} \tau^2 - 0,01 \tau P + 97,78 P^2; \quad (95)$$

$$W = -0,51 + 7,484 \cdot 10^{-5} \tau + 0,52 P + 1,93 \cdot 10^{-9} \tau^2 + 0,01 \tau P - 0,01 P^2; \quad (96)$$

$$T = 104 + 0,017 \tau - 144,76 P - 5,52 \cdot 10^{-7} \tau^2 - 0,033 \tau P + 30,5 P^2; \quad (97)$$

Из уравнений (104, 105, 106) следует, что оба фактора оказывают влияние на производительность, энергозатраты и температуру нагрева хмеля. Наглядное представление о закономерностях изменения критериев оптимизации при варьировании факторов можно получить с помощью двухмерных сечений поверхностей откликов, построенных в программном пакете для статистического анализа Statistica v12, которые позволяют с достаточной точностью прогнозировать значения критериев оптимизации и могут быть использованы для дальнейшего анализа.

Эффективный режим сушки свежесобранного хмеля при общей мощности девяти генераторов 7,2 кВт: температура 70 °С; производительность хмелесушилки составит 100 кг/ч, удельные энергетические затраты 72 Вт·ч/кг. Сушку хмеля в первом ярусе следует начинать при температуре 40-45 °С, а в третьем ярусе заканчивать при температуре 60-65 °С. Высушенный хмель до 10-12 % становится хрупким, поэтому для придания механической прочности следует провести процесс отлежки, чтобы влажность повышалась до 13%. Далее, для хранения при температуре 0-5 °С хмель следует плотно упаковать, в противном случае содержание альфа-кислоты и мягких смол снижается, содержание твердых смол увеличивается, изменяется цвет шишек.

Величина удельного расхода тепла зависит от параметров процесса сушки, способа сушки, влагосодержания хмеля. Удельный расход тепла на диэлектрический нагрев составляет 0,84 МДж/кг, на испарение удаляемой влаги 1,42 МДж/кг, общий расход тепла 2,26 МДж/кг. В многоярусной конвективной хмелесушилке базового варианта расходуется 3,86 МДж/кг тепла, а проектируемом варианте с источниками диэлектрического и конвективного нагрева на 38-40 % ниже.

Интенсификация процесса сушки хмеля СВЧ-конвективным методом способствует повышению производительности хмелесушилки, снижению удельных расходов тепла, сокращению затрат на его эксплуатации при высоком качестве высушенного хмеля. Интенсификация сушки на основе теории диэлектрического нагрева связана с повышением интенсивности внешнего и внутреннего теплообмена. Возможны следующие направления интенсификации процесса сушки хмеля:

- увеличение температуры конвективного нагрева до предельного значения (80-90 °С), при котором потребительские свойства хмеля остаются без изменения;
- турбулизация сушильного агента, обеспечивающего отрыв частиц влаги с поверхности шишек и вынос ее за пределы граничного слоя;
- применение определенной скважности технологического процесса (нагревание хмеля сопровождается охлаждением) с учетом толщины слоя, влажности хмеля;
- применение псевдооживленного слоя увеличивает поверхность контакта, следовательно, увеличивает коэффициент теплоотдачи.