

УСТРОЙСТВО ИНФРАКРАСНОЙ СУШКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО СЫРЬЯ ПРИ Пониженном Давлении

А. А. ЗАВАЛИЙ, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой,
Л. А. ЛАГО, ассистент,
Академия биоресурсов и природопользования КФУ им. В. И. Вернадского
(295007, г. Симферополь, пр-т Академика Вернадского, д. 4)
А. С. РЫБАЛКО, младший научный сотрудник,
Институт сельского хозяйства Республики Крым
(295493, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 150)

Ключевые слова: сельскохозяйственное сырье, инфракрасная сушка, пониженное давление

Одной из основных технологий переработки сельскохозяйственного сырья, способной обеспечить условия длительного сохранения накопленных в нем питательной или энергетической ценности и биологически активных или функциональных веществ, является сушка. Для повышения качества продукта сушки и эффективности процесса сушки в статье предложено размещать устройства инфракрасной сушки управляемым отраженным тепловым излучением в герметичную камеру с пониженным давлением. Это позволит повысить эффективность процесса сушки и качество продукта за счет повышения равномерности влагоудаления из сырья в объеме устройства, устранения контакта поверхности сырья с атмосферным воздухом, существенного уменьшения времени процесса сушки. В статье выполнены расчетный анализ теплового и массового баланса и экспериментальные исследования равномерности и интенсивности инфракрасной сушки при пониженном давлении. В результате получено, что снижение давления на 900 мм в. ст. от атмосферного позволяет на 16 % сократить время и на 13 % уменьшить расход энергии в устройстве с потребляемой источниками излучения мощностью 12 кВт. Такое устройство при двусменной работе позволит сушить до 200 кг сырого продукта за одни сутки. Очевидно, что повышение степени разрежения приведет как к увеличению эффективности процесса сушки, так и к интенсивному испарению полезных веществ продукта. Оптимальные режимы инфракрасной сушки при пониженном давлении, обеспечивающие максимальное сохранение полезных компонентов продукта, подлежат экспериментальному определению для различных видов сельскохозяйственного сырья. Основным для инфракрасной сушки под разрежением должно являться растительное сырье Крыма, насыщенное витаминами, эфирными маслами, веществами, обладающими антиоксидантным, стимулирующим иммунитет действием, используемое человеком как лекарственные средства и пищевые добавки.

DEVICE FOR INFRARED DRYING OF AGRICULTURAL RAW MATERIALS UNDER REDUCED PRESSURE

A. A. ZAVALIY, doctor of engineering, associate professor, head of the department,
L. A. LAGO, assistant,
Academy of bioresources and environmental management of KFU of V. I. Vernadsky
(4 Vernadsky Ave, 295007, Simferopol)
A. S. RYBALKO, junior researcher,
Institute of agriculture of the Republic of Crimea
(150 Kievskaya Str., 295493, Simferopol)

Keywords: agricultural raw materials, infrared drying, low pressure.

Drying is one of the main technologies for processing agricultural raw materials, which can provide conditions for the long-term preservation of the nutritional or energy value stored in it and biologically active or functional substances. To better the product quality and the efficiency of drying this is a process proposed to place the device of infrared drying with controlled reflected thermal radiation into a sealed chamber with reduced pressure. This will increase efficiency of the drying process and the quality of the product by increasing the uniformity of moisture removal from the raw material in the volume of the device, eliminating the contact of the raw material surface with atmospheric air and significantly reducing the drying process time. In this paper we have completed analysis of the heat and mass balance and experimental studies of uniformity and intensity of infrared drying under reduced pressure. It revealed that pressure drop to 900 mm wg below atmospheric allows 16 % reduction in time and a 13 % reduction in power consumption of the device with the radiation sources capacity intake of 12 kW. Double shift work mode of such device allows to dry up to 200 kg of raw product per day. Therefore, increasing the vacuum degree will increase both the efficiency of the drying process and the evaporation intensity of useful product substances. Optimum modes of infrared drying under reduced pressure, providing maximum preservation of useful components of the product are subject to experimental determination for different types of agricultural raw materials. The main primary products for infrared drying under vacuum should be plant material of Crimea, rich in vitamins, essential oils, substances with antioxidant, immune stimulant effect, used as drugs and food additives.

Положительная рецензия представлена Б. А. Вороненко, доктором технических наук, профессором Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

Основной задачей переработки сельскохозяйственного сырья является обеспечение условий длительного сохранения накопленного в нем биологического потенциала – питательной или энергетической ценности и биологически активных (БАВ) или функциональных веществ, стимулирующих и нормализующих функции человека. Одними из технологий, обеспечивающих такие условия, являются технологии сушки [1–13].

Получать продукты сушки высокого качества в условиях сельскохозяйственного производства позволяют разработанные нами устройства инфракрасной (ИК) сушки [13]. Преимуществами этих устройств являются высокая равномерность теплового воздействия на сырье при объемной загрузке, близкой к загрузке устройств конвективной сушки, время сушки и затраты энергии в устройствах ИК сушки меньше чем при конвективной сушке на 20–25 % и 25–30 % соответственно. Продукт ИК сушки обладает высокими показателями качества: сушка фруктов сохраняет не менее 80 % витамина С, содержащегося в сырье, продукт сушки сохраняет клеточную структуру с возможностью восстановления тургора клеток, цвет и аромат свежего сырья. В ИК устройствах осуществляется сушка сырья в виде

целых плодов (виноград, зизифус, малина), плодов, нарезанных дольками (яблоки, персик, дыня, тыква, помидор, кабачок, баклажан), стеблей и соцветий трав.

Основными факторами, обеспечивающими высокую эффективность разработанных нами устройств ИК сушки, являются контролируемое равномерное тепловое воздействие на всю поверхность сырья и низкий уровень контакта поверхности сырья с атмосферным воздухом (воздухообмен в устройствах ИК сушки ниже, чем в конвективных, более чем в 100 раз).

Факторами, препятствующими получению в устройствах ИК сушки продукта более высокого качества, являются: значительная длительность процесса сушки (от 8 до 24 часов в зависимости от вида и состояния сырья); неравномерность сушки, вызванная неравномерностью вентилирования объема устройства сушки воздухом; а также наличие самого контакта воздуха с поверхностью сырья в ходе сушки.

Целью настоящей работы является исследование возможности устранить или снизить влияние факторов, ухудшающих качество продукта сушки, размещением устройства ИК сушки в герметичной

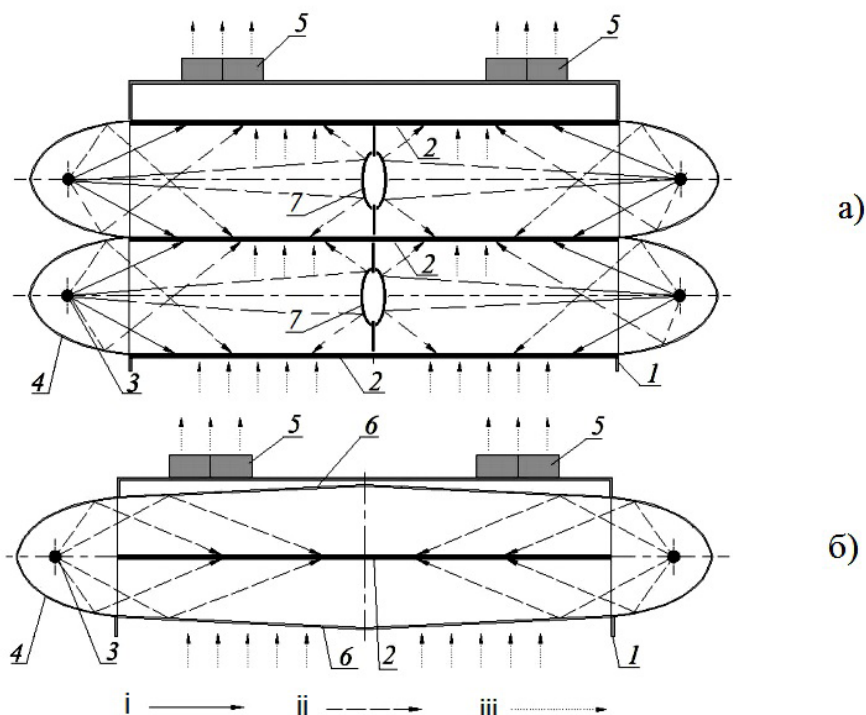


Рис. 1
Схемы устройств инфракрасной сушки: а – многоярусное устройство с центральным отражателем; б – одноярусное устройство с центральным расположением лотка
i – лучи прямого ИК-излучения; ii – лучи отраженного ИК-излучения; iii – атмосферный воздух;
1 – корпус (камера) устройства; 2 – лоток (поверхность) с продуктом сушки; 3 – источник ИК-излучения; 4 – боковой отражатель (рефлектор); 5 – вытяжной вентилятор; 6 – верхний / нижний отражатель; 7 – центральный отражатель

Fig. 1
Diagrams of infrared drying devices: a – multi-stage device with a central reflector; b – single-stage device with a central location of the tray

i – rays of direct IR radiation; ii – rays of reflected IR emanation; iii – atmospheric air;
1 – the body (chamber) of the device; 2 – tray (surface) with the product of drying; 3 – source of infrared radiation; 4 – lateral reflector;
5 – exhaust fan; 6 – upper / lower reflector; 7 – central reflector

Таблица 1
Исходные данные
Table 1
Initial data

Параметр <i>Parameter</i>	Обозначение <i>Symbol</i>	Ед. изм <i>Unit</i>	Значение <i>Value</i>
Тепловой поток излучения <i>Heat flux</i>	q_{II}	Вт/м ² <i>W/m²</i>	600
Температура продукта в период постоянной скорости сушки <i>The temperature of the product during a constant drying time</i>	t_{II}	°С	50
Относительная влажность вентилирующего воздуха <i>Relative humidity of ventilating air</i>	φ_{c0}	%	60
Температура вентилирующего воздуха на входе в устройство <i>Ventilation air temperature at the device inlet</i>	t_{C0}	°С	18
Температура вентилирующего воздуха над продуктом сушки <i>Ventilating air temperature above the drying product</i>	t_C	°С	45

камере с пониженным давлением. Понижение давления должно привести к сокращению времени сушки, выравниванию интенсивности влагоудаления в объеме устройства, устранению контакта поверхности продукта сушки с атмосферным воздухом.

Результаты исследований. В качестве прототипа нами выбраны 10-ти ярусное устройство ИК с центральным отражателем и одноярусное устройство с центральным расположением лотка с сырьем для сушки [13]. Схемы устройств приведены на рис. 1.

Сырье размещается на сетчатых лотках 2, устанавливаемых в камере 1. Источники ИК излучения 3 – линейные газонаполненные лампы накаливания с вольфрамовой спиралью размещены за пределами лотков так, что тепловое излучение на сырье попадает только в виде отраженного от зеркальных поверхностей отражателей 4 и 6. Взаимное положение источников излучения, отражающих поверхностей и поверхности сырья, а также специальное профилирование зеркально отражающих поверхностей обеспечивают равномерное тепловое воздействие ИК излучения на всю поверхность сырья. Испаренная из сырья влага удаляется из устройства сушки вытяжными вентиляторами 5.

Управление температурным режимом сушки осуществляется по показаниям датчика температуры, чувствительный элемент которого размещают в тело высушиваемого материала (кусочка, дольки, ягоды) на глубину 1–3 мм. Данный кусочек располагают в средней части лотка, для 10-ти ярусного устройства – на 4-м лотке сверху. Контроллер температуры включает и выключает источники теплового излучения по релейному закону со ступенькой $\pm 0,5-1$ °С относительно заданного значения температуры.

Для достижения цели работы нами выполнены расчетный анализ теплового и материального баланса для сушки в 10-ти ярусной камере при пониженном давлении, расчет прочности и устойчивости оболочки камеры, а также сравнительное экспери-

ментальное исследование времени и равномерности сушки при сушке в вентилируемом устройстве и сушке при пониженном давлении в герметичной камере.

Расчет мощности инфракрасного излучателя. Интенсивность сушки определяется потоком теплового излучения, падающего на сырье, и интенсивностью удаления испаренной влаги от поверхности продукта сушки. Опыт использования устройства-прототипа показал, что интенсивность вентиляции рабочего объема устройства должна обеспечивать удаление влаги так же, как оно происходит при естественной вентиляции устройства с одним лотком. При этом тепловая нагрузка величиной 600 Вт/м² обеспечивает разогрев влажного капиллярнопористого коллоидного тела до температуры 50–55 °С, что соответствует предельно допустимым значениям большинства сельскохозяйственных продуктов (ягоды, фрукты, травы, мясо). Для сушки овощей можно поддерживать температуру существенно выше (до 80–100 °С), что требует создания тепловой нагрузки до 2–2,5 кВт/м².

Оценку влияния давления на температуру выполним при уменьшении давления (степени разрежения) в камере в 2 раза. Исходные данные для сушки при атмосферном давлении сведены в таблицу 1.

1. Давление насыщения паров в Па определим по формуле [14]:

$$pn(t) = 0,6112 \cdot \exp\left(\frac{17,504 \cdot t}{241,2 + t}\right) \cdot 1000, \quad pn = 12400 \text{ Па}, \quad (1)$$

где t – температура продукта сушки в °С.

2. По известным $\varphi_{c0}, t_{c0}, t_C$ определяем влажность φ_C :

$$\varphi_C = \frac{pp(t)}{R_{H_2O} \cdot (t + 273,15) \cdot K}; \quad \varphi_C = \varphi_{c0} \cdot \frac{\rho(t_{c0})}{\rho(t_C)}; \quad \varphi_C = 15\%. \quad (2)$$

Здесь R_{H_2O} – газовая постоянная водяного пара.

3. Определяем $p_C = p_{II} \cdot \varphi_C = 1860$ Па.

4. Для $p = p_0$ определяем коэффициент массообмена при нормальном давлении:

$$\alpha p_0 = q_{II} / [rt \cdot (p_{II} - p_C)] = 2,211 \cdot 10^{-8} \text{ [кг/(м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па)]}, \quad (3)$$

где $rt = 2382$ КДж/кг – удельная теплота парообразования воды при температуре $55\text{ }^\circ\text{C}$ [15].

5. Определяем давление насыщения p_{II} для степени разрежения в камере $p_0/p = 2$, принимая, что парциальное давление паров воды над поверхностью продукта сушки уменьшилось пропорционально уменьшению давления воздуха ($p_c = 1860/2$ Па = 930 Па):

$$p_{II} = p_c + q_{II} / [rt \cdot \alpha p_0 \cdot 2] = 6626 \text{ Па} \quad (4)$$

6. По формуле (1) определяем температуру продукта:

$$t(p_{II}) = \frac{\ln(p_{II}/611,2) \cdot 241,2}{17,504 - \ln(p_{II}/611,2)}, \quad t_{II} = 38,018 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5)$$

Таким образом, понижение давления в камере в 2 раза по сравнению с атмосферным при неизменном теплоподводе к продукту сушки величиной 600 Вт/м² приведет к снижению температуры продукта с $55\text{ }^\circ\text{C}$ до $38\text{ }^\circ\text{C}$. Зависимость температуры продукта от степени разрежения в камере представлена на рис. 2 (кривая 1). Для увеличения температуры продукта при степени разрежения 2 до исходного (как при атмосферном давлении) значения $50\text{ }^\circ\text{C}$, тепловой поток излучения следует увеличить так, чтобы он обеспечил температуру продукта t_{II} при атмосферном давлении до значения $65\text{ }^\circ\text{C}$ (кривая 2). Величину приращения теплового потока следует определять экспериментально для конкретного устройства.

Расчет производительности вакуумного насоса. Производительность вакуумного насоса определяется, исходя из требований: скорость вакуумирования объема камеры должна быть выше скорости разогрева продукта в начале сушки; объемная производительность откачивающего насоса должна превышать объем паров воды, выделяемый продуктом сушки в единицу времени.

Определим величину объема водяного пара, выделяемого за 1 секунду из продукта в зависимости от степени разрежения в камере.

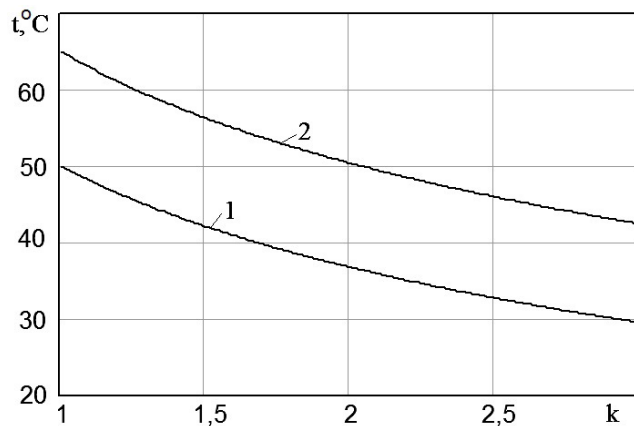


Рис. 2
Зависимость температуры продукта от степени разрежения в камере
Fig. 2
Dependence of product temperature on the degree of rarefaction in the chamber

Интенсивность испарения при разрежении равна [2]:

$$j = j_0 \cdot (p_0/p) = j_0 \cdot k, \quad (6)$$

где $p_0 = 101325$ Па – атмосферное давление,
 p – давление в камере, Па;
 k – степень разрежения.

Для водяного пара в условиях разрежения справедливо уравнение состояния идеального газа:

$$p \cdot (V/\tau) = j \cdot F \cdot R_{H_2O} \cdot T, \quad (7)$$

где V/τ – секундный объем пара, м³/с;

F – площадь поверхности лотка, м²;

$R_{H_2O} = 461,89$ Дж/(кг·К) – газовая постоянная водяного пара;

T – абсолютная температура пара, К.

Подставив (6) в (7), получим:

$$S = (V/\tau) = (j_0 \cdot F \cdot R_{H_2O} \cdot T \cdot k) / p_0, \quad (8)$$

где S – минимально необходимая объемная производительность вакуумного насоса.

Расчет по (8) выполним для условий сушки согласно табл. 1, дополнив следующими исходными данными. Опорное значение интенсивности испарения – значение для ИК при атмосферном давлении в устройстве прототипе: $j_0 = 1,519 \cdot 10^{-4}$ кг/(м²·с), соответствующее данным таблицы 1. Температуру пара примем равной температуре продукта сушки по зависимости на рис. 2. Такое допущение приведет к оценке объемной производительности сверху.

На рис. 3 приведена зависимость объемной производительности насоса от степени разрежения в камере (кривые 1 и 2 соответствуют кривым 1 и 2 на рис. 2). В соответствии с расчетом при разрежении $k = 1,1$ объемная производительность насоса должна быть не менее $5,4$ л/с, а при $k = 1,5$ – не менее $9,6$ л/с для кривой 1 и не менее 10 л/с для кривой 2. Оценим для этих величин скорость откачивания воздуха из объема камеры. В соответствии с выбранной схемой блока излучателей минимальный объем камеры составляет $4,2$ м³. Время откачки насоса с объемной производительностью S_0 [15]:

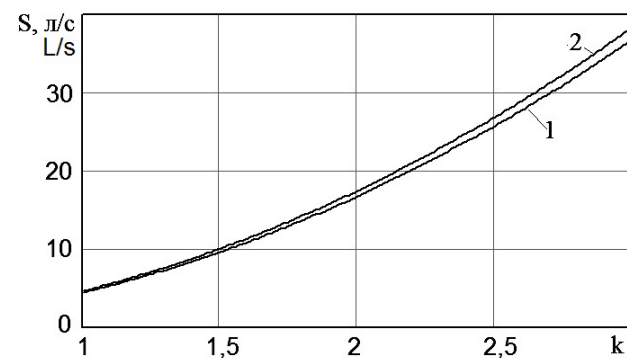


Рис. 3
Зависимость объемной производительности насоса от степени разрежения в камере
Fig. 3
Dependence of the volume capacity of the pump on the degree of vacuum in the chamber

$$t = \frac{\bar{V}}{S_0} \ln \frac{p_0 - Q_{\Sigma}/S_0}{p - Q_{\Sigma}/S_0}, \quad (9)$$

где $\bar{V} = V_0/n$ - приведенный объем (отношение объема камеры V_0 к показателю политропы n процесса откачки), м³;

t - время откачки до заданного разрежения, с;

p_0 - начальное давление или атмосферное, Па;

p - конечное давление разрежения, Па;

Q_{Σ} - приток газовой среды за счет негерметичности камеры и испарения влаги из продукта, м³·Па/с.

Процесс при $n = 1$ соответствует изотермическому процессу откачки, а при $n > 1$ - политропному с уменьшением температуры откачиваемой среды.

Результаты расчета по формуле (9) приведены на рис. 4. Здесь для кривых 1 и 2 $S_0 = 10$ л/с, а для кривых 3 и 4 - 5 л/с. Кривые 1 и 3 соответствуют изотермическому вакуумированию, а кривые 2 и 4 - политропному с показателем политропы $n = 1,3$.

Как следует из рис. 4, максимальное время откачки для степени разрежения 1,1 составляет 105 секунд, а для разрежения 1,5 - 443 секунды или 7,4 минуты. Длительность разогрева продукта в камере при атмосферном давлении составляет около 40 минут. То есть принятые объемные производительности приемлемы для рассматриваемой камеры ИК суши при пониженном давлении.

Расчет цилиндрического корпуса на прочность выполнен с помощью модели SolidWorks Simulation [16], а на устойчивость - по методике [17]. В результате получено, что стальной цилиндр (оболочка) диаметром 1700 мм толщиной стенки 3 мм и длиной 1200 мм с обеспечивает прочность конструкции. При толщине стенки 3 мм оболочка сохраняет устойчивость при внешнем давлении 10000 Па, что соответствует разрежению в камере 10 (к = 1,1). Масса оболочки при этом составляет 152 кг.

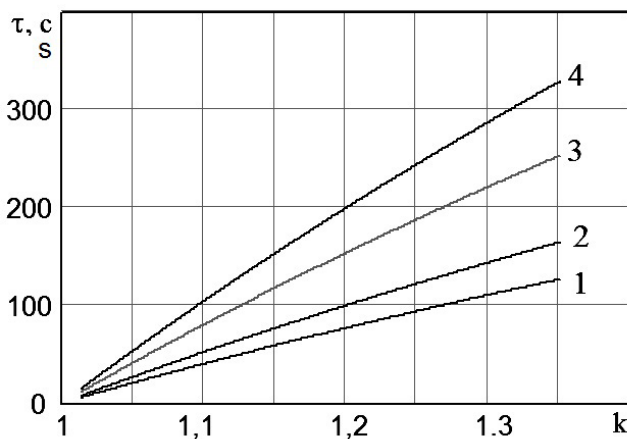


Рис. 4
Зависимость времени откачки от степени разрежения в камере
Fig. 4
Dependence of pumping time on the degree of vacuum in the chamber

Для выполнения экспериментальной части работы изготовлена герметичная камера, внутри которой размещалась инфракрасная установка с одним лотком для продукта сушки (см. рис. 1, б). Размер лотка 640 × 570 мм. Для откачивания воздуха и водяных паров из камеры использован компрессор, линия всасывания которого соединена с полостью камеры. В качестве материала для сушки использовали модель сырья - влажную многослойную хлопчатобумажную ткань. В эксперименте измеряли массу материала сушки в начале и конце эксперимента, степень разрежения в камере, затраты электроэнергии на процесс сушки, температуру в трех местах поверхности материала сушки. Термопары размещали под верхний слой ткани в вершинах треугольника на расстоянии друг от друга 300...350 мм.

Выполнено три серии экспериментов: 7 сушек при разрежении 900 мм.в.ст.; 6 сушек в условиях атмосферного давления при наличии принудительной вытяжной вентиляции объема камеры; 2 сушки в условиях атмосферного давления при естественной вентиляции объема камеры.

На рис. 5 представлена термограмма процесса сушки при разрежении в камере 900 мм.в.ст. Как следует из термограммы, за 1 час и 10 минут высушено 290 г влаги и затрачено 1,11 кВт·ч электроэнергии.

На рис. 6 приведена диаграмма зависимости времени сушки от вида сушки в экспериментальной установке.

Из диаграммы следует, что применение разрежения уменьшило время сушки с 86 минут до 72 минут, то есть на 16 %. Соответственно, на 16 % снизились затраты электроэнергии на питание ламп накаливания как источников теплового излучения.

Отсутствие при сушке в условиях разрежения воздуха, обтекающего поверхность продукта, привело к тому, что температура в продукте составила

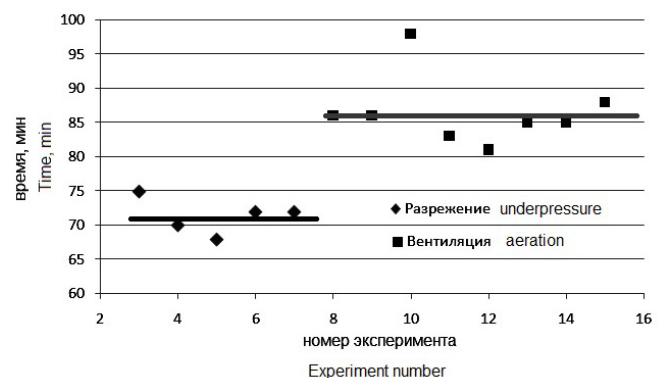


Рис. 5
Сушка при пониженном давлении в камере (разрежение 900 мм.в.ст.).
T1, T2, T3 - температуры в местах расположения термопар в теле материала
Fig. 5
Drying under reduced pressure in the chamber (underpressure of 900 mm of water column).
T1, T2, T3 - temperatures in the locations of thermocouples in the body of the material

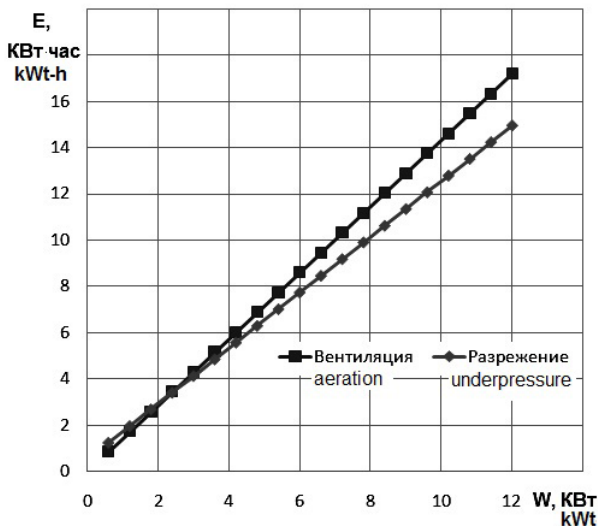


Рис. 6
Зависимость времени сушки от вида сушки в экспериментальной установке
Fig. 6
Dependence of the drying time on the type of drying in the experimental setup

60 °С, в то время как в условиях принудительной вентиляции при атмосферном давлении температура продукта не превышала 45 °С и при естественной конвекции при атмосферном давлении – 58 °С.

Использование откачивающего насоса при сушке в условиях разрежения приводит к дополнительным затратам электроэнергии на его привод. Так, в эксперименте использован компрессор с электроприводом мощностью 450 Вт, а общие затраты на сушку при разрежении составили 1,2 кВт·час против 0,8 кВт·час при сушке в атмосферных условиях. Применение привода такой мощности станет эффективным, если мощность источников излучения устройства сушки превысит 3 кВт. При мощности устройства 12 кВт использование полученного в эксперименте разрежения 900 мм.в.ст. позволит снизить общие затраты на процесс сушки с 17,2 кВт·час до 14,94 кВт·час, то есть на 13 %.

Полученные в эксперименте результаты использованы при разработке проекта инфракрасной сушильной камеры при пониженном давлении, содержащей 4 блока излучателей 10-ти ярусного инфракрасного устройства (см. рис. 7).

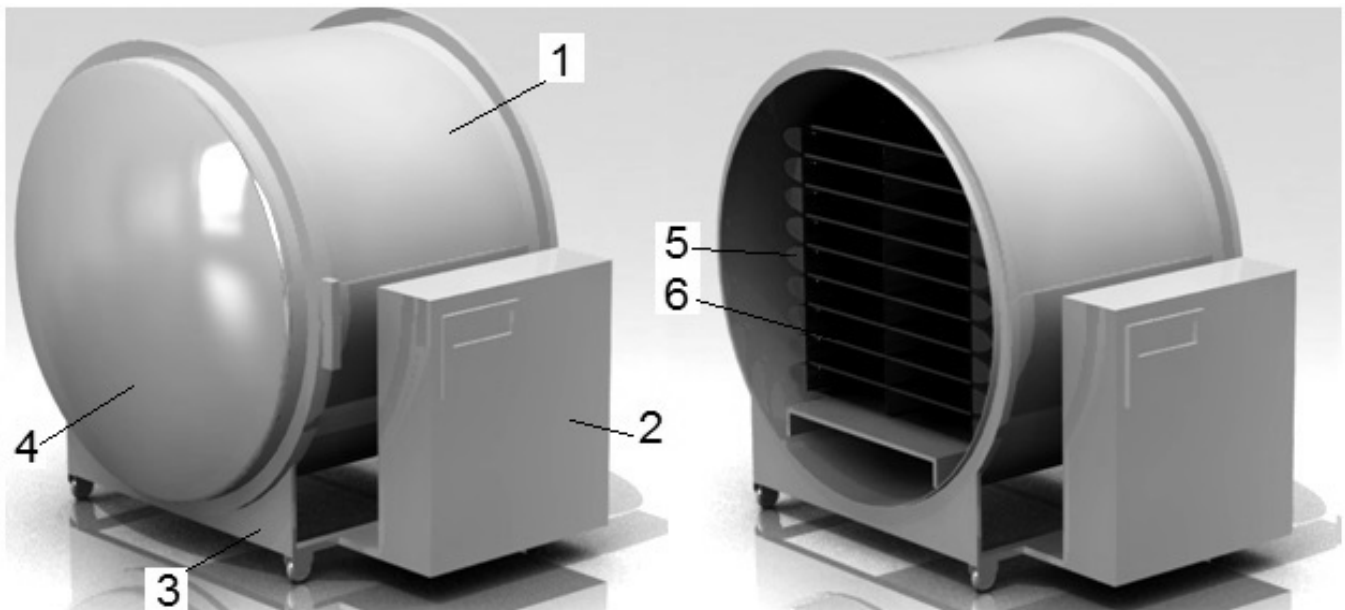


Рис. 7
Компоновочная схема устройства инфракрасной сушки под разрежением
1 – корпус; 2 – шкаф размещения систем питания, вакуумирования и фильтрации, конденсации, контроля и управления; 3 – тележка; 4 – дверь с герметичным затвором; 5 – блок инфракрасных излучателей; 6 – блок лотков для размещения продукта сушки
Fig. 7
Arrangement of the device for infrared drying under vacuum
1 – housing; 2 – a cabinet for placing power systems, evacuation and filtration, condensation, control and management; 3 – the trolley; 4 – door with hermetic shutter; 5 – block of infrared emitters; 6 – block of trays for placing the product of drying

Выводы. Инфракрасная сушка при понижении давления на 900 мм.в.ст. от атмосферного позволяет на 16 % сократить время и на 13 % уменьшить расход энергии в устройстве с потребляемой источниками излучения мощностью 12 кВт. Такое устройство при двусменной работе позволит сушить до 200 кг сырого продукта за одни сутки.

Основным для инфракрасной сушки под разрежением должно являться растительное сырье Крыма, насыщенное витаминами, эфирными маслами, веществами, обладающими антиоксидантным, стимулирующим иммунитет действием, используемое человеком как лекарственные средства и пищевые добавки.

Литература

1. Гинзбург А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1973. 528 с.
2. Лыков А. В. Теория сушки. М. : Энергия, 1968. 472 с.
3. Снежкин Ю. Ф., Шапарь Р. А. Обоснование режимов низкотемпературной сушки термолабильных материалов // Актуальные проблемы термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сб. науч. ст. Первых Международных Лыковских научных чтений, посвященных 105-летию академика А. В. Лыкова. – М., 2015. С. 133–136.
4. Рудобашта С. П., Зуева Г. А., Зувев Н. А., Зотова Е. Ю. Совмещенный процесс сушки и стимуляции семян с помощью импульсного инфракрасного излучения // Актуальные проблемы термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе : сб. науч. ст. Первых Международных Лыковских научных чтений, посвященных 105-летию академика А. В. Лыкова. М., 2015. С. 236–240.
5. Коршунова В. В., Бокова Т. И., Инербаева А. Т., Личисенко О. В. Использование пищевых добавок на основе ИК-сушеных овощей для создания продуктов питания лечебно-профилактического назначения // Вестник Новосибирского аграрного университета. 2014. № 4. С. 86–90.
6. Алтухов И. В., Цугленок Н. В., Очиров В. Д. Влияние импульсной инфракрасной сушки на сохранность активно действующих веществ // Вестник АПК Ставрополя. 2015. № 1. С. 7–10.
7. Демидов С. Ф., Кременевская М. И., Вороненко Б. А., Демидова А. С., Запрометова А. А. Сушка листьев брусники инфракрасным излучением // Научный журнал НИУ ИТМО. 2014. № 2. С. 27–36.
8. Голубева О. А., Краснова А. В., Лебедева Е. С. Сублимационная сушка как один из перспективных методов сушки сырья // Новая наука: современное состояние и пути развития. 2016. № 12. С. 60–61.
9. Титов Е. И., Семенов Г. В., Кидяев С. Н., Литвинова Е. В. Получение высококачественных сухих модифицированных коллагенсодержащих продуктов с использованием сублимационной сушки // Вестник международной академии холода. 2016. № 3. С. 27–30.
10. Семенов Г. В., Булкин М. С., Кузнецова А. В. Современные направления научных исследований и технические решения по интенсификации процесса сублимационной сушки в пищевой промышленности, фармпроизводствах и прикладной биотехнологии (часть 2) // Научный журнал НИУ ИТМО. 2015. № 2. С. 112–124.
11. Блынская Е. В., Тишков С. В., Алексеев К. В. Технологические подходы к совершенствованию процесса лиофилизации белковых и пептидных лекарственных препаратов // Российский биотерапевтический журнал. 2017. Т. 16. № 1. С. 6–11.
12. Семенов Г. В., Буданцев Е. В., Краснова И. С. Антиоксидантная активность растительного сырья в процессах замораживания и вакуумного обезвоживания // Научный журнал НИУ ИТМО. 2014. № 4. С. 210–213.
13. Завалий А. А., Снежкин Ю. Ф. Разработка и тепловое моделирование устройств инфракрасной сушки термолабильных материалов. Симферополь, 2016. 264 с.
14. Таблицы психрометрические. ГОСТ 8.524–85. М., 1985. 34 с.
15. Фролов Е. С., Минайчев В. Е. и др. Вакуумная техника : справочник. М. : Машиностроение, 1992. 480с.
16. Алямовский А. А. SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. М. : ДМК Пресс, 2004. 432 с.
17. ГОСТ 14249-89 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность». М. : Госкомитет СССР по стандартам, 1990. 55 с.

References

1. Ginzburg A. S. Bases of the theory and technology of drying of foodstuff. M. : Food industry, 1973. 528 p.
2. Lykov A. V. Theory of drying. M. : Energy, 1968. 472 p.
3. Snezhkin Yu. F., Shapar R. A. Justification of the modes of low-temperature drying of thermolabile materials // Urgent problems of thermomoist processing of materials in various industries and agro-industrial complex : coll. of scient. art. from the first International Lykovsky scientific readings devoted to the 105 anniversary of the academician A. V. Lykov. M., 2015. P. 133–136.
4. Rudobashta S. P., Zuev G. A., Zuev N. A., Zotova E. Yu. The combined process of drying and stimulation of seeds by means of pulse infrared radiation // Urgent problems of thermomoist processing of materials in various industries and agro-industrial complex : coll. of scient. art. from the first International Lykovsky scientific readings devoted to the 105 anniversary of the academician A. V. Lykov. M., 2015. P. 236–240.

5. Korshunova V. V., Bokov T. I., Inerbayeva A. T., Lichisenko O. V. Use of nutritional supplements on the basis of IR-dried vegetables for creation of food of treatment-and-prophylactic appointment // Messenger of the Novosibirsk agricultural university. 2014. № 4. P. 86–90.
6. Altukhov I. V., Tsuglenok N. V., Ochirov V. D. Influence of pulse infrared drying on safety of actively active ingredients // Bulletin of agrarian and industrial complex of Stavropol Territory. 2015. № 1. P. 7–10.
7. Demidov S. F., Kremenevskaya M. I., Voronenko B. A., Demidova A. S., Zaprometova A. A. Drying of leaves of cowberry with infrared radiation // NIU ITMO Scientific magazine. 2014. № 2. P. 27–36.
8. Golubeva O. A., Krasnova A. V., Lebedev E. S. Sublimation drying as one of perspective methods of drying of raw materials // New science: current state and ways of development. 2016. № 12. P. 60–61.
9. Titov E. I., Semenov G. V., Kidyayev S. N., Litvinova E. V. Receiving the high-quality dry products with collagen modified with use of sublimation drying // Bulletin of the international academy of cold. 2016. № 3. P. 27–30.
10. Semenov G. V., Bulkin M. S., Kuznetsov A. V. The modern directions of scientific research and technical solutions on an intensification of process of sublimation drying in the food industry, the pharmaceutical industry and applied biotechnology (part 2) // NIU ITMO Scientific Journal. 2015. № 2. P. 112–124.
11. Blynskaya E. V., Tishkov S. V., Alekseev K. V. Technological approaches to improvement of process of a liofilization of proteinaceous and peptide medicines // Russian biotherapeutic magazine. 2017. Vol. 16. № 1. P. 6–11.
12. Semenov G. V., Budantsev E. V., Krasnova I. S. Antioxidant activity of vegetable raw materials in processes of freezing and vacuum dehydration // NIU ITMO Scientific magazine. 2014. № 4. P. 210–213.
13. Zavaly A. A., Snezhkin Yu. F. Development and thermal modeling of devices of infrared drying of thermolabile materials. Simferopol, 2016. 264 p.
14. Psychrometric tables. GOST 8.524–85. M., 1985. 34 p.
15. Frolov E. S., Minaychev V. E. et al. Vacuum equipment : reference book. M. : Mechanical engineering, 1992. 480 p.
16. Alyamovsky A. A. SolidWorks/COSMOSWorks. Engineering analysis by method of final elements. M. : DMK Press, 2004. 432 p.
17. GOST 14249–89 “Vessels and devices. Norms and methods of calculation on durability”. M. : The State Committee of the USSR according to standards, 1990. 55 p.