

Леса России и хозяйство в них. 2025. № 3 (94). С. 147–158.

Forest of Russia and economy in them. 2025. № 3 (94). P. 147–158.

Научная статья

УДК 630*847.5

DOI: 10.51318/FRET.2025.94.3.015

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ИНФРАКРАСНО-ВАКУУМНОЙ СУШИЛКИ ДРЕВЕСИНЫ С ПОДБОРОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Василий Николаевич Левинский

Южно-Уральский государственный аграрный университет, Троицк, Россия

lv_74rus@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9778-3168>

Аннотация. Целью исследования грантового соглашения является создание энергосберегающей технологии сушки пиломатериала с использованием низкотемпературных генераторов ИК-излучения в условиях вакуумной камеры. В статье приводятся краткое описание решенных на сегодняшний день задач по согласованию спектральных характеристик пород древесины с оптическими свойствами генератора ИК-излучения, а также теоретическое описание процесса инфракрасной сушки пиломатериала в условиях вакуумной камеры. Полученные результаты исследований позволили уточнить вводные данные для методики расчета конструктивных параметров опытного образца инфракрасно-вакуумной сушильной установки и ее основных узлов. По итогам расчетов разработана конструкция установки, герметичную камеру которой предполагается изготовить из листового проката и профильной трубы (в качестве ребра жесткости). Также согласно расчетам выбраны: вакуумный насос для создания разрежения в камере, управление которого будет осуществляться по вакуумметру электроконтактному; циркуляционный насос для замкнутой системы трубопроводов конденсационного узла; пленочные электронагреватели с удельной мощностью 370 Вт/м². Разработана схема электрическая функциональная, позволившая выбрать измеритель-регулятор, подобрать датчики температуры, пускозащитную аппаратуру. На основе данной информации разработаны схемы электрические принципиальные системы автоматического управления и силового оборудование. С учетом предлагаемой конструкторской документации будет создан опытный образец, на котором будут реализовываться задачи по исследованию процесса сушки разных пород древесины.

Ключевые слова: конструкция, герметичная камера, вакуум, технологическое оборудование, пленочный электронагреватель

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-01090, <https://rscf.ru/project/23-76-01090/>

Для цитирования: Левинский В. Н. Разработка конструкции инфракрасно-вакуумной сушилки древесины с подбором технологического оборудования и системы автоматического управления // Леса России и хозяйство в них. 2025. № 3 (94). С. 147–158.

Original article

DESIGN DEVELOPMENT OF AN INFRARED VACUUM WOOD DRYER WITH THE SELECTION OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT AND AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM

Vasily N. Levinsky

South Ural State Agrarian University, Troitsk, Russia

lv_74rus@mail.ru , <https://orcid.org/0000-0001-9778-3168>

Abstract. The purpose of the research of the grant agreement is to create an energy-saving technology for drying lumber using low-temperature infrared radiation generators in a vacuum chamber. The article provides a brief description of the tasks solved to date in matching the spectral characteristics of wood species with the optical properties of an IR radiation generator, as well as a theoretical description of the process of infrared drying of lumber in a vacuum chamber. The obtained research results allowed to specify the input data for the calculation methodology of the design parameters of the prototype infrared vacuum drying unit and its main components. Based on the results of calculations, the design of the unit has been developed, the sealed chamber of which is supposed to be made of rolled steel and a profile pipe (as a stiffener). Also, according to the calculations, a vacuum pump was selected to create a vacuum in the chamber, which will be controlled by an electrocontact vacuum gauge.; a circulation pump for a closed piping system of the condensation unit; membranous electric heaters with a specific power of 370 W/m². An electrical functional circuit has been developed, which made it possible to select a meter-regulator, select temperature sensors, and start-up protection equipment. Based on this information, electrical circuits, basic automatic control systems and power equipment have been developed. Taking into account the proposed design documentation, a prototype will be created, which will be used to study the drying process of different types of wood.

Keywords: construction, sealed chamber, vacuum, technological equipment, membranous electric heater

Funding: the research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation № 23-76-01090, <https://rscf.ru/project/23-76-01090/>

For citation: Levinsky V. N. Design development of an infrared vacuum wood dryer with the selection of technological equipment and an automatic control system // Forests of Russia and economy in them. 2025. № 3 (94). P. 147–158.

Введение

Цель исследования (грант РФФ № 23-76-01090) заключается в создании энергосберегающей технологии сушки древесины с использованием низкотемпературного генератора ИК-излучения в условиях вакуумной камеры. На сегодняшний день получены спектральные характеристики наиболее распространенных для переработки пород древесины, в которых наибольший интерес представляют экстремумы в диапазоне 9,4–9,7 мкм, так как в нем поглощение 100 % (Levinsky, 2024a). При этих данных селективную работу системы

излучатель – приемник возможно организовать с применением гибкого пленочного электронагревателя. Это следует из его технических характеристик и дополнительных исследований, в которых установлена зависимость температуры поверхности ИК-излучателя от температуры окружающего пространства и его удельной мощности (Исследование влияния..., 2024).

Предполагается, что процесс сушки пиломатериала (досок), уложенного в штабель с промежуточными кассетами (каркас из реек с закрепленными пленочными электронагревателями), будет

происходить в условиях замкнутого пространства герметичной камеры в разреженной среде. Поэтому для расчета ее конструктивных параметров прежде всего рассматривались теории: физических процессов теплообмена излучением между гибким пленочным электронагревателем и высушиваемым пиломатериалом; уровня разрежения внутри камеры в разных периодах сушки (Мухаметзянов и др., 2019); конденсации влаги на охлаждающей поверхности; переходных процессов (например, переход от атмосферного давления к разреженному или нагрев пиломатериала до заданной температурной величины) (Шагеева, 2022, 2023; Levinsky, 2024б). В совокупности это мультифизический процесс, так как все его перечисленные составляющие происходят в замкнутом пространстве и их степень влияния друг на друга очевидна, но требует более глубокого изучения. В связи с этим в данной статье будет представлено решение задачи по разработке конструкции инфракрасно-вакуумной сушилки древесины с подбором технологического оборудования и системы автоматического управления.

Методика и объекты исследования

Изготовление герметичной камеры предполагается из листового проката. При проектировании учитывались следующие ограничения, касающиеся внешних габаритов:

- длина камеры должна предполагать размещение доски 4 м;

- высота камеры должна быть достаточной для вариативности укладки пиломатериалов в штабель (из расчета укладки доски толщиной 50 мм в ряд с учетом поперечных прокладок между рядами);

- ширина камеры не должна превышать нормативных габаритных размеров для перевозки автотранспортом (не более 2,6 м).

С учетом приведенной информации о габаритных ограничениях для определения объема пиломатериала, уложенного в штабель с промежуточными кассетами и прокладками, справедливо

выражение (Мухаметзянов и др., 2019; Шагеева, 2022, 2023)

$$V_{шт} = \frac{V_d}{\beta}, \quad (1)$$

где V_d – объем доски; β – объемный коэффициент заполнения штабеля, зависящий от толщины прокладок, размеров кассеты с пленочными электронагревателями и высушиваемого пиломатериала.

Полученное значение $V_{шт}$ при известной длине доски L позволяет определить поперечное сечение штабеля:

$$S_{шт} = \frac{V_{шт}}{L}. \quad (2)$$

Расчет размеров основного короба зависит от предполагаемой разовой загрузки пиломатериала (m^3); способа укладки (между кассетами 1 ряд досок, 2 ряда или 3) и максимальной длины доски (м).

Для проведения исследований достаточный объем загрузки до $1 m^3$. На рис. 1 показан вариант размещения $1 m^3$ досок толщиной 50 мм, шириной 150 мм и длиной 4 м.

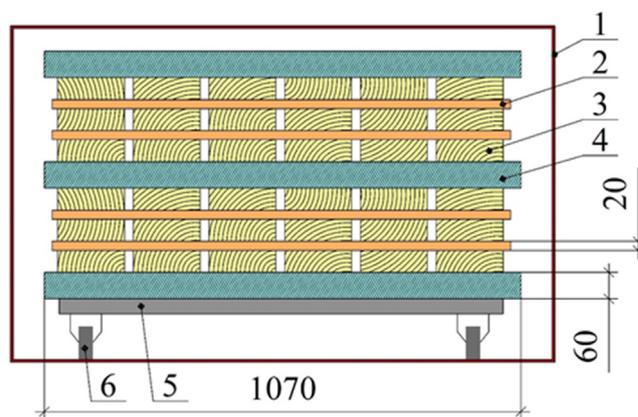


Рис. 1. Размещение досок в предполагаемой конструкции камеры сушильной установки:
1 – корпус камеры; 2 – поперечные прокладки; 3 – доска; 4 – кассеты с пленочными электронагревателями; 5 – подвижная платформа для укладки штабеля; 6 – колеса для выгрузки подвижной платформы из камеры

Fig. 1. Placement of boards in the proposed design of the drying unit chamber:
1 – camera body; 2 – transverse gaskets; 3 – board; 4 – cassettes with film electric heaters; 5 – movable platform for stacking; 6 – wheels for unloading the movable platform from the chamber

Полученная информация в габаритных размерах позволит рассчитать толщину прямоугольной плоской стенки коробчатых обечаяк с ребрами жесткости, работающих под давлением, по выражению (Шагеева, 2023)

$$s' = Kb \sqrt{\frac{P}{\sigma_{ид}}}, \quad (3)$$

где b – меньшая сторона прямоугольной плоской стенки с ребрами жесткости, м; $K = f \left(\frac{l}{b} \right)$ – коэффициент, зависящий от способа закрепления стенки; l – большая сторона прямоугольной стенки, м; $\sigma_{ид}$ – окончательное допускаемое напряжение, МН/м².

Сопротивление укрепляющих поперечных ребер можно рассчитать по формуле (Шагеева, 2023)

$$W_p' = \frac{S_{шт} l P}{4K\sigma_{ид}}. \quad (4)$$

Тогда для расчета номинальной толщины поперечных ребер справедливо выражение (Шагеева 2023)

$$s_p' = 0,633 \sqrt{W_p'}. \quad (5)$$

Для расчета номинальной площади поперечного сечения поперечных ребер справедливо выражение (Шагеева 2023)

$$F_p' = 5 (s_p')^2. \quad (6)$$

Из того же металла предполагается изготовление дна корпуса и крыши, которые условно можно считать одинаковыми. Тогда расчет толщины плоской стенки рассматриваемых конструктивных элементов можно найти по выражению (Шагеева 2023).

$$s' = \frac{Kdb}{K_0} \sqrt{\frac{P}{\sigma_{ид}}}, \quad (7)$$

где K_0 – коэффициент, который учитывает ослабление конструктивных элементов отверстиями; d – меньшая сторона плоской стенки конструктивных элементов.

Для выбора технологического оборудования необходимо рассчитать массу доски в высушенном и влажном виде, расход испаряющейся влаги в секунду.

Масса сухой доски:

$$m_d = V_d \rho_d, \quad (8)$$

где ρ_d – плотность доски, кг/м³.

Масса влажной доски:

$$m_{вл.д} = Um_d + m_d, \quad (9)$$

где U – влагосодержание материала, %.

Расход влаги, испаряющийся из древесины в секунду, найдем по выражению

$$P_{уст. пленочного эл} = j_{д. пов} F_{пов. д}, \quad (10)$$

где $j_{д. пов}$ – поток массы, кг/(м²·с); $F_{пов. д}$ – площадь поверхности материала, м².

Для выбора вакуумного насоса необходимо рассчитать его производительность при откачивании объема за определенное время (Шагеева, 2023):

$$S = \frac{V}{t} \ln \frac{P_a}{P_e} F, \quad (11)$$

где V – объем откачиваемой герметичной камеры, м³; t – время откачки, ч; P_a – уровень начального вакуума, мбар; P_e – уровень необходимого вакуума, мбар; F – коэффициент кривой откачки.

Для расчета мощности кассет с пленочными электронагревателями справедливо выражение

$$P_{уст. пленочного эл} = P_{уд} F_{пов. кассеты}, \quad (12)$$

где $P_{уд}$ – удельная мощность одного квадратного метра пленочного электронагревателя, Вт/м² (для расчетов принимается равной 370 Вт/м² согласно работе (Левинский, 2024); $F_{пов. кассеты}$ – площадь излучающей поверхности кассеты, м².

С учетом предложенного размещения штабеля (см. рис. 1), методики расчета и априорной информации проведенных ранее исследований (Левинский, 2024; Levinsky, 2024a, б) в данной работе будут произведены расчеты и проектирование конструкции, выбраны технологическое оборудование и система автоматического управления.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 показана боковая сторона герметичной камеры, на которой указаны габаритные размеры, места отверстий: для ввода кабеля для подключения кассет с пленочными электронагревателями (5 шт.); для подключения шланга вакуумного насоса; для слива конденсата из ниши-накопителя.

Из расчетов следует, что для изготовления конструкции будет использован листовой прокат марки А-ПВ-6 ГОСТ 19903–2015; профильная труба 80×40×3 ГОСТ 8645–68.

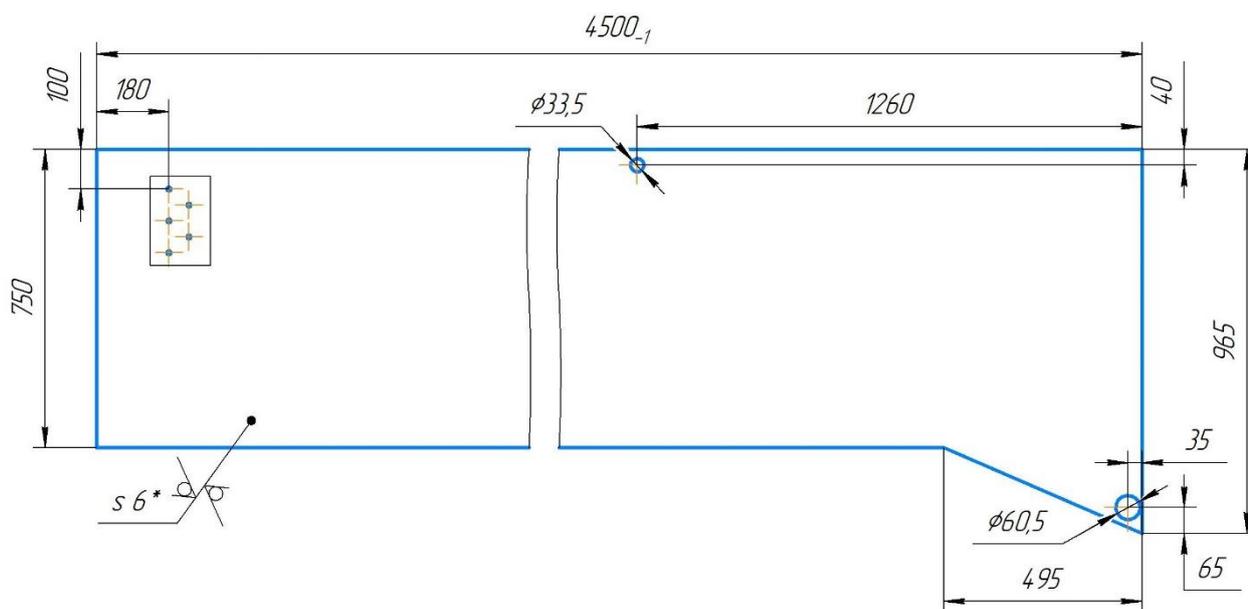


Рис. 2. Габаритные размеры герметичной камеры
Fig. 2. Overall dimensions of the sealed chamber

Отдельным элементом конструкции является дверная крышка (рис. 3). Для ее изготовления необходимы те же номенклатурные материалы, что и при изготовлении основной конструкции.

В верхней части корпуса камеры будет расположен узел для создания активной конденсации (рис. 4, поз. 1). Он представляет собой замкнутую систему трубопроводов с расширительным бачком, заполненную охлаждающей жидкостью, движение которой осуществляется при помощи циркуляционного насоса, для присоединения которого предусмотрены сгоны.

Вся камера будет располагаться на четырех ножках (рис. 4, поз. 2). На дне камеры предполагается установить направляющие рельсы, которые будут представлять собой продолжение рельс пристыковываемой к корпусу камеры подставки (рис. 5, поз. 1). Это необходимо для выхода подвижной платформы (рис. 4, поз. 3 или рис. 5, поз. 2) из камеры для укладки на нее штабеля пиломатериала, после чего уложенный штабель будет закатываться обратно в камеру, а подставка (рис. 5, поз. 1) убираться в сторону, закрываться дверь (см. рис. 3).

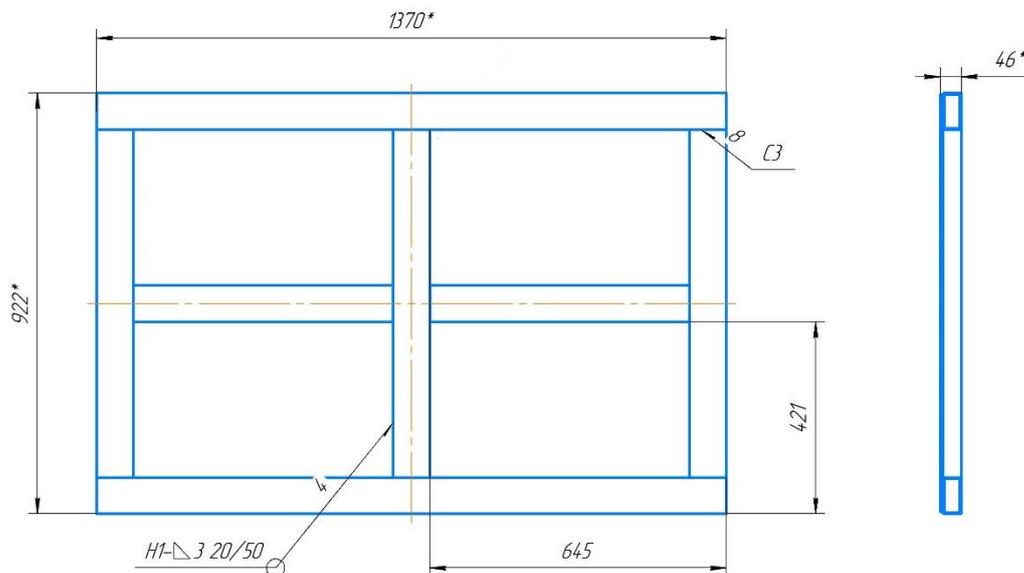


Рис. 3. Дверная крышка
Fig. 3. Door cover

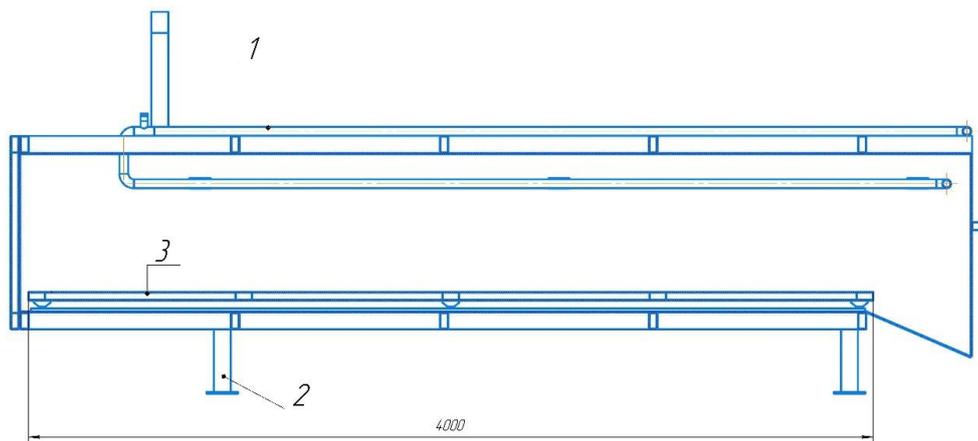


Рис. 4. Расположение в камере узла конденсации и подвижной платформы
 Fig. 4. Location of the condensation unit and the mobile platform in the chamber

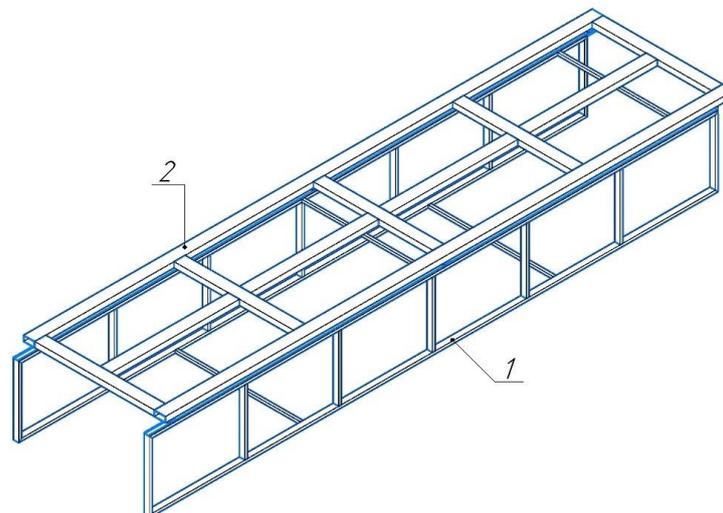


Рис. 5. Съемная подставка, пристыковываемая к корпусу камеры
 Fig. 5. Removable stand, docked to the camera body

Итоговый сборочный чертеж разрабатываемой конструкции приведен на рис. 6.

Для создания разрежения в герметичной камере существует достаточно большое количество разновидностей вакуумных насосов (мембранный, пластинчато-роторный маслоуплотняемый, сухой пластинчато-роторный и др.), но задачи их сравнения и выбора наиболее оптимального не ставилось, поэтому выбирали водокольцевой как наиболее часто используемый в сушильных установках древесины (Великанов и др., 2020; Очков, 2022; Rodionov et al., 2021). Контроль уровня вакуума будет осуществляться вакуумметром электроконтактным.

Водокольцевой насос имеет следующие технические характеристики:

- производительность насоса, м³/ч (л/мин);
- условный проход патрубков;
- расход операционной жидкости 0,12 м³/ч (2 л/мин);
- минимальное остаточное давление, 33 мбар (97% вакуума);
- параметры питающей сети: 380 В, 50 Гц;
- установленная мощность 1,45 кВт;
- количество оборотов 2850 об/мин;
- класс изоляции IP 54;
- уровень шума 65 ± 3 дБ;
- габаритные размеры 48×19×25 см;
- масса 35 кг.

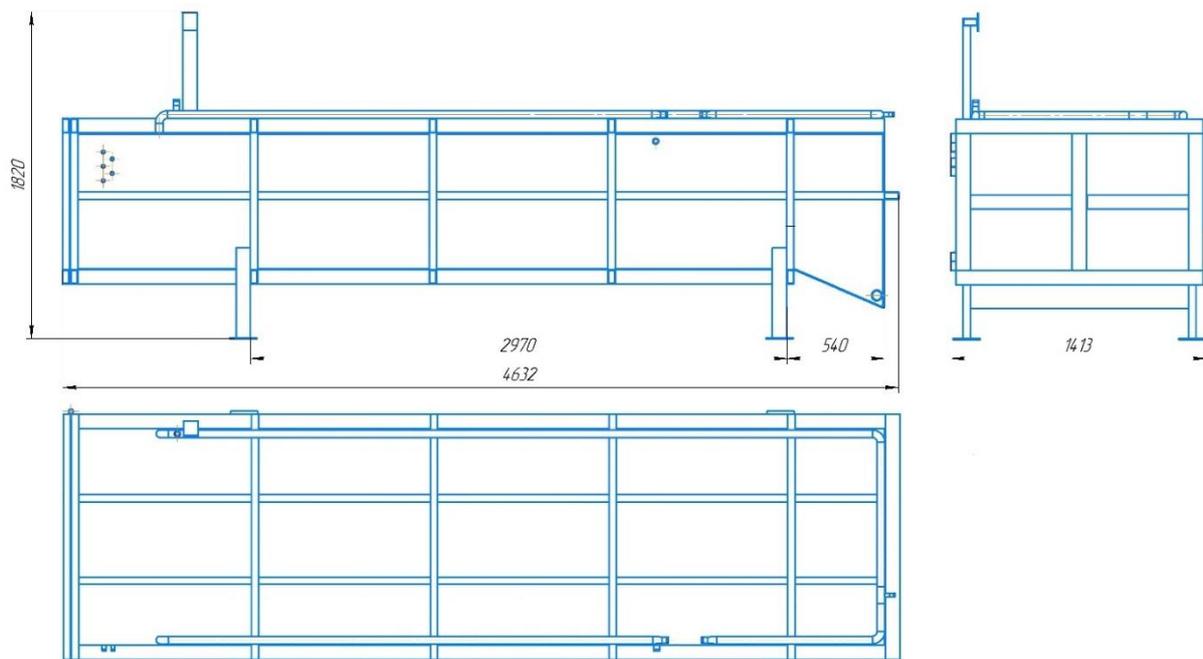


Рис. 6. Сборочный чертеж конструкции герметичной камеры
Fig. 6. Assembly drawing of the sealed chamber design

Вакуумметр электроконтактный имеет следующие технические характеристики:

- измеряемое давление $-0,1-0$ МПа;
- присоединение $G \frac{1}{2}$;
- класс точности 1,5;
- исполнение электроконтактной группы V;
- температура окружающей среды $-50 \dots +60^{\circ}\text{C}$;
- температура рабочей среды до 50°C ;
- класс изоляции IP 40.

Для системы узла активной конденсации предусматриваются циркуляционный насос (4 м (0,4 Бар); 220 В, 50 Гц; 0,65 кВт; IP 68), гидроаккумулятор расширительный (12 л; 10 бар), манометр показывающий (0–4,0 МПа), клапан предохранительный (1,5 бар) и автоматический воздухоотводный клапан.

Пленочные электронагреватели изготавливались непосредственно под размер кассеты (1,0×4,0 м). Для одной кассеты необходимо три нагревателя со следующими техническими характеристиками: проволочный тип исполнения; размер – 0,35×4 м; параметры питающей сети – 220 В, 50 Гц; установленная мощность – 0,518 кВт; класс изоляции – IP 67. Планируется подключение трех кассет, таким образом суммарная установленная мощность нагревательных элементов состав-

ит $\approx 4,7$ кВт. Но в системе автоматического управления (САУ) будет предусмотрена возможность подключения дополнительных щитов на случай, если возникнет в этом необходимость в процессе проведения экспериментов.

Система автоматического управления для регулирования и исследования процесса низкотемпературной сушки пиломатериалов в условиях вакуумной камеры на данном этапе исследований не должна быть сложной. Управление процессом сушки будет осуществляться по датчикам температуры доски и температуры поверхности пленочного электронагревателя, управление процессом конденсации – по датчику температуры охлаждающей жидкости в контуре.

Все остальные параметры (температура среды в камере, влажность среды в камере, влажность доски и др.) необходимо фиксировать контроллером, при этом датчики должны иметь возможность смены места своего положения для более детального исследования того или иного узла установки.

Обязательным требованием для САУ является функция архивирования получаемых значений в режиме реального времени, что позволит получать динамические характеристики, осуществлять их обработку и анализ, получать передаточные

функции процесса сушки в разработанной ИВСУ, которые в конечном итоге станут основой технологии низкотемпературной инфракрасной сушки пиломатериала в условиях вакуумной камеры.

Управление вакуумным насосом будет осуществляться с применением электроконтактного вакуумметра по заданным уставкам.

На рис. 7 показана схема электрическая функциональная системы автоматического управления процессом сушки в инфракрасно-вакуумной установке, а именно один из вариантов компоновки расположения датчиков температуры и управления исполнительными механизмами.

Для реализации управления процессом предусмотрен универсальный измеритель – регулятор температуры и влажности ТРМ-138 с 8 универсальными настраиваемыми входами и с 8 релейными выходами. К ТРМ-138 посредством адаптера АС4 предусмотрено подключение к персональному компьютеру (ПК), на который предварительно было установлено программное обеспечение Owen Process Manager (OPM), предназначенное для записи всего процесса сушки и последующего его анализа с построением графиков непосредственно в самой программе либо перевода данных в формат документа Excel (Дунаев М. П., Дунаев А. М., 2019; Левинский, 2024; Поляков, Лубков, 2018).

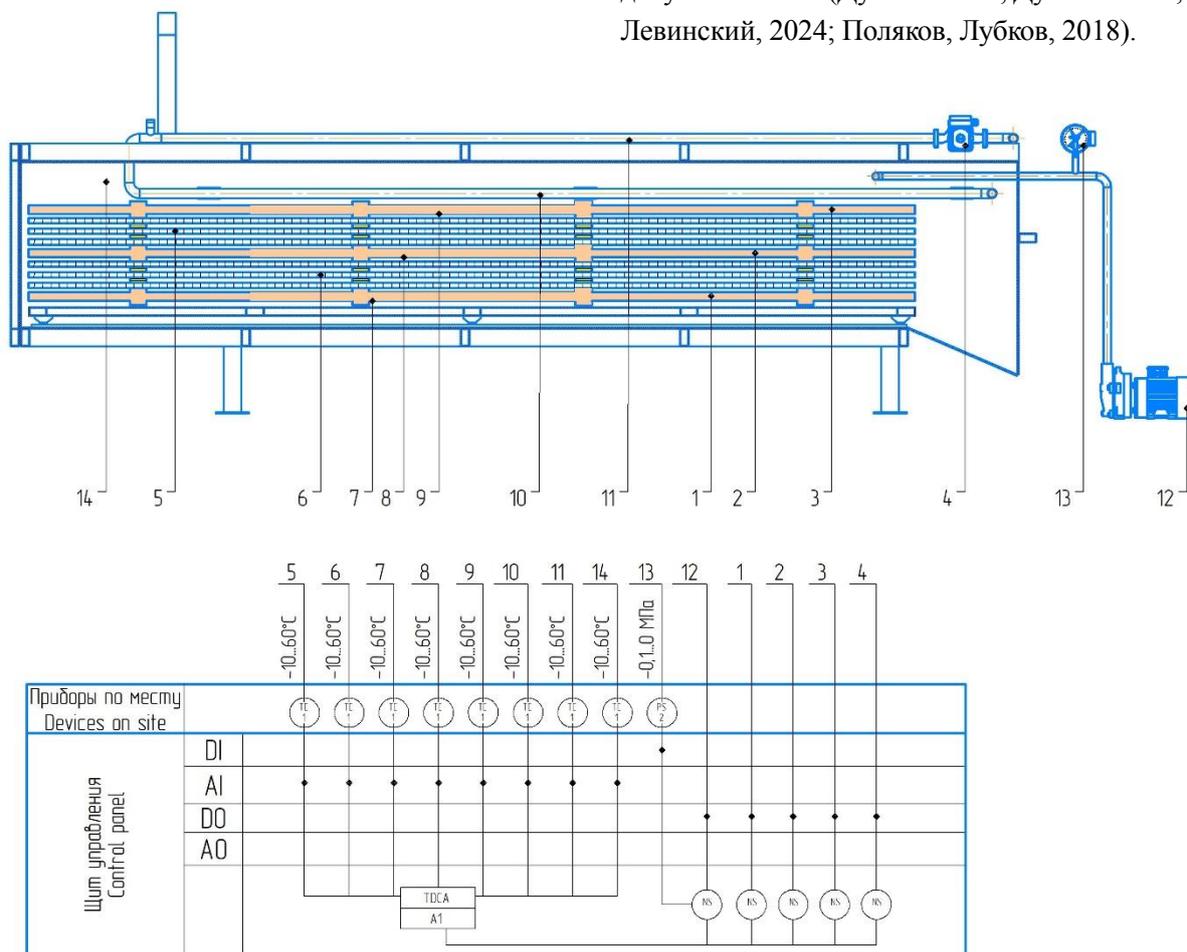


Рис. 7. Схема электрическая функциональная системы автоматического управления процессом сушки в инфракрасно-вакуумной установке:

1–3 – кассеты с пленочными электронагревателями; 4 – циркуляционный насос; 5, 6 – датчики температуры, установленные непосредственно в пиломатериале; 7–9 – датчики температуры пленочных электронагревателей; 10, 11 – датчики температуры на трубопроводе конденсационного узла; 12 – вакуумный насос;

13 – вакуумметр электроконтактный; 14 – датчик температуры среды внутри камеры

Fig. 7. Diagram of the electrical functional system for automatic control of the drying process in an infrared vacuum installation:

1–3 – cassettes with film electric heaters; 4 – circulation pump; 5, 6 – temperature sensors installed directly in the lumber; 7–9 – temperature sensors of film electric heaters; 10, 11 – temperature sensors on the pipeline of the condensation unit; 12 – vacuum pump; 13 – vacuum gauge electrocontact; 14 – ambient temperature sensor inside the chamber

Выводы

Предлагаемая конструкция герметичной камеры с выбором технологического оборудования и системы автоматического управления позволит решить следующие задачи исследования, которые заключаются в проведении экспериментов по отработке и корректировке режима для одной породы древесины, основанного:

– на согласовании спектральных характеристик образцов пород древесины с оптическими свойствами пленочных электронагревателей (Афонькина, 2023; Levinsky, 2024a; Interaction analysis..., 2020);

– на исследованиях, связанных с определением взаимосвязи изменения удельной мощности пленочных электронагревателей (воздействующей на единицу объема пиломатериала) на время сушки, на расход электрической энергии и другие параметры сушки (Левинский, 2024; Математическая модель..., 2020);

– на исследовании взаимосвязи изменения величины разрежения среды в камере на время

сушки, расход электрической энергии и другие параметры сушки (Мухаметзянов и др., 2019; Шагеева, 2022, 2023);

– на исследовании изменения параметров сушки в зависимости от наличия элементов принудительной системы конденсации и от изменения ее параметров (Артемов И. Н., Артемов И. И., 2022).

После выверенного режима на одной породе древесины будет произведена отработка для других пород. Анализ полученного набора данных по режимам сушки позволит сформировать определенные категории древесины, для которых режимы будут одинаковы, что упростит реализацию последующих исследований, в том числе при построении математических моделей. В совокупности решение всех задач позволит получить энергосберегающую технологию сушки с использованием низкотемпературных генераторов ИК-излучения в условиях вакуумной камеры, которая позволит уменьшить показатели времени сушки и затрат электроэнергии при выходе пиломатериала высокого качества.

Список источников

- Артемов И. Н., Артемов И. И. Использование уравнений регрессии для входящего и выходящего потока сушильного агента для экспериментальной сушильной камеры конденсационного типа // Инновации и инвестиции. 2022. № 2. С. 152–154.
- Афонькина В. А. Оптические свойства сельскохозяйственного сырья как основа технологии сушки // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2023. № 94. С. 12–19. DOI: 10.21515/1990-4665-194-002
- Великанов Н. Л., Наумов В. А., Корягин С. И. Перекачивание жидкости с использованием водокольцевого вакуумного насоса // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2020. № 8 (725). С. 51–59. DOI: 10.18698/0536-1044-2020-8-51-59
- Дунаев М. П., Дунаев А. М. Разработка автоматизированной системы научных исследований для изучения технологического процесса сушки древесины // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2019. Т. 1. С. 132–133.
- Исследование влияния температуры окружающей среды на параметры пленочного электронагревателя / В. Н. Левинский, В. М. Попов, Е. Н. Епишков, В. А. Афонькина // Аграрный научный журнал. 2024. № 7. С. 110–116. DOI: 10.28983/asj.y2024i7pp110-116
- Левинский В. Н. Повышение эффективности процесса ик-сушки пиломатериалов за счет адаптивности работы САУ // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 4 (142). DOI: 10.23670/IRJ.2024.142.131
- Математическая модель для обоснования параметров пленочного электронагревателя на основе высокоомной проволоки / В. М. Попов, Е. Н. Епишков, В. А. Афонькина, Е. И. Кривошеева // АПК России. 2020. Т. 27, № 2. С. 346–350.

- Мухаметзянов Ш. Р., Сафин Р. Р., Кайнов П. А.* Повышение энергоэффективной осциллирующей вакуумно-кондуктивной сушки пиломатериалов : монография // Казан. нац. исслед. технол. ун-т. Казань : Изд-во КНИТУ, 2019. 120 с.
- Наумов В. А., Великанов Н. Л., Шарков О. В.* Выбор вакуумных насосов для сушки сыров // Вестник КрасГАУ. 2024. № 7 (208). С. 194–200. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-7-194-200
- Очков А. А.* Перспектива создания современных высоковакуумных механических насосов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2022. № 1 (140). С. 103–137. DOI: 10.18698/0236-3941-2022-1-103-137
- Поляков С. И., Лубков В. О.* Совершенствование автоматизированного управления роликовой сушилкой для сушки шпона // Актуальные направления научных исследований XXI века : теория и практика. 2018. Т. 6, № 4(40). С. 361–366.
- Шагеева А. И.* Вакуумная СВЧ-сушка пиломатериалов в осциллирующем режиме : дис. ... канд. техн. наук / Шагеева Адиля Ильсуровна. Казань, 2023. 129 с.
- Шагеева А. И., Кайнов П. А., Сафин Р. Р.* Разработка эффективной схемы энергообеспечения процесса вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов // Деревообрабатывающая промышленность. 2022. № 3. С. 28–34.
- Interaction analysis of the electrotechnological system «emitter-material» in the process of heating and drying of food plant raw materials / *V. D. Ochirov, I. V. Altukhov, S. M. Bykova, M. A. Blokhnin* // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies. Krasnoyarsk, 2020. С. 62006.
- Levinsky V. N.* Justification of the effective distribution of energy emitted by a film electric heater on stacked lumber // BIO Web of Conferences. 2024a. Vol. 108. P. 20001. DOI: 10.1051/bioconf/202410820001
- Levinsky V. N.* Spectral analysis of various types of wood as the basis of low-temperature drying technology in vacuum conditions // BIO Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference «Methods for Synthesis of New Biologically Active Substances and Their Application in Various Industries of the World Economy – 2023» (MSNBAS2023). Moscow : Les Ulis, 2024b. Vol. 82. P. 05026. DOI: 10.1051/bioconf/20248205026
- Rodionov Y. V., Selivanov D. V., Nikitin D. V.* Design of Liquid-Ring Vacuum Pump with Adjustable Degree of Internal Compression // Chemical and Petroleum Engineering. 2021. Vol. 57, № 5–6. P. 477–483. DOI: 10.1007/s10556-021-00962-5

References

- A mathematical model for substantiating the parameters of a film electric heater based on high-resistance wire / *V. M. Popov, E. N. Epishkov, V. A. Afonkina, E. I. Krivosheeva* // Agroindustrial Complex of Russia. 2020. Vol. 27, № 2. P. 346–350. (In Russ.)
- Analysis of the interaction of the electrotechnological system “radiator-material” in the process of heating and drying of food plant raw materials / *V. D. Ochirov, I. V. Altukhov, S. M. Bykova, M. A. Blokhnin* // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. III International Scientific Conference “AGROTECH-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnology”. Krasnoyarsk, 2020. P. 62006.
- Artyomov I. N., Artyomov I. I.* The use of regression equations for the incoming and outgoing flow of drying agent for an experimental drying chamber of condensation type // Innovations and investments. 2022. № 2. P. 152–154. (In Russ.)
- Dunaev M. P., Dunaev A. M.* Development of an automated scientific research system for studying the technological process of wood drying // Modern technologies and scientific and technological progress. 2019. Vol. 1. P. 132–133. (In Russ.)

- Interaction analysis of the electrotechnological system «emitter-material» in the process of heating and drying of food plant raw materials / *V. D. Ochirov, I. V. Altukhov, S. M. Bykova, M. A. Blokhnin* // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies. Krasnoyarsk, 2020. С. 62006.
- Investigation of the influence of ambient temperature on the parameters of a film electric heater / *V. N. Levinsky, V. M. Popov, E. N. Epishkov, V. A. Afonkina* // Agrarian Scientific Journal. 2024. № 7. P. 110–116. DOI 10.28983/asj.y2024i7pp110-116 (In Russ.)
- Levinsky V. N.* Improving the efficiency of ic-suk mathematicians due to the adaptability of ACS // International Scientific Research Journal. 2024. № 4(142). DOI: 10.23670/IRJ.2024.142.131 (In Russ.)
- Levinsky V. N.* Justification of the effective distribution of energy emitted by a film electric heater on stacked lumber // BIO Web of Conferences. 2024a. Vol. 108. P. 20001. DOI: 10.1051/bioconf/202410820001
- Levinsky V. N.* Spectral analysis of various types of wood as the basis of low-temperature drying technology in vacuum conditions // BIO Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference «Methods for Synthesis of New Biologically Active Substances and Their Application in Various Industries of the World Economy – 2023» (MSNBAS2023), Moscow : Les Ulis, 2024b. Vol. 82. P. 05026. DOI: 10.1051/bioconf/20248205026
- Mukhametzhanov Sh. R., Safin R. R., Kainov P. A.* Improving energy-efficient oscillating vacuum–conductive drying of lumber : monograph / Kazan National University. research. technol. un-t. Kazan : KNRTU Publishing House, 2019. 120 p.
- Naumov V. A., Velikanov N. L., Sharkov O. V.* The choice of vacuum pumps for cheese drying // Bulletin of KrasGAU. 2024. № 7(208). P. 194–200. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-7-194-200 (In Russ.)
- Ochok A. A.* The prospect of creating modern high-vacuum mechanical pumps // Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. The Mechanical Engineering series. 2022. № 1(140). P. 103–137. DOI: 10.18698/0236-3941-2022-1-103-137 (In Russ.)
- Polyakov S. I., Lyubkov V. O.* The introduction of automated role-playing game management for sukispan // Operational management Scientific research of the XXI century: theory and practice. 2018. Vol. 6, № 4(40). P. 361–366. (In Russ.)
- Rodionov Y. V., Selivanov D. V., Nikitin D. V.* Design of Liquid-Ring Vacuum Pump with Adjustable Degree of Internal Compression // Chemical and Petroleum Engineering. 2021. Vol. 57, № 5–6. P. 477–483. DOI: 10.1007/s10556-021-00962-5
- Shageeva A. I.* Vacuum microwave drying of lumber in oscillating mode : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Shageeva Adilya Ilsurovna. Kazan, 2023. 129 p.
- Shageeva A. I., Kainov P. A., Safin R. R.* Development of an effective energy supply scheme for the process of vacuum microwave drying of lumber // The woodworking industry. 2022. № 3. P. 28–34. (In Russ.)
- Velikanov N. L., Naumov V. A., Koryagin S. I.* Pumping liquid using a water ring vacuum pump // News of higher educational institutions. Mechanical engineering. 2020. № 8(725). P. 51–59. DOI: 10.18698/0536-1044-2020-8-51-59 (In Russ.)

Информация об авторах

В. Н. Левинский – кандидат технических наук.

Information about the authors

V. N. Levinsky – Candidate of Technical Sciences.

Статья поступила в редакцию 27.03.2025; принята к публикации 28.04.2025.

The article was submitted 27.03.2025; accepted for publication 28.04.2025.
