

3. **Мамасаидов, М.Т.** Определения параметры рабочего органа камнекольного пресса [Текст] / М.Т. Мамасаидов, Р.А. Мендекеев, И.Э.Исаев // Наука. Образование. Техника. - Ош: КУУ, 2007.- №1.- 99с.
4. **Мамасаидов, М.Т.** Исследование динамики винтового камнекольного пресса [Текст] / М.Т. Мамасаидов, Р.А. Мендекеев, И.Э.Исаев // Научно-технич. обеспечение горного производства: Матер. между. науч.-практ. конф. Гр. ИГД им. Кунаева. Том 68. – Алматы, 2005. – Ч1. – 158 с.
5. **Мамасаидов, М.Т.** Обоснование параметров гидравлического камнекольного пресса с нижним расположением гидроцилиндра [Текст] / М.Т. Мамасаидов, Р.А. Мендекеев, И.Э.Исаев // Мат. между. научно-практич. конф. Вестник.- Каракол: ИГУ, 2007.- №18.-135с.
6. **Исманов, М.М.** Условие динамической прочности элементов станины механического камнекольного пресса [Текст] / М.М.Исманов, М.Т.Мамасаидов, И.Э.Исаев // Вестник Иссык-Кульского универ.-Каракол: ИГУ, 2023. - №55. - С. 208-216.
7. **Мамасаидов, М.Т.** Методика определения рациональных параметров винтового механизма камнекольного пресса ВКП-1 [Текст] / М.Т. Мамасаидов, Р.А. Мендекеев, И.Э.Исаев // Наука и новые технологии. №2 – Бишкек: МОНиМП КР, 2006. – С.11-13.
8. **Мамасаидов, М.Т.** К разработке конструкции механического камнекольного пресса МКП-300 [Текст] / М.Т. Мамасаидов, М.М.Исманов, И.Э.Исаев // Наука. Образование. Техника.- Ош: КУУ, 2019.-№2.- 68с.

Поступила в редакцию: 12.01.2024 г.

УДК.662.997.534.

Кенжаев И.Г.

д.т.н., профессор, Ошский государственный университет, Кыргызская Республика

Абдырахман у. К.

к.т.н., доцент, Институт природных ресурсов ЮО НАН КР, Кыргызская Республика

Абулова Н.Л.

соискатель, Институт природных ресурсов ЮО НАН КР, Кыргызская Республика

КҮН КУРГАТУУЧУ КУРАМАДА ИНФРАКЫЗЫЛ ЖЫЛУУЛУК АРКЫЛУУ МӨМӨЛӨРДҮ КУРГАТУУ ДИНАМИКАСЫНА ТЕМПЕРАТУРА ТАЛААСЫНЫН ТААСИРИН ИЗИЛДӨӨ

Бул жумушта изилдөө предмети болуп, конструкциясында ишинин натыйжалуулугун жогорулатуу үчүн инфракызыл нурлануу каралган "Термика" күн кургатуу курамада продуктуларды кургатуу учурундагы алардын көлөмүндө болуп жаткан жылуулук массалык алмашуу процесстери эсептелинет. Эсептөө жана теориялык изилдөөлөрдүн максаты күн кургатуучу жайда инфракызыл жылытуу учурунда кургатылуучу продуктуга температуралык талаанын пайда болушун жана таасир этүү багытын аныктоо. Изилдөөдө математикалык ыкма жана жылуулук алмашуу процесстерин моделдөө усулдары колдонулат. Инфракызыл жылуулук иштетүүдө продуктту ар тараптан ысытканда суперпозиция принциби деп аталган, башкача айтканда, кургатылган продуктка таасир этүүчү жылуулук агымынын көбөйүшү аныкталган. Алынган жыйынтыктар инфракызыл нурланууда продукцияны кургатуу процесси тездейт деген тыянак чыгарууга мүмкүндүк берет. Күн кургатуучу курамалардын жаңы түрлөрүн иштеп чыгууда алардын конструкциясында инфракызыл нурлануу элементтерин киргизүү сунушталат.

***Негизги сөздөр:** күн кургатуучу курама; буулануу; жылуулук балансы; жылуулук агымы; суперпозиция, инфракызыл.*

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА ДИНАМИКУ СУШКИ ПРОДУКТОВ ПРИ ИХ ИНФРАКРАСНОМ НАГРЕВЕ В СОЛНЕЧНЫХ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

Предметом исследования данной работы является тепло массообменные процессы, происходящие в объеме продуктов при их сушке в солнечной сушильной установке «Термика», в конструкции которой для повышения эффективности ее работы предусмотрен инфракрасное

излучение. Расчетно-теоретические исследования проводились с целью определения возникновения и направления действия температурного поля на высушиваемый продукт при их инфракрасном нагреве в солнечной сушильной установке. В исследованиях использован метод математического моделирования теплообменных процессов. Установлено, что при нагреве продукта из разных сторон при инфракрасной тепловой обработке происходит так называемый принцип суперпозиции, то есть усиления суммарного теплового потока, действующего на высушиваемый продукт. Полученные результаты позволяют делать вывод о том, что при инфракрасном излучении происходит ускорения процесса сушки продуктов. Рекомендуется при разработке новых типов солнечных сушильных установок предусмотреть в конструкции элементов инфракрасного излучения.

Ключевые слова: солнечная сушильная установка; испарение; тепловой баланс; тепловой поток; суперпозиция; инфракрасное излучение.

STUDIES OF THE INFLUENCE OF THE TEMPERATURE FIELD ON THE DYNAMICS OF DRYING PRODUCTS DURING THEIR INFRARED HEATING IN SOLAR DRYING PLATS

The subject of research of the presented work is the heat and mass transfer processes occurring in the volume of products during their drying in the "Thermika" solar drying plant, in the design of which infrared radiation is provided to increase the efficiency of its operation. Computational and theoretical studies were carried out to determine the occurrence and direction of the effect of the temperature field on the dried product during their infrared heating in a solar drying unit. The research uses the method of mathematical modeling of heat exchange processes. It has been established that when the product is heated from different sides during infrared heat treatment, the so-called superposition principle occurs, that is, the total heat flow acting on the dried product is enhanced. The results obtained allow us to conclude that infrared radiation accelerates the drying process of products. It is recommended to include infrared radiation elements in the design when developing new types of solar drying plants.

Keywords: solar drying plant; evaporation; thermal balance; heat flow; superposition; infrared radiation.

Введение. На практике известны ряд способов, осуществляющие сушки продуктов, сущность которых заключается в удалении влаги из продукта до той степени, чтобы продукты могли сохраняться достаточно долгое время и были удобной для их транспортировки. Наиболее перспективным в этом направлении является создание устройств предназначенные для сушки сельхозпродуктов с использованием солнечной энергии путем преобразования ее в тепловую.

В течении ряда лет нами проводятся теоретические и экспериментальные исследования по разработке и созданию солнечных сушильных установок (ССУ) различных конструкций. Эти исследования проводились в основном с целью улучшения теплотехнических и экономических характеристик установок.

В работе [1] представлена новая конструкция солнечной сушильной установки (ССУ) под названием «Термика» с возможностью повышения эффективности ее работы с тем, чтобы сделать возможной облучение ИК-излучением не только верхнюю, но и боковые и нижние части продуктов и тем самым интенсифицировать процесса сушки продуктов, имеющих сфероподобную форму. В предлагаемом ССУ высушиваемый продукт нагревается двумя способами: во-первых, конвективным способом - от нагретого в камере ССУ воздуха и во – вторых – ИК излучением, исходящим от листа и от его ребер.

В работе [2] нами представлены результаты проведенных экспериментальных исследований по изучению динамики теплового фронта в высушиваемых продуктах в солнечной сушильной установке «Термика». Для этой цели создана экспериментальная база для проведения экспериментальных исследований по выявлению скорости распространения температуры в объеме объекта сушки. На базе созданного экспериментального стенда

проведены экспериментальные исследования процесса сушки сельхозпродуктов в ССУ «Термика» и на открытом воздухе. Получены сравнительные данные, характеризующие динамику развития теплового фронта в объектах сушки. При этом экспериментально доказано, что наличие дополнительного источника инфракрасного излучения в камере сушки в виде металлического ребра перпендикулярного относительно верхнего металлического листа – теплообменника позволяет повысить скорость сушки.

В настоящей статье приведены результаты расчетно-теоретических исследований по изучению особенности процесса сушки при инфракрасном нагреве высушиваемых продуктов. То есть *объектом исследований* является процесс сушки происходящее в камере ССУ при многостороннем тепло подводе с использованием инфракрасного излучения.

Тепло массообменные процессы, происходящие в продуктах при их инфракрасном излучении в камере сушки, является *предметом* исследований.

Целью настоящей работы заключается в развитии результатов экспериментальных исследований по изучению динамику распространения теплового фронта в высушиваемых продуктах, полученных в работе [2] путем проведения расчетно-теоретических исследований температурного поля при их инфракрасном(ИК) нагреве в солнечной сушильной установке. В исследованиях использован *метод* математического моделирование теплообменных процессов происходящих при сушке сельхозпродуктов имеющие сферические формы.

Методы и материалы. Возникновения теплового потока в камере сушки, и распределения теплового поле по объему продукта, можно представить на примере условной схемы, показанной на рисунке 1. Конструкционной особенностью, разработанной нами, ССУ «Термика» заключается в том, что тепловой поток подводится к объекту сушки инфракрасным излучением(ИК) с разных сторон.

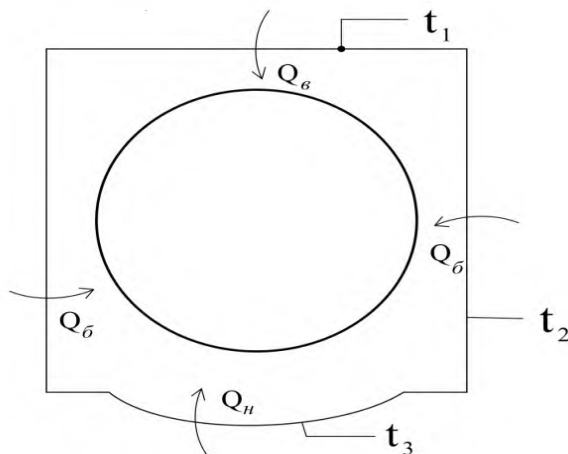


Рисунок 1 - Схематическое изображение подвода теплоты к высушиваемому продукту при их нагреве инфракрасным излучением в камере сушки.

Как видно из схематического изображения (рисунок 1.) подвод теплоты к высушиваемому продукту при их нагреве инфракрасным излучением в камере сушки осуществляется со всех сторон. При этом общий тепловой поток [1,2,3], может быть определен как сумма тепловых потоков подведенных к высушиваемому продукту сверху Q_b , снизу Q_n , и с боков $Q_б$.

$$Q_{ИК} = Q_b + Q_n + 2Q_б. \quad (1)$$

В свою очередь Q_b , Q_n , $Q_б$, согласно закона Стефана-Больцмана [4,5] определяются как:

$$Q_{\text{в}} = \delta(T_1 - T_{\text{пр}})^4. \quad (2)$$

$$Q_{\text{б}} = \delta(T_2 - T_{\text{пр}})^4. \quad (3)$$

$$Q_{\text{н}} = \delta(T_3 - T_{\text{пр}})^4. \quad (4)$$

С учетом (4), (3) и (2) формулу (1) перепишем как:

$$Q_{\text{ИК}} = \delta[(T_1 - T_{\text{пр}})^4 + (T_2 - T_{\text{пр}})^4 + (T_3 - T_{\text{пр}})^4], \quad (5)$$

где: $T_1, T_2,$ и T_3 - соответственно температуры измеренные с верхней, боковых и нижней частей высушиваемого продукта; $T_{\text{пр}}$ – температура окружающей среды.

Результаты. Как известно, процесс сушки сопровождается тепло массообменным процессом, то есть происходит испарения продукта. Согласно [5, 6] теплота испарения из высушиваемого продукта определяется как [2]:

$$Q_{\text{исп}} = rm, \quad (6)$$

где: r – теплота парообразования, m – испаряемая масса

Согласно тепловой модели представленной выше, других источников для подачи тепла на испарения нет, кроме теплоты, определяемое по формуле (5).

Тогда с учетом (5) и (6) на основе уравнения теплового баланса имеем:

$$rm = \delta[(T_1 - T_{\text{пр}})^4 + (T_2 - T_{\text{пр}})^4 + (T_3 - T_{\text{пр}})^4]. \quad (7)$$

Естественно, количество влаги, удеваемая из высушиваемого продукта, увеличивается со временем, одновременно происходит и проникновения теплового фронта вглубь по всему объему высушиваемого продукта. Учитывая вышесказанное, формулу (7) можно переписать в следующей дифференциальной форме:

$$r \frac{dm}{d\tau} = \delta[(T_1 - T_{\text{пр}})^4 + (T_2 - T_{\text{пр}})^4 + (T_3 - T_{\text{пр}})^4] \frac{dt}{dx}. \quad (8)$$

Обозначим, для простоты формулы:

$$\alpha = \delta(T_1 - T_{\text{пр}})^4 + (T_2 - T_{\text{пр}})^4 + (T_3 - T_{\text{пр}})^4 \text{ тогда}$$

$$r \frac{dm}{d\tau} = \delta\alpha \frac{dt}{dx}. \quad (9)$$

$$\frac{dt}{dx} = \frac{r}{\delta\alpha} \frac{dm}{d\tau}. \quad (10)$$

Формула (10) определяет изменения теплового фронта в течении времени ($d\tau$) по толщине (dx) высушиваемого продукта.

Проведенные многочисленные экспериментальные исследования на ССУ «Термика» при комбинированной сушке с использованием ИК – излучения показали, что минимальная остаточная влажность в продукте составляет 4.5%. Если считать по массе остаточная влага составит $dm = 0,045$ г, а время сушки, за которое высушиваемый продукт доходит до сушеного состояния, составит $dt = 9$ часов.

Значения dm и dt , определяются экспериментально и являются постоянными числами. Тогда формулу (10) перепишем так:

$$dt = \frac{r}{\gamma \alpha} \frac{dm}{d\tau} dx. \quad (11)$$

Так, обозначим

$$\alpha = \frac{r}{\gamma \alpha} \frac{dm}{d\tau} dx, \text{ то } dt = \alpha dx. \quad (12)$$

Выражение (12) позволяет охарактеризовать динамику развития теплового фронта по объему высушиваемого продукта. Необходимо отметить, что единственным условием применения вышеприведенной формулы для расчета линий теплового фронта является однородность высушиваемого продукта.

В расчетах в качестве примера высушиваемого объекта был принят молочный продукт под названием «курут», который традиционно имеет сферическую форму.

Для полноты представления развития теплового фронта по объему высушиваемого продукта используем схематические изображения, приведенные ниже. На рисунке 2 представлена распространения теплоты передаваемое к высушиваемому продукту с верхней стены ССУ. Теплота излучения из верхней стены, на нижнюю полусферу (точки А-А₁), доходит с опозданием на некоторое время с потерей определенного количества теплоты. Если учесть, что скорость распространения инфракрасного излучение [5,8,9], практически является скоростью света, опозданием по времени, можно пренебречь. Для получения реальную картину линий теплового фронта, нам необходимо учитывать потерю тепловой энергии при ее распространении на воздушном пространстве.

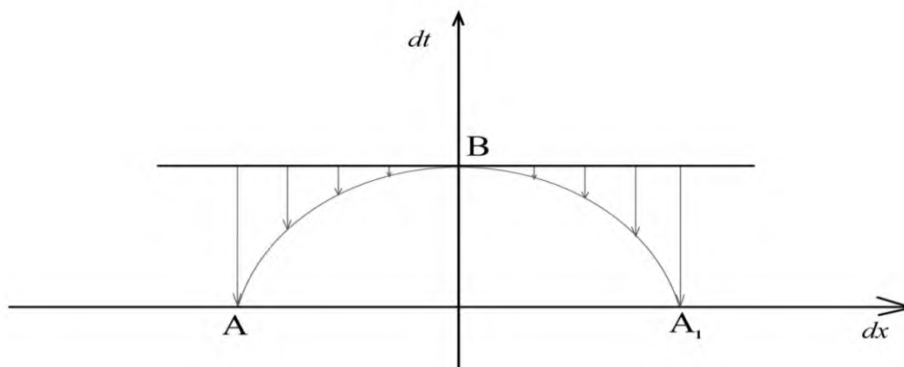


Рисунок 2 - Распространения температуры верхней стены.

Рассмотрим случай, когда часть высушиваемого продукта нагревается за счет теплового потока, исходящего из двух стен, при этом, оба источника (Q_1 и Q_2) в результате интерференции, сливаются и поступают на поверхность продукта как один источник (рисунок 3).

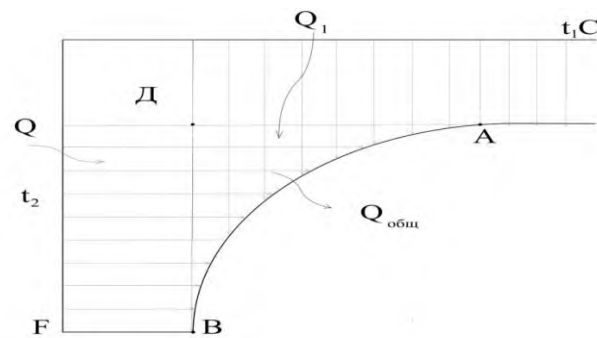


Рисунок 3 - Тепловой фронт высушиваемого продукта.

Как показывают эксперименты $t_1 \geq t_2$. Учитывая, что металлические стены соединены между собой, и между ними имеет место кондуктивный теплообмен, можно пренебречь условие $t_1 \geq t_2$, и принимаем как $t_1 = t_2$. Учитывая, одинаковость расстояние от высушиваемого продукта до стен, то есть $CA=FB$, согласно принципу суперпозиции [4], имеем

$$Q_{\text{общ}} = Q_1 + Q_2. \quad (13)$$

Формула (13), имеет место для участки высушиваемого продукта на контуре «АДВ». Таким образом часть высушиваемого продукта, ограниченная контуром АДВ, нагревается в силу поступления на данный участок, удвоенное тепловое излучение, равное $Q_{\text{общ}}$. Линия теплового фронта при вышеприведенном тепло подводе к высушиваемому продукту имеет вид, представленной на рисунке 4.

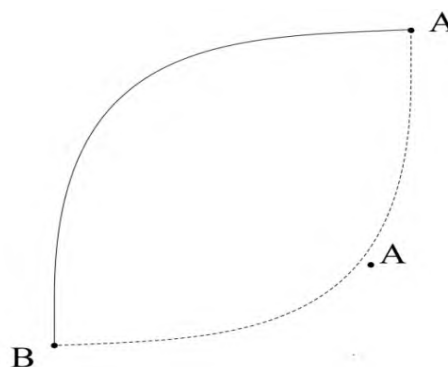


Рисунок 4 - Линия теплового фронта.

Учитывая принцип суперпозиции, и формулу (13), можно предполагать, что, скорость температурного градиента, в два раза выше. С учетом сказанного формулу (12) для рассматриваемого участка высушиваемого продукта переписываем как:

$$dt = 2 \alpha dx. \quad (14)$$

Согласно тепловой модели высушиваемого продукта, представленной на рисунке 1., распространения теплового фронта происходит симметрично, и в другой противоположной стороне высушиваемого продукта. Тогда, тепловой фронт для верхнего полушария высушиваемого продукта может быть представлен, как показан на рисунке 5. Здесь точки А и

L является минимальными точками углубления температурного градиента в высушиваемом продукте.

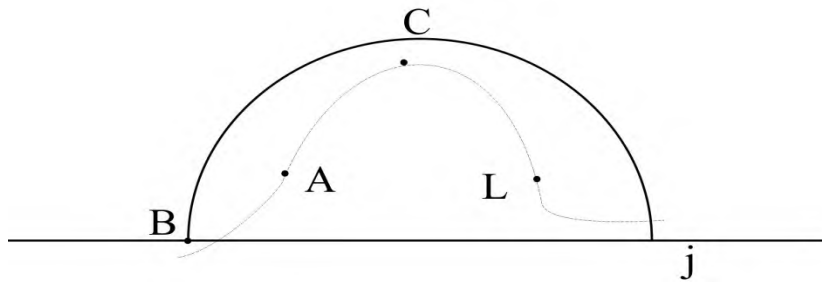


Рисунок 5 - Углубления температурного градиента.

Распространения теплового фронта в нижней части нижнего полушария картина представляется по-другому. Так, как, согласно (5) формуле, нижняя стена разделена от верхней, и, он теоретически остается не нагретой инфракрасными излучениями [1,7]. Однако, к высушиваемому продукту подводится теплота Q_6 образующаяся от инфракрасных излучений боковых стен (рисунок 1). Распространения теплового фронта в объеме высушиваемого продукта описывается по формуле (12), а картину распространения может быть представлена в виде полукруга (рисунок 6).

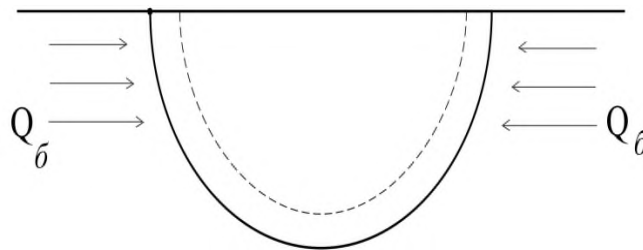


Рисунок 6 - Распространения температуры нижней стены.

Обобщая картины, приведенные на рисунках 5 и 6 можно представить общую картину развития теплового фронта, как показана на рисунке 7.

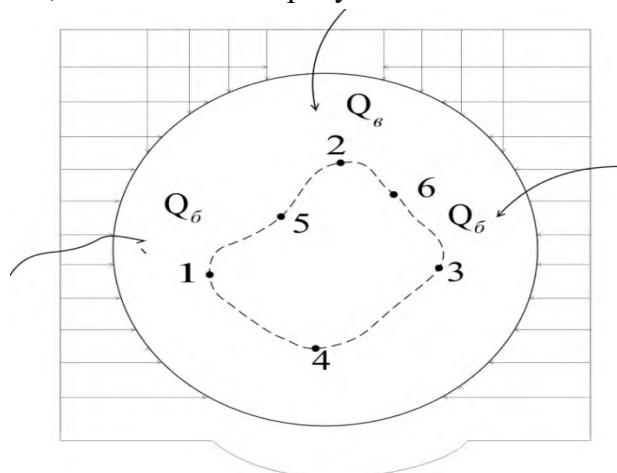


Рисунок 7 - Общая развития теплового фронта.

Обсуждение. Представленную на рисунке 7 картину развития теплового фронта полученную на основе расчетно - теоретических исследований можно охарактеризовать следующим образом:

Тепловой фронт в высушиваемом продукте имеет не однородный характер. Максимальное углубление теплового фронта происходит на точках 5 и 6, так как на эти точки приходится максимальные поступления инфракрасных излучений, [4,10,15] которое определяется принципом суперпозиции.

Самое низкое углубления фронта приходится на точку А, где практически отсутствуют участие инфракрасных излучений, однако указанный участок высушиваемого продукта нагревается теплопроводностью за счет нижней стены.

Выводы:

1. Разработана математическая модель тепло массообменного процесса при многостороннем нагреве продуктов инфракрасным потоком;
2. Расчетно-теоретическим путем оценены скорости развития теплового фронта в высушиваемом продукте при их инфракрасном нагреве за счет тепловых излучений, исходящего от верхнего металлического листа и боковых металлических ребер. Как показали расчеты, при многостороннем нагреве скорость развития теплового фронта существенно растет, и тем самым обуславливается скорость сушки продуктов в целом;
3. Тепловой фронт в высушиваемом продукте имеет не однородный характер. На его верхней части скорость развития теплового фронта имеет относительно низкую скорость в силу индукционного препятствия движения удаляющегося влаги на вверх. А на его нижней части вектор направления удаления влаги и передачи тепла совпадают, и в связи с этим наблюдается более высокая скорость теплового фронта относительно верхней части продукта

Список литературы:

1. Патент 120 Кыргызская Республика, Солнечная сушильная установка «Термика» [Текст] / А.И. Исманжанов, К. Абдырахман у., Н.Л. Абулова. - № 120.
2. **Абулова, Н.Л.** Разработка экспериментального стенда для изучения динамики теплового фронта в высушиваемых продуктах [Текст] / Н.Л. Абулова, К. Абдырахман у., И.Г. Кенжаев // Бюллетень науки и практики. – 2021. - Т. 7. - № 10. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/71/29>
3. **Лыков, А.В.** Теория сушки [Текст] / А.В. Лыков. – Москва, 1968. - 472 с.
4. **Сажин, Б.С.** Основы техники сушки [Текст] / Б.С. Сажин. – М.: Химия, 1984.
5. **Савельев, И.В.** Курс общей физики [Текст] / И.В. Савельев. – Астрель, 2001.
6. **Савельев, И.В.** Курс общей физики [Текст] / И.В. Савельев // Механика. Молекулярная физика.– Москва, 1982. – Т.1.
7. **Берман, Л.Д.** Испарительное охлаждение циркуляционной воды [Текст] / Л.Д. Берман.– Москва, 1957.
8. **Кенжаев, И.Г.** К вопросу разработки эффективного способа подвода тепла в процесс сушки сельхозпродуктов с использованием солнечной энергии [Текст] / И.Г. Кенжаев, К. Абдырахман у., Н.Л. Абулова. – Ош: Вестник ОшГУ, 2019. - № 2.
9. **Лыков, А.В.** Теория тепла и массопереноса [Текст] / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – Москва, 1963.
10. **Воскресенский, К.Д.** Сборник расчетов и задач по теплопередаче [Текст] / К.Д. Воскресенский. – Москва, 1959. – 336 с.
11. **Баскакова, А.П.** Теплотехника [Текст] / А.П. Баскакова. – Москва, 1991.
12. **Фукс, Н.А.** Испарение и рост капель в газообразной среде [Текст] / Н.А. Фукс. – Москва, 1958.
13. **Козелкин, В.В.** Основы инфракрасной техники [Текст] / В.В. Козелкин, Ф.И. Усольцев. – Москва, 1967.
14. **Апальков, А.Ф.** Теплотехника [Текст] / А.Ф. Апальков. – Феникс, 1967.
15. **Харченко, Н.В.** Индивидуальные солнечные установки [Текст] / Н.В. Харченко. – Москва, 1991. – 208 с.
16. **Михеев, М.А.** Основы теплопередачи [Текст] / М.А. Михеев. – М.: Госэнергоиздат, 1986.

Поступила в редакцию: 13.01.2024 г.