

РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНОЙ СУШИЛКИ-ПАРНИКА С ТЕПЛОВЫМ АККУМУЛЯТОРОМ

Ж.С.Ахатов, А.С.Халимов, Э.Т.Жураев, Х.Ф.Сайфиева, А.Э.Ибраимов

*Физико-технический институт НПО “Физика-Солнце” АН РУз,
Ташкентский Государственный технический университет
Бодомзор йули 2Б, 100084-Ташкент, Узбекистан.
Tel: (+998)-71-2354050; E-mail: jahatov@gmail.com*

Аннотация

В данной работе представлены результаты расчетных и экспериментальных исследований по определению теплотехнических характеристик солнечной сушилки-парника с тепловым аккумулятором. В целях выполнения моделирование процессов теплопередачи в рассматриваемой установке создана ее САД модель с помощью ПО “Solid Works Flow Simulation”.

В условиях Узбекистана, в решении задачи переработки и хранения, в частности сушки сельхозпродуктов, наиболее перспективным является использование солнечных сушильных установок. Преимуществами солнечных сушильных установок: во-первых, позволит сэкономить топливно-энергетические ресурсы и улучшению экологичности производства; во-вторых, сезон созревания и переработки сельхозпродукции совпадает с периодом наибольшего прихода солнечной радиации. Недостатками солнечных сушильных установок являются зависимость от погодных условий, большая продолжительность процесса сушки и снижение эффективности при отсутствии солнечного излучения.

В связи с вышеизложенного, рассматривается возможность разработки и создания солнечной сушильной установки, имеющей аккумулятора тепла. Применение аккумуляторов тепла в солнечных сушильных установках позволяет повысить их эффективность при отсутствии солнечного излучения.

Разработана солнечная сушильная установка (ССУ), имеющая аккумулятора тепла, с возможностью сезонного использования в качестве парника. Необходимо отметить, что для обеспечения экономической эффективности солнечных энергоустановок, важно увеличить количество часов их работы в год, которого можно достичь благодаря созданию комбинированных солнечных установок, использующихся, в зависимости от сезона, для различных целей – сушка или парника. Учитывая этот факт, предлагается использование ССУ в качестве солнечной сушилки-парника (ССП) для выращивания овощей или фруктов в течение осенне-зимнего периода, которое привело бы к повышению эффективности ССУ.

На основе разработанного нами дизайна ССУ и ее геометрических размеров, проводились численные расчеты по определению оптимального объема водяного теплового аккумулятора в данной установке, используемой в режиме парника.

Основные узлы установки: фундамент из бетона (3×4 м), щебень толщиной 20 см рассыпан на полу ССП для теплоизоляции, металлоконструкция, в которой прикреплены светопрозрачные покрытия, состоящие из двухслойного поликарбонатного листов толщиной 6 мм, имеющего воздушную прослойку между слоями. Северная кирпичная стена с соответствующим размером 2×4м и толщиной 0,4 м. Фронтальная поверхность уклонена на 39,53° относительно горизонтальной поверхности для максимального падения солнечной радиации на ее поверхность. Сделаны отверстия на переднем покрытии камеры для входа воздушного потока в

ССП из окружающей среды и на верхней части установки для выхода влажного воздушного потока из камеры.

Для того, чтобы моделировать процессы теплопередачи в рассматриваемой ССП создана ее CAD модель (рис.1.) с помощью ПО “SolidWorks Flow Simulation”, которая одновременно решает уравнения Навье-Стокса, являющимся формулировкой законов сохранения массы, момента и энергии для движущихся жидкостей (газ и жидкость).

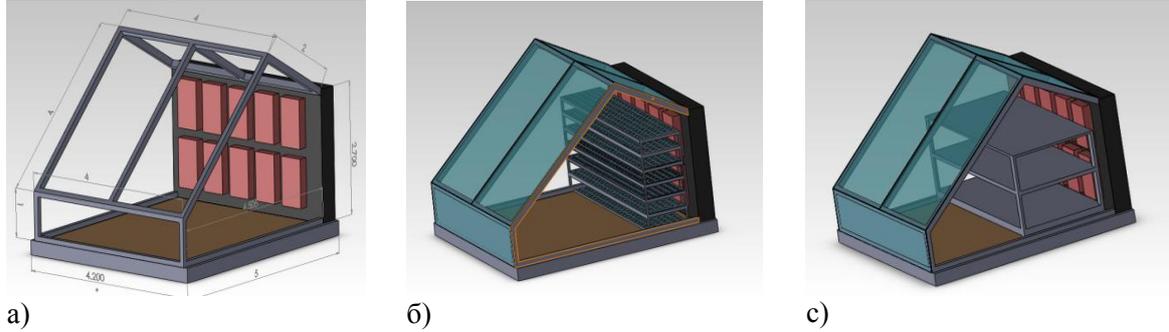


Рис.1: Общий вид CAD дизайн (а) конструкции, разрез сечения камеры ССУ с аккумуляторами тепла (б) в режиме сушки и с) в режиме парника.

Уравнения Навье-Стокса дополняются уравнениями состояния газа, определяющие природу газа или жидкость, и эмпирическими зависимостями плотности, вязкости и теплопроводности жидкости от температуры. В частности задача в конечном итоге определяется формулировкой геометрии, и ее граничными и начальными условиями.

Законы сохранения массы, момента импульса и энергии в прямоугольной системе координат, вращающейся с угловой скоростью Ω вокруг оси, проходящей через начало системы координат можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial P}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i H)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial P}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x} + \rho \varepsilon + S_i u_i \quad (3)$$

$$H = h + \frac{u^2}{2} \quad (4)$$

где u – скорость жидкости (в данном случае газ – воздух имеется в виду), ρ – плотность жидкости, S_i – массовая распределенная внешняя сила на единицу массы из-за сопротивления пористой среды ($S_{i\text{porous}}$), плавучесть ($S_{i\text{gravity}} = -\rho g_i$, где g_i компонент гравитационного ускорения по i -му направлению координата), и вращения координатной системы ($S_{i\text{rotation}}$), т.е. $S_i = S_{i\text{porous}} + S_{i\text{gravity}} + S_{i\text{rotation}}$, h – тепловая энтальпия, Q_H – источник тепла или получения тепла в единицу объема, τ_{ij} тензорное напряжение сдвига вязкости, q_i – диффузный тепловой поток. Нижние индексы были использованы для обозначения суммирования трех координатных направлений.

Для вычисления потока используется следующее уравнение для энергии:

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i (E + \frac{P}{\rho}))}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial P}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H \quad (5)$$

$$E = e + \frac{u^2}{2} \quad (6)$$

где e – внутренняя энергия.

Основные уравнения решаются методом конечного объема (конечный элемент) на пространственно прямоугольной сетке, спроектированной в декартовой системе координат с ортогональными плоскостями к ее оси и локально уточненной на твердом или жидком разделе поверхности.

Все использованные входные данные были введены согласно метеоданным для города Ташкента. Данные являются начальными и граничными условиями для численного решения уравнений 1-5. Проводились численные расчеты при различных объемах тепловых аккумуляторов. Полученные результаты показывают, что оптимальный объем теплового аккумулятора для данной ССП составляет 500л.

Распределение температуры в разные времени суток представлены на рис.2.

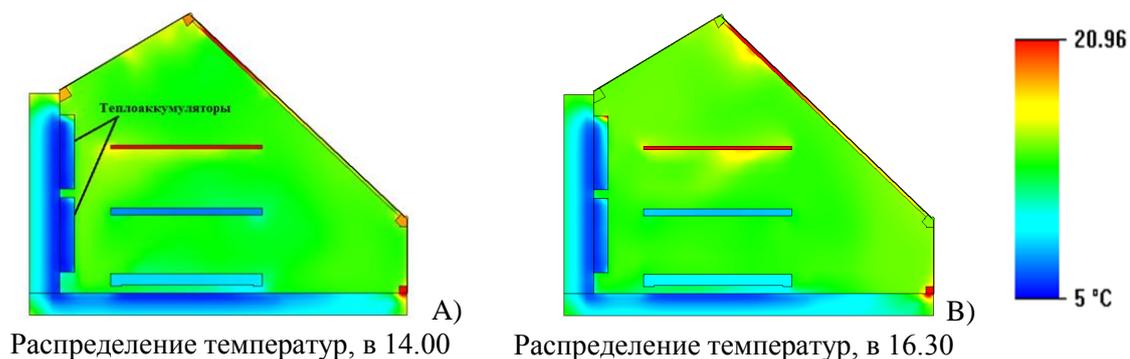


Рис 2. Распределение температуры ($^{\circ}\text{C}$) воздуха в камере ССП с аккумулятором тепла в течение разного времени суток. Октябрь месяца (г.Ташкент).

Согласно расчетам, на рис.3 показано распределение скорости воздушного потока в камере ССП при максимальном падении солнечной радиации, т.е. в этот момент скорость воздушного потока достигает максимального значения, так как конвективный теплообмен внутри камеры происходит при естественной конвекции.

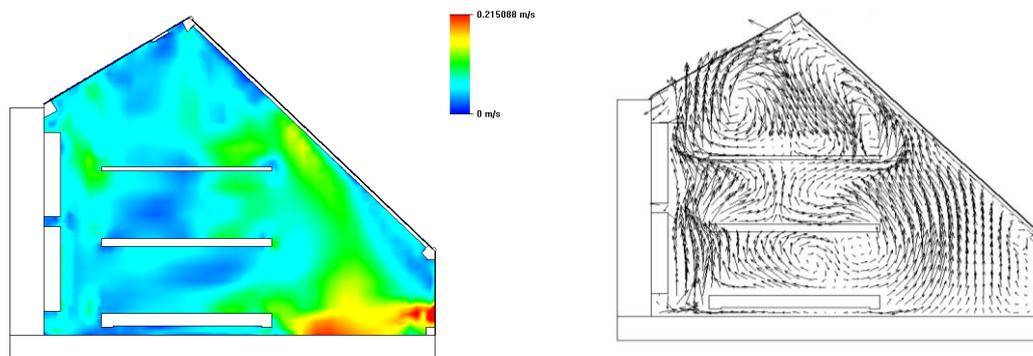


Рис.3. Распределение скорости и вектора скорости (м/с) воздушного потока внутри камеры.

Из рис 3. следует отметить, что коэффициент теплообмена воздушного потока с фронтальной поверхности камеры ССП увеличивается, так как воздушный поток в данной области имеет относительно большую скорость, и это приводит к увеличению теплового потеря через фронтальное ограждение.

Проводились численные расчеты при различных объемах тепловых аккумуляторов для определения их влияния на основных теплотехнических характеристик ССП с тепловым аккумулятором. Как показывают результаты расчетов, при отсутствии теплового аккумулятора температура воздушного потока в камере, к вечеру первого дня в 21.00 час снизится ниже требуемой температуры (10°C). Численные моделирования проводились с различными объемами тепловых аккумуляторов. Полученные результаты показывают, что оптимальный объем теплового аккумулятора (в данном случае водяной аккумулятор) для

данной установки составляет 500л. Однако, дальнейшее увеличение объема теплового аккумулятора существенно не влияло на температуру воздушного потока внутри камеры. Благодаря использованию данной солнечной сушилки-парника появляется возможность сэкономить топливную энергию на 5,3кВт•ч в день осенне-зимнего периода в режиме парника. Среднегодовая экономия топливной энергии в режиме парника составляет 800кВт•ч. Использование солнечной сушильной установки в качестве парника для выращивания овощей или фруктов в течение осенне-зимнего периода приводит к повышению эффективности установки.

Использование ФПМ в качестве теплового аккумулятора

Количество аккумулированного тепла зависит от удельной теплоемкости среды, изменение температуры и количества материала. Выбор теплового аккумулятора является одной из важнейших задач перед инженерами в области теплотехники. Что касается, вода, она представляет собой лучший материал для аккумулирования тепла, к тому же она доступна, недорога, и имеет высокую удельную теплоемкость. Однако еще одним из методов аккумулирования солнечной энергии является применение фазопереходных материалов в качестве теплового аккумулятора.

Нами выполнены исследования по определению теплоты плавления, удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности фазопереходного материала (ФПМ) – “глауберовой соли”, используемой в качестве теплоаккумулирующего материала (ТАМ). Для расчетов была использована методика “*T-Hystory Method*”. По сравнению с другими методами, такие как обычные калориметрические методы, методы дифференциального термического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии, данная методика имеет следующие основные особенности: экспериментальная установка простая, способная измерять температуру плавления, удельную теплоемкость и теплопроводность нескольких образцов ФПМ, одновременно и позволяет наблюдать за процессом изменения фазы каждого образца ФПМ. С помощью данного метода, нами были измерены теплофизические свойства глауберовой соли ($\text{Na}_2\text{SO}_4 + 10\text{H}_2\text{O}$ – десятиводный кристаллогидрат сульфата натрия).

Экспериментальное исследование

Для исследования теплотехнических показателей тепловых аккумуляторов из ФПМ нами разработан экспериментальный стенд. Стенд состоит из теплоизолированной камеры, где проводятся тесты аккумуляторов с различными объемами. Стенд также оснащен системой автоматического управления температуры в камере, нагрева и охлаждения, сенсоров температуры, и регистратор для сбора и обработки данных.

Результаты измерений температур воздуха в камере и образцов ФПМ при нагревании и охлаждении показывают, что температура воздуха в процессе нагревания за 20 мин. достигает своего максимального значения 48°C, установленного нами с помощью терморегулятора. Образцы из воды и глауберовой соли взяты одинакового объема по 70 мл и в стеклянных сосудах. Диапазон чувствительности терморегулятора составляет 2,0°C. За 150 мин с момента начала эксперимента глауберова соль в сосуде полностью расплавилась, где ее температура составляла 50°C, при этом температура в водяном образце составила 53°C. Начиная с этого момента, в камере работает режим охлаждения, осуществляемый экстрактором, установленный на боковой стенке данной камеры. За 60 мин после того как начался процесс охлаждения, температуры воздуха, воды и глауберовой соли становится соответственно 26°C, 35°C и 35°C. Несмотря на то, что температура воды была выше чем температуры глауберовой соли, за одинаковое время охлаждения температура в них стала одинакова. Это свидетельствует о том, что в процессе охлаждения спад температуры в глауберовой соли замедлялся

благодаря образованию кристаллов. Когда температура глауберовой соли стала в пределах температуры фазового перехода, ее температура в течение 43 мин не изменилась, несмотря на непрерывный отвод тепла из камеры. При этом температуры воды и воздуха в камере соответственно стали 28°C и 25°C.

Как показывают результаты, что теплота плавления глауберовой соли составляет 256896 Дж/кг. Такое количество скрытой теплоты, выделенное ФПМ при постоянной температуре, в зависимости от среды материалов, от 5 до 14 раза больше количества теплоты, аккумулируемое в традиционных водяных и каменных аккумуляторах в виде физического тепла. Применение таких ФПМ в целях аккумулирования тепловой энергии позволяет уменьшению материальных ресурсов, используемых в качестве ТАМ.

Экспериментальные исследования солнечной сушилки-парника

Исследования в режиме сушки: Проведены натурные исследования солнечной конвективной сушки сельхозпродуктов, целью которых явилась проверка достоверности и адекватности расчетных и экспериментальных исследований, а также практическое определение эффективности разработанной технологии для солнечной сушки сельхозпродуктов. Объектами сушки были сельхозпродукты как виноград, яблоки, дыни, помидоры, перец болгарский, морковки, баклажан, райхан, чеснок, укроп, картошка, свекла, лук и зеленый лук.

Для проведения экспериментальных исследований применены современные контрольно-измерительные приборы. При измерении температуры были использованы датчики температуры K1019EM1, подключенные к аналоговым входам АЦП микроконтроллера, температурные чувствительные которых с диапазоном от -40°C до +125°C и точностью в 1°C. Потоки солнечной радиации измерены с помощью RS 194-133, погрешность которого не превышает 5%. Для измерения динамики изменения массы продуктов использовались электронные весы Portable Electronic Scale, точность измерения которых составляла $\pm 5,0$ г.



Рис 4. Укладка овощей и фруктов на сушильных стеллажах.

Сушка, осуществляемая прямым солнечным излучением в открытом воздухе, в основном применяется для сушки фруктов, так как их высокое содержание сахара и кислоты защищает от прямого солнечного излучения. Овощи, наоборот, имеют низкое содержание сахара и кислоты, которое увеличивает риск нарушения свойства продуктов при сушке прямым солнечным излучением в открытом воздухе.

Таким образом, в ходе экспериментов, проведенных в режиме солнечной сушки для помидоров, получены эмпирические зависимости изменения массы помидоров, влагосодержания на основе мокрого и сухого веса и коэффициентов влажности в продуктах в режиме естественной конвекции от времени сушки. А также, экспериментально получены коэффициенты влажности для ряд продуктов, включая виноград, яблоки, дыни, помидоры, перец болгарский, морковки, баклажан, райхан, чеснок, укроп, картошка, свекла, лук и зеленый лук.

Натурные экспериментальные исследования в режиме парника

В период январь-апрель проводились натурные экспериментальные исследования для изучения влияния параметров окружающей среды на температуру внутреннего объема установки. Как показывают полученные данные, что

температура воздуха внутри установки сильно зависит от потока падающей на фронтальной поверхности установки солнечной радиации. Из-за резкого изменения температуры окружающей среды, в таких солнечных установках, возникает необходимость поддержания определенной температуры, необходимой для выращиваемых растений. Не смотря на то, что зимой в дневное время температура окружающей среды относительно низкая, температура воздуха внутри установки сильно зависит от солнечной радиации. Например, когда температура окружающей среды составляла -6°C , при 500 Вт/м^2 потоке солнечной радиации, температура воздушной среды в камере установки составляла 24°C . Однако, в ночное время температура воздуха в камере становилась 6°C , когда температура окружающей среды составляла -8°C .

В рис 5. показана подготовка установки в режиме парника и выращивания рассады различного рода.

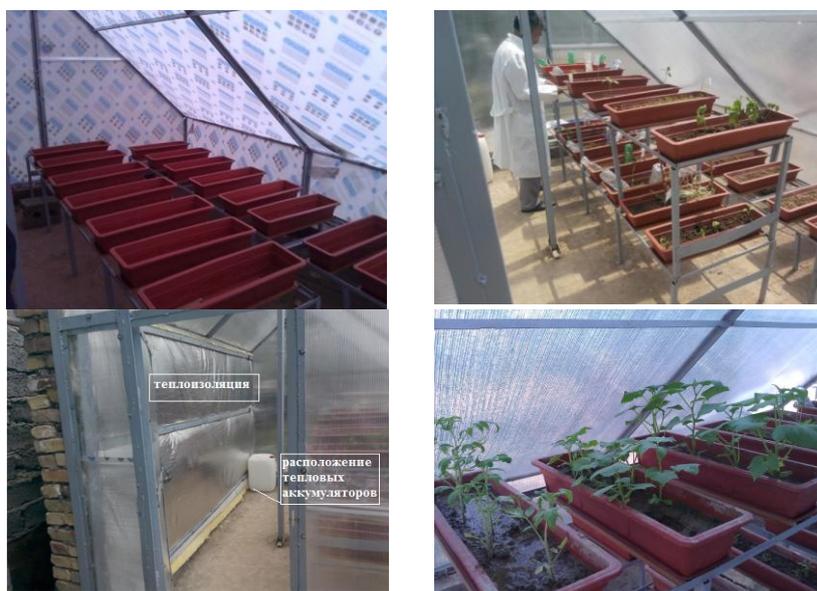


Рис 5. Подготовка установки в режиме парника

Для уменьшения тепловых потерь через северную стенку установки использовались теплоизоляционные ваты с алюминиевой фольгой, позволяющая отражению ИК-излучения от нагретых интерьеров установки.

Выводы

Пищевые продукты и зерновые культуры являются очень чувствительными к условиям сушки. Сушка должна быть осуществлена таким образом, чтобы она серьезно не воздействовала на ароматы, цветы, ткани и питательную полезность продуктов. Выбор условий сушки, как температура, имеет большое значение. Большинство продуктов требуют предварительную обработку, применяемую в обычных сушильных системах. В солнечной сушке некоторые продукты, предварительно обрабатываются для облегчения процесса сушки или сохранения их аромат и структуру. Сушка, осуществляемая прямым солнечным излучением в открытом воздухе, в основном применяется для сушки фруктов, так как их высокое содержание сахара и кислоты защищает от прямого солнечного излучения. Овощи, наоборот, имеют низкое содержание сахара и кислоты, которое увеличивает риск нарушения свойства продуктов при сушке прямым солнечным излучением в открытом воздухе.

В данной работе представлены некоторые результаты выполненных расчетно-экспериментальных исследований по определению теплотехнических параметров разработанной солнечной сушилки-парника с учетом природных условий Узбекистана. Разработана конструкция с оптимизированными геометрическими, оптическими и теплотехническими параметрами рассматриваемой солнечной сушилки-парника, имеющей аккумулятора тепла из фазопереходного материала.

Полученные результаты показывают, что оптимальный объем теплового аккумулятора для данной установки составляет 500л. Однако, дальнейшее увеличение объема теплового аккумулятора существенно не влияет на температуру воздушного потока внутри установки. Благодаря использованию данной солнечной сушилки-парника с общей площадью 12 м^2 и объемом 43 м^3 , появляется возможность сэкономить топливную энергию на $5,3\text{ кВт}\cdot\text{ч}$ в день осенне-зимнего периода в режиме парника. Среднегодовая экономия топливной энергии в режиме парника составляет $800\text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

Проведенные лабораторные экспериментальные исследования в ФПМ (Глауберова соль) показывают, что применение таких ФПМ в целях аккумулирования тепловой энергии позволяет уменьшению материальных ресурсов, используемых в качестве теплоаккумулирующих материалов.

Сушка с помощью солнечной энергии является довольно экономичной процедурой для сельхозпродукций, особенно для среднего и маленького объема продуктов для хранения продукции. Солнечная сушка не оказывает вредного воздействия на окружающую среду, которая до сих пор используется как в домашних, так и в коммерческих масштабах для сушки зерновых культур, сельхозпродуктов и продуктов питания, например, фрукты, овощи, ароматические травы, дерево и т.д. Таким образом, она значительно вносит вклад в экономике малых производителей сельскохозяйственных продуктов, и фермеров.

Литературы

- [1]. Bal LM, Satya S, Naik SN. 2010. Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Review* 14, 2298–314.
- [2]. Avezova N.R., Samiev K.A., Khaetov A.R., Nazarov I.M., Ergashev Z.Zh., Samiev M.O., Suleimanov Sh.I. 2010. Modeling of the unsteady temperature conditions of solar greenhouses with a short-term water heat accumulator and its experimental testing. *Applied Solar Energy* 46, 4-7.
- [3]. M.Kenizarin, K.Mahkamov. Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11.1913–1965. 2007.
- [4]. Kurklu A. 1998. Short-term thermal performance of a built-in solar storage for frost prevention in a greenhouse. *Int J Energy Res*;22:169–74.
- [5]. Bascetincelik A, Paksoy HO, Ozturk HH.1997. Greenhouse heating with solar energy and phase change energystorage. *ActaHort (ISHS)*;443:63–70.
- [6]. Bascetincelik A, Paksoy HO, Ozturk HH, Demirel Y.1998 Energetic and exergetic efficiency of latent heatstorage system for greenhouse heating. *Renew Energy*;16:691–4.
- [7]. Bascetincelik A, Paksoy HO, Ozturk HH, Demirel Y. 1998. Seasonal latent heat storage system for greenhouseheating. In: *Proceedings of the first workshop IEA ECES IA annex 10, 16–17 April 1998, Adana, Turkey.*
- [8]. Ozturk HH. 2005. Experimental evaluation of energy and exergy efficiency of a seasonal latent heat storagesystem for greenhouse heating. *Energy Conver Manage*;46(9–10):1523–42.
- [9]. Ozturk HH, Bascetincelik A. 2003. Energy and exergy efficiency of a packed-bed heat storage unit for greenhouseheating. *BiosystEng*;86(2): 231–45.