

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

КЫРГЫЗСКО-УЗБЕКСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

на правах рукописи

УДК 662.997. 534

АЛДАШЕВА НУРЖАМАЛ ТУНАЕВНА

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СОЛНЕЧНЫХ
СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК**

Специальность: 05.14.08-Энергоустановки на основе возобновляемых
видов энергии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ош -2005

22
19-20
1107

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Кыргызско-Узбекском и Ошском Технологическом университетах

Научный руководитель: академик Инженерной Академии КР,
доктор технических наук, профессор
Исманжанов А.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Авезов Р.Р.

кандидат технических наук, доцент
Кочнева С.В.

Ведущая организация: Кыргызско-Российский славянский университет.

Защита состоится « / / 2005г. в часов на заседании
Диссертационного Совета К 05.05-291 при Кыргызско-Узбекском университете по адресу
714003, г. Ош, ул. Исанова 79.

факс (3222) 5-70-55, 5-45-42
E-таП кии@кШеЦсц, Гe15гтр5@уро5Ип

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Кыргызско-Узбекского университета.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 714003, г. Ош, ул. Исанова 79, Кыргызско-Узбекский университет, Диссертационный Совет К 05.05-291.

Автореферат разослан «У/ »*/гЙ^2005г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
к.т.н.

С. К. Султанов

Актуальность темы. В связи с энергетическими проблемами в мире всё более актуальными становятся вопросы использования альтернативных источников энергии, одним из которых для стран Центрально-Азиатского региона является солнечная энергия (СЭ).

Малая энергетическая плотность и переменности поступления СЭ приводят к значительным габаритам солнечных установок и высокой стоимости получаемой от них энергии. Это определяет необходимость совершенствования солнечных установок - повышение КПД и уменьшение стоимости, а также поиска областей, где солнечные установки могут быть экономически рентабельными уже в настоящее время. Одной из таких перспективных областей является сельскохозяйственная отрасль - сушка плодов и овощей.

Естественная воздушно-солнечная (ВС) сушка применяется издревле. Однако, увеличение масштабов сельскохозяйственного производства а также общее ухудшение экологии ставит задачу совершенствования ВС как за счет повышения эффективности ВС сушки, так и создания эффективных солнечных сушильных установок (ССУ).

Решение этих задач требует детального знания теплотехнических характеристик процесса солнечной сушки. Получение такой информации на основе натуральных экспериментальных исследований достаточно сложно в связи с большим числом параметров задачи и их существенной переменностью в течение дня.

Указанное определяет актуальность темы работы, направленной на развитие методов модельного исследования процессов солнечной сушки и определения на этой основе связи между теплотехническими и конструктивными параметрами ССУ и её основными характеристиками - скоростью сушки и КПД.

Связь с государственными программами.

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы ПНТ- 001/1999 а также в рамках договора о сотрудничестве между НПО «Академприбор» АН РУз и Кыргызско-Узбекским университетом.

Целью работы является разработка методов модельного исследования теплотехнических характеристик ССУ и выработка на этой основе рекомендаций по их проектированию.

Для достижения указанной цели в работе поставлены следующие задачи:

- разработка математических моделей процессов тепло- и массообмена в основных типах ССУ;
- расчетно-экспериментальное исследование теплотехнических характеристик ССУ;
- разработка рекомендаций по проектированию и созданию ССУ.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработаны стационарные численные математические модели тепломассообмена в основных типах ССУ - радиационная (РССУ), конвективная (КОСУ) и радиационно-конвективная (РКССУ) и проведена их алгоритмизация;
- определены предельные КПД и скорости сушки РССУ, показано, что они сравнимы со скоростями и КПД воздушно-солнечной С^у И'
- разработана нестационарная модель РССУ и определены времена выхода РС на стационарный режим работы;
- получена приближенная аналитическая зависимость для скорости и КПД сушки в КССУ;
- получена приближенная аналитическая зависимость для скоростей сушки в РКССУ;
- показано, что в РКССУ предельные значения КПД находятся на уровне 0,5;
- разработана новая конструкция РССУ, отличающаяся наличием аккумулятора тепла, на которую получен патент.

Основные положения, выносимые на защиту:

- методы модельного исследования теплотехнических характеристик основных типов ССУ;
- численные математические модели тепломассообмена в радиационных, конвективных и радиационно-конвективных ССУ, методы их решения и эмпирические формулы;
- результаты расчетно-экспериментального исследования теплотехнических характеристик радиационных солнечных сушильных установок;
- рекомендации по разработке и применению ССУ.

Практическая ценность результатов работы заключается в том, что:

- разработанные расчетные модели и их программная реализация могут быть использованы для исследования влияния теплотехнических параметров радиационных, конвективных и радиационно-конвективных солнечных сушильных установок на их теплотехнические характеристики и таким образом обоснования выбора их проектных параметров;
- результаты исследований позволили определить предельные КПД различных типов солнечных сушильных установок;
- на основе проведенных исследований разработаны новые конструкции радиационных солнечных сушильных установок, показано, что одно из основных условий повышения их рентабельности это увеличение числа часов их работы в течение года.

Реализация результатов работы.

Результаты работы использованы в Институте новых технологий НАН КР, в научно- производственном центре «Альтерэнерго» Кыргызско-Узбекского университета, в Ошском технологическом университете и НПО «Академприбор» АН РУз при разработках солнечных сушильных установок и ч ,тг1айт»< ттп1й/»ло

Внедрение результатов работ подтверждено соответствующими актами и справками.

Личное участие автора в получении научных результатов. Автор является непосредственным исполнителем работ в части разработки расчетных моделей, и в целом в их программной реализации, проведении расчетных и экспериментальных исследований, а также в части анализа и обобщения полученных результатов, представленных в диссертации.

Апробация работы Основные положения диссертации доложены на Международной конференции «Проблемы управления и информатики» (Бишкек, КТУ, сентябрь 2000), на международной конференции «Современные технологии и управление в качестве в образовании, науке и производстве» май, 2001, КТУ, Бишкек, на Межрегиональный научно- теоретической конференции «Кыргызская государственность и проблемы межкультурного диалога» (КУУ, Ош. апрель 2003), Центральноазиатско- Европейской конференции по солнечной энергии (Ташкент, ГКНТ РУз, сентябрь 2003).

Диссертация в полном объеме доложена на Научно-технических советах Ошского технологического, Кыргызско- Узбекского университетов, Института энергетики и энергоресурсов Ошского государственного университета и Института новых технологий ЮО НАН КР.

Публикации по работе.

По теме диссертационной работы опубликовано 9 статей, в том числе в международном журнале «Гелиотехника» - три, в журналах «Наука. Образование. Техника», «Известия ОшТУ», в сборниках научных трудов КУУ и в материалах конференций.

Получен патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения, содержит 134 страниц машинописного текста, включая 34 рисунка, 4 таблицы и библиографию из 131 наименований. В приложении приведены справки о внедрении результатов работы, а также программы расчета радиационных, конвективных и радиационно-конвективных солнечных сушильных установок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены актуальность проблемы, цели и задачи исследований, а также научная и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе (Солнечные сушильные установки: состояние вопроса и задачи исследования), рассмотрены основные типы ССУ, их параметры и

характеристики, методы и результаты их расчетных и экспериментальных исследований. Проведенный обзор литературы показал, что:

- в настоящее время недостаточно данных для теоретического и расчетного анализа процессов солнечной сушки;
- необходимо развитие как экспериментальных, так и расчетных методов исследования и более детальное определение степени влияния отдельных параметров сушки на её теплотехнические характеристики.
- исследование процессов сушки непосредственно на гелиоустановках достаточно сложно, в связи с чем, особую важность приобретают методы исследования процесса сушки на физических или математических моделях, позволяющих выделять и исследовать влияние отдельных параметров;

Из экспериментальных данных по ССУ следует, что:

- имеется существенная разница в производительности между солнечной сушкой на открытом воздухе и в ССУ в 2-4 раза;
- существенно, хотя и в меньшей степени, чем теоретические оценки различаются КПД ССУ, от 1,5 до 2 раз, экспериментально полученные КПД ССУ составляют от 12% до 50%;
- практически не обобщены экспериментальные результаты, нет их сравнения с расчетными исследованиями. Указанное, во многом обусловлено многопараметричностью задачи и переменностью внешних факторов в течение дня.

В заключение главы сформулированы цели и задачи работы.

Во второй главе (Моделирование и разработка радиационных солнечных сушильных установок - РССУ) изложена методика построения численных стационарных и нестационарных моделей, описывающих процессы теплообмена в РССУ (ограниченный объем), а также результаты расчетно-экспериментального исследования процессов сушки в РССУ. Анализ показывает, что стационарная модель РССУ включает следующие интегральные уравнения баланса (см. рис.1).

Уравнение баланса тепла на поверхности продукта

$$i_{\text{пр}} \cdot T_{\text{пр}}^4 - \epsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma \cdot T_{\text{пр}}^4 - \alpha_{\text{пр}} \cdot (T_{\text{пр}} - T_{\text{ш0}}) = \epsilon_{\text{пр}} \cdot a \cdot (T_{\text{ш0}}^4 - T_{\text{пр}}^4) + \epsilon_{\text{пр}} \cdot a \cdot (T_{\text{ш0}}^4 - T_{\text{пр}}^4) \quad (1)$$

Уравнение баланса тепла на внутренней поверхности ПО

$$\epsilon_{\text{ш0}} \cdot a_{\text{ш0}} + \epsilon_{\text{пр}} \cdot a_{\text{пр}} \cdot \sigma \cdot T_{\text{ш0}}^4 - T_{\text{ш0}}^4 + \epsilon_{\text{ш0}} \cdot a_{\text{ш0}} \cdot (1 - \tau_{\text{ш0}}) = \epsilon_{\text{ш0}} \cdot a_{\text{ш0}} \cdot (T_{\text{ш0}}^4 - T_{\text{ш0}}^4) \quad (2)$$

Уравнение баланса тепла на наружной поверхности ПО

$$\epsilon_{\text{ш0}} \cdot a_{\text{ш0}} \cdot (T_{\text{ш0}}^4 - T_{\text{ш0}}^4) + \epsilon_{\text{ш0}} \cdot a_{\text{ш0}} \cdot (T_{\text{ш0}}^4 - T_{\text{ш0}}^4) \quad (3)$$

также в модели принято, что температура воздуха в камере сушки равна

$$T_{\text{ш0}} = (1 + T_{\text{ш0}}) / 2 \quad (4)$$

Для решения системы необходимо задать одну из определяемых перемен-

ных - τ , γ , I_2 , B , ϕ , ψ , в принципе любую, однако наиболее целесообразно задание влажности воздуха в камере сушки ϕ . На основе данной нелинейной модели был разработан алгоритм и вычислительная программа.

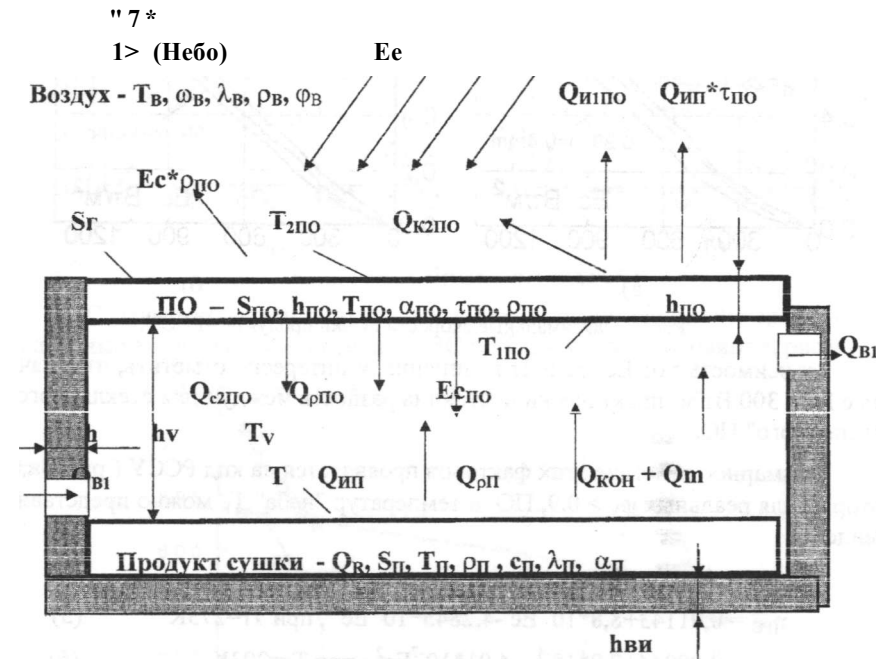


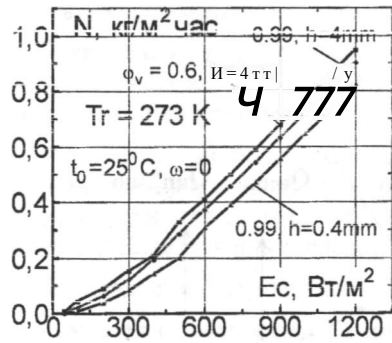
Рис.1. Теплотехническая модель РССУ.

Проверка модели с экспериментальными данными по испарению воды показала, что различие составляет 10-15%, что, учитывая погрешности эксперимента, около 17% и приближенность модели (одномерность) можно считать удовлетворительным.

Одна из практических задач в РССУ это определение зависимости температур нагрева I и скорости сушки N продукта от E_e , ϕ , параметров прозрачного ограждения (ПО) - κ_1 , κ_2 , $B_{\text{по}}$, окружающего воздуха - γ_0 , ψ и температуры "неба" - $T_{\text{г}}$. Характерные зависимости N для ПО из высокопрозрачного стекла с $K_1 = 0,2 \text{ см}^{-1}$ (в области от $X = 0$ до $2,7 \text{ мкм}$) и $K_2 = 8 \text{ см}^{-1}$ и $B = 4 \text{ мм}$ и $0,4 \text{ мм}$ (имитация пленки) приведены на рис.2а,б.

Как видно, зависимость N от E_e в РССУ (соответствует максимальным значениям N в первом периоде сушки большинства плодов и овощей) практически линейна, причем существенно мало влияние влажности воздуха в камере сушки. Увеличение $T_{\text{г}}$, увеличивает N . изменяется и наклон кривой. Также эле-

дует, что для ПО из пленки скорости сушки меньше, практически на 10%. Это позволяет провести достаточно простую аппроксимацию зависимости N от Ee, фy и Tг.



а)

М, дни	я	юл	0.99	11^4тгг
φv	0.6	Ип=4тг		
л	2.5	Тг	273K	
		0.99	п=0.4т п	
				E< Вт/л<²

б)

Рис.2. Максимальные скорости сушки продукта в РССУ.

Зависимость I от Ee, фy и Tг нелинейна, и интересно отметить, что начиная с Ee > 300 Вт/м² практически постоянна разность между I для стеклянного и "пленочного" ПО.

Суммарное действие этих факторов проявляется на кпд РССУ (рис. 3а,б), которые для реальных фy > 0,9, ПО и температур "неба" Tк можно представить в виде

для БПО = 4мм (стекло)

$$\eta_{PC} = 0,01143 + 8,8 * Ю^{\wedge} Ee - 4,2845 * 10^{17} Ee^2, \text{ при } Tг=273K \quad (5)$$

$$\eta_{PC} = 0,08944 + 7,9 * 10^{14} - 4,01 * 10^{17} Ee^2, \text{ при } Tг=293K \quad (6)$$

для БПО = 0,4мм (пленка)

$$\eta_{PC} = - 0,03282 + 0,00074 Ee - 3,0227 * 10^{17} Ee^2, \text{ при } Tг=273K \quad (7)$$

$$\eta_{PC} = 0,03957 + 7,8 * 10^{14} Ee - 3,719 * 10^{17} Ee^2, \text{ при } Tг=293K \quad (8)$$

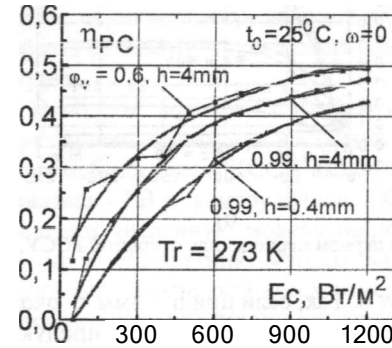
Исследования показали, что и при высоких влажностях воздуха в камере, процесс сушки в РССУ протекает интенсивно, однако при этом высоки и температуры продукта и теплопотери через ПО, вследствие чего предельные кпд РССУ находятся на уровне 0,5. В связи с указанным было проведено сравнение характеристик РССУ и ВС. Был получен достаточно неожиданный вывод в РССУ и ВС - скорости сушки и кпд достаточно близки, различия в пределах 3-10% абсолютных. Результаты исследований N. были аппроксимированы в виде

для воздушно-солнечной (открытой) сушки

$$B_{BC} = - 0,0858 + 0,00079 Ee \quad (9)$$

для сушки в РССУ

$$B_{PC} = - 0,0758 + 0,00085 Ee \quad (10)$$



а)

ηPC	φv = 0.6	h = 4тп	φv = 0.99	h = 0.4тп
Л	0.5	0.4	0.3	0.2
г	29.3K			
E	ВТ/Лк²			

б)

Рис.3. Предельные кпд РССУ

С целью проверки полученных выводов были проведены сравнительные натурные эксперименты по сушке в ВС и РССУ урюка (половинки, рис.4.).

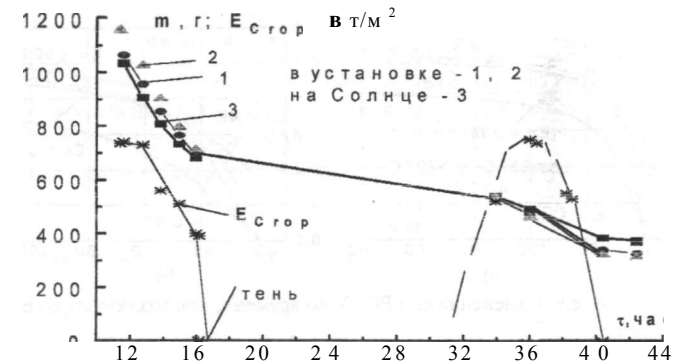


Рис.4. Изменение массы урюка при сушке в РССУ и ВС.

Как видно, результаты эксперимента подтверждают полученные при численных экспериментах выводы о близости характеристик ВС и РССУ.

На практике, важно знать время выхода ССУ на стационарный режим работы - Тс. Учитывая близость характеристик ВС и РССУ, в работе для оценки тс была разработана приближенная нестационарная модель РССУ. На рис.5а,б для двух предельных случаев влажности окружающего воздуха φo = 0,45 и 0,95 (имитация закрытой РССУ) и толщины слоев воды 3мм и 10мм (соответствующих загрузке 3кг/м² и Юкг/м²) показано изменение N во времени.

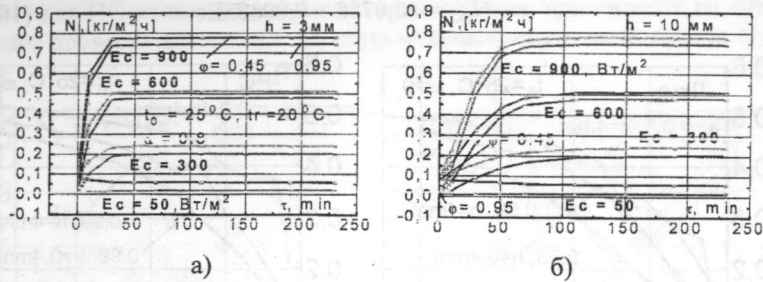


Рис.5 Зависимость скорости сушки от времени в первом периоде для открытой РССУ, при различных плотностях солнечного излучения E_c .

Как видно, τ_c зависит в основном от h . Так, если при $h = 3$ мм τ_c около 20-25 мин, то для $h = 10$ мм (соответствует, обычной в ССУ загрузке продукта порядка $10-12 \text{ кг/м}^2$) τ_c уже 50-100 мин. Можно также отметить, что в общем τ_c составляет около 15% от теоретически возможной продолжительности первого периода сушки τ_1 . Соответствие установившихся N их стационарным значениям, полученным выше, подтверждает практическую применимость нестационарной модели РССУ. На рис.6 показано изменение во времени кпд сушки.

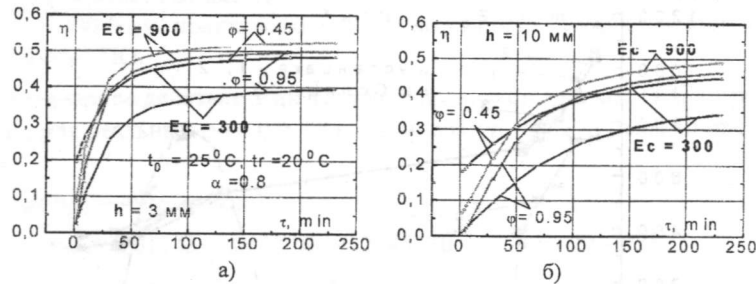


Рис.6. Изменение кпд РССУ во времени, при различных ϕ_0 и E_c .

Как видно, τ_c для кпд существенно больше чем для N . Так, для $E_c = 900 \text{ Вт/м}^2$ при $h = 3$ мм τ_c около 2-3 ч, а при $h = 10$ мм превышает 4 часа. Влияние влажности воздуха проявляется в основном в первые моменты времени, особенно заметные при малых E_c .

На основе проведенных исследований были сформулированы общие требования к конструкции РССУ:

- угол наклона ПО α должен быть не менее 45° ;
- отношение длины L к ширине РССУ a должно быть не менее 3-4;
- боковые стенки корпуса должны быть теплоизолированы, однако, при больших L/a , больших 4, их желательно выполнять светопрозрачными;
- задняя стенка должна быть теплоизолирована, а её внутренняя сторона обеспечивать переотражение, падающее на неё солнечное излучение на продукт. Она может представлять и отдельную конструкцию;
- донная часть РССУ может представлять отдельную конструкцию.

В третьей главе (Моделирование и разработка конвективных солнеч-

ных сушильных установок (КССУ) приведены результаты разработки и исследования КССУ на основе ее стационарной модели. Необходимо отметить, что несмотря на широкое применение КССУ до сих пор не определены зависимости её кпд от температуры и скорости теплоносителя, особенно при малых температурах.

В общем случае КССУ представляют камеру, в которую укладывается продукт сушки в один или несколько рядов по высоте, между которыми прогоняется теплоноситель. КССУ включает два основных элемента: гелиовоздуонагреватель - ГВ и камеру сушки - КС (рис.7). Численная модель ГВ известна. Рассмотрим численную модель теплообмена в камере сушки. Используя принятые в теплотехнике методы решения стационарных задач конвективного теплообмена в трубе, разбиваем камеру сушки на элементарные участки длиной dL . Распишем уравнения модели для первого участка.

Теплосодержание агента сушки, относительно температуры окружающего воздуха t_0 в единицу времени равно

$$Q_{v1} = Gv * c_{vp} * (1 + d_0 c_B / c_{vp}) (t_{v0} - t_0) \quad (11)$$

где Gv - массовый расход воздуха ($Gv = \rho_{ov} * a * b * w$, a - ширина и b - высота камеры), d_0 - начальное влагосодержание водяного пара в воздухе; c_B, c_{vp} - теплоемкости пара и воздуха; t_{v0} - температура воздуха на входе в первый участок, равная в первом приближении температуре воздуха на выходе ГВ t_2 .

В стационарном режиме тепло, переданное продукту от воздуха (за счет вынужденной конвекции) $Q_{kvп}$ и от стенок камеры Q_{c1} (в основном излучением от верхней стенки C_1) равно количеству тепла, уносимому из продукта испарением Q_m , включающей теплоту парообразования и теплоту нагрева

$$Q_{kvп} + Q_{c1} = Q_m \quad (12)$$

"Небо" - T_r , Окружающий воздух - t_0, ω_0

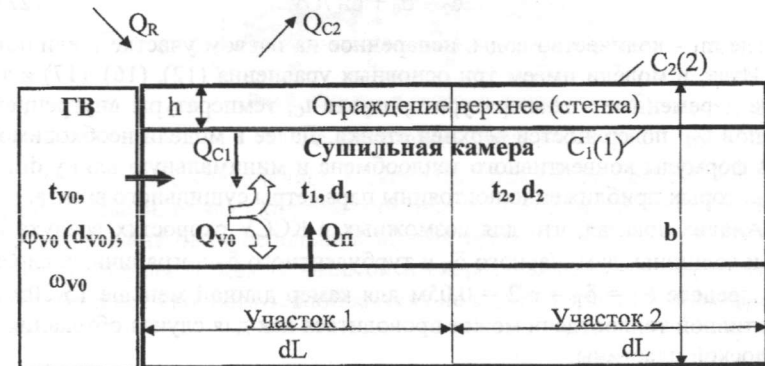


Рис. 7. Схема тепловых потоков в КССУ.

В стационарном режиме составляющие (12) равны

$$Q_{kvп} = a * L * St * c_{vp} * \rho_{ov} * w * (t_{v1} - t_1) \quad (13)$$

$$Q_{c1п} = \epsilon_{пп} * s_b * (T_{c1}^4 - T_1^4) * a * dL \quad (14)$$

$$(2_{\tau} = \tau * \Gamma = N * a * \epsilon B * \Gamma) \quad (15)$$

где ϵB - приведенная степень черноты системы продукт- верхняя стенка, в первом приближении $\epsilon_{pr} = 1/(1/A_{\pi} + 1/A_{\epsilon}) - 1$.

Уравнение баланса на внутренней поверхности верхней стенки камеры сушки можно записать в виде (рис.7).

$$Q_{KUC} = R_{\text{сш}} - m_{O\text{сHсГ}}' B \quad (16)$$

где Q_{KUC} - тепло, переданное теплоносителем верхней стенке.

Уравнение баланса для наружной поверхности верхней стенки, также как и в РССУ можно записать в виде

$$X_{\text{OсГ}} B / B - Q_{K2} + Q_{I2} \quad (17)$$

где Q_{K2} - теплопотери стенки наружу конвекцией и излучением

$$Q_{\text{сГ}} = a * c B * a_{K2} * (t_2 - t_0) \quad (18)$$

$$d_{I2} - b_2 * o * (T_{\text{с}}^2 - T_{\text{к}}^4) * a * a_B \quad (19)$$

Учитывая постоянство массового расхода теплоносителя и общего давления, получаем, что теплосодержание агента сушки на выходе из первого участка будет равно

$$O_{y2} = Q_{\text{сГ}} - Q_{K2} + Q_{I2} \quad (20)$$

и соответственно, среднемассовая температура теплоносителя t_{y2} на входе во второй участок будет равна

$$t_{y2} = t_0 + (Q_{\text{сГ}} - Q_{K2} + Q_{I2}) / (C_{y2} * \rho_{y2} * (1 + a_2 * c_a / c_{y2})) \quad (21)$$

где c_{y2} - влагосодержание теплоносителя на выходе из первого участка

$$c_{y2} = \epsilon_0 + \text{ш} / O_{y2} \quad (22)$$

где ш - количество воды, испаренное на первом участке в единицу времени. Итак, в модели имеем три основных уравнения (12), (16), (17) и три основные переменные - температура продукта $t_{\text{с}}$, температуры внутренней $t_{\text{с}}$ и наружной $t_{\text{сГ}}$ поверхностей верхней стенки. Далее в модели необходимо определить формулы конвективного теплообмена и минимальную длину B , в пределах которых приближенно постоянны параметры сушильного агента.

Анализ показал, что для возможных в КССУ скоростях воздуха $u = 0,5 - 3 \text{ м/с}$ и толщинах ламинарного $\delta_{\text{л}}$ и турбулентного $\delta_{\text{т}}$ пограничных слоев, равных в пределе $\delta_{\text{л}} = \delta_{\text{т}} = B/2 = 0,05 \text{ м}$ для камер длиной меньше 15-20м расчет конвективной теплоотдачи может проводиться как для случая обтекания воздушной плоской пластины.

Анализ также показал, что максимальное значение ϵB необходимо определять исходя из допустимого изменения влагосодержания $\kappa_{\text{т}}$ ($\kappa_{\text{т}} = M_{\text{т}} * \epsilon / t_{\text{к}} < 5_{\text{т}}$, где $M_{\text{т}}$ - масса пара, выделившегося на участке ϵB , $t_{\text{к}}$ - масса пара в объеме воздуха на участке ϵB , $5_{\text{т}}$ - допустимое относительное изменение вла-

госодержания).

Учитывая, что $M_{\text{т}} = M_{\text{к}} * a * c_{\text{л}} / D_{\text{т}}$ и $t_{\text{к}} = c_{\text{л}} p_0 * t_{\text{в}} = \epsilon p_0 * R * a * B * \text{ш} * D_{\text{т}}$ получим, что максимально допустимое значение $\epsilon B_{\text{та}}$

$$\epsilon B_{\text{т}} = \kappa_{\text{т}} / C_{\text{т}} \quad (23)$$

где обозначено $C_{\text{т}} = N / (c_{\text{л}} p_0 * R * B * \text{ш})$

Система уравнений модели решалась итерационно, методом деления отрезка пополам. Решение проводится последовательно, начиная с первого участка. Мгновенное кпд КССУ $\eta_{\text{КСУ}}$ при этом равно

$$\eta_{\text{КСУ}} = \frac{Q_{\text{сГ}} - Q_{K2} + Q_{I2}}{Q_{\text{сГ}}} \quad (24)$$

где n - число участков.

Основными задачами при разработке КССУ являются выбор высоты камеры B , толщины верхней стенки B (для уменьшения теплопотерь) и длины камеры B (или кратности рециркуляции теплоносителя при заданной длине камеры), а также скоростей сушки по длине камеры и наконец кпд КССУ.

Влияние B на кпд и скорость сушки по длине камеры при параметрах теплоносителя на входе в камеру: $u = 1,5 \text{ м/с}$, и $t_2 = 45^\circ \text{C}$ и относительной влажности окружающего воздуха $\phi_0 = 0,3$ представлено на рис.8.

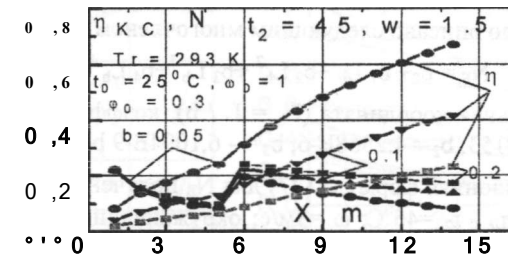


Рис.8. Кпд $\eta_{\text{КСУ}}$ и скорость сушки N [кг/л] по длине камеры сушки КССУ.

Как видно, с увеличением B скорость сушки N растет, особенно в турбулентной области, однако кпд при этом падает. Отсюда следует, что, во-первых, высота B должна быть небольшой и, во-вторых, должно выполняться определенное соотношение между высотой и скоростью движения воздуха в камере сушки. Влияние скорости теплоносителя на кпд и скорость сушки приведено на рис.9.

По результатам расчетных исследований была рассмотрена задача получения приближенных аналитических зависимостей для скорости и кпд конвективной сушки. Из расчетных исследований следует, что N можно представить в виде

$$N = K_{\text{ф}} K_{1X} K_{\text{ш}} \quad (25)$$

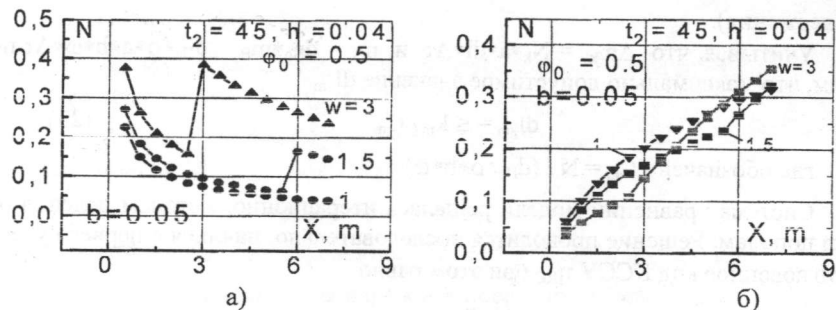


Рис.9. Влияние скорости воздуха в камере сушки на скорость и кпд сушки.

где N_B – скорость сушки для некоторого базового варианта параметров КССУ и теплоносителя; $K_{\phi N}$, $K_{t_{2N}}$, $K_{\omega N}$ – коэффициенты, характеризующие влияние влажности окружающего воздуха ϕ_0 и температуры t_2 и скорости ω воздуха, входящего в камеру сушки. Анализ данных показал, что

$$\begin{aligned} K_{\phi N} &= 1,2957 - 0,5806 \phi_0 \\ K_{t_{2N}} &= -0,4748 + 0,03282t_2 \\ K_{\omega N} &= 0,06343 + 0,31297\omega \end{aligned} \quad (26)$$

Учитывая нелинейный характер изменения скорости сушки по длине, выражение для N_B было описано следующим многочленом

$$N_B = b_0 + b_1 L_b + b_2 L_b^2 + b_3 L_b^3 + b_4 L_b^4 \quad (27)$$

здесь L_b относительная координата ($L_b = L / b$), коэффициенты в (27), равны: $b_0 = 0,318$, $b_1 = -0,00153$, $b_2 = 4,2568E-6$, $b_3 = -6,1094E-9$, $b_4 = 3,3445E-12$.

Аппроксимационная формула (27) для N_B получена для КССУ с параметрами: теплоноситель - $t_2 = 45^\circ\text{C}$, $\omega = 3\text{ м/с}$; окружающий воздух - $t_0 = 25^\circ\text{C}$, $\omega_0 = 1\text{ м/с}$, $\phi_0 = 0,5$; температура "неба" $T_r = 293\text{ К}$; камера - ширина $a = 1\text{ м}$, высота $b = 0,05\text{ м}$, $h = 0,04\text{ м}$ (дерево). Расчеты показали, что погрешность (25) не превышает $\pm 10\%$ в пределах: $\phi_0 = 0,3 - 0,9$, $\omega = 1 - 5\text{ м/с}$ и $t_2 = 35 - 70^\circ\text{C}$, т.е. охватывает практически весь диапазон режимов сушки в КССУ.

Для определения аналитической зависимости для кпд КССУ - η_{KC} , представим её с учетом (24) в виде.

$$\eta_{KC} = C_{KC} \int N dL \quad (28)$$

где $C_{KC} = r / \{ \rho_{v0} \cdot \omega_N \cdot [c_{v0} + d_0 \cdot (c_{B0}/c_{v0})] \cdot (t_2 - t_0) \cdot 3600 \}$. Подставляя в (28) значение N из (25) и интегрируя получим

$$\eta_{KC} = C_{KC} K_{\phi N} K_{t_{2N}} K_{\omega N} (b_{0i} L_{KC} + b_{1i} L_{KC}^2 + b_{2i} L_{KC}^3 + b_{3i} L_{KC}^4 + b_{4i} L_{KC}^5) \quad (29)$$

где $b_{0i} = b_0$; $b_{1i} = b_1/2$; $b_{2i} = b_2/3$; $b_{3i} = b_3/4$; $b_{4i} = b_4/5$.

Расчетные исследования показали, что погрешность (29), также находят-

ся в пределах $\pm 10\%$.

Полученные зависимости могут быть использованы для анализа характеристик КССУ, выбора её конструктивных параметров, в том числе решения вопросов рециркуляции. В частности, исследования показывают, что относительная длина камеры сушки (L/b), при которой процессы сушки в КССУ ещё достаточно эффективны, составляет порядка 200.

В четвертой главе (Моделирование и разработка радиационно - конвективных солнечных сушильных установок - РКССУ) представлены результаты исследований, направленных на повышение эффективности солнечных сушильных установок – комбинированные радиационно-конвективные солнечные сушильные установки (РКССУ) и ССУ с аккумулятором тепла (АТ).

Принципиально РКССУ отличается от КССУ тем, что верхняя стенка камеры сушки прозрачна для солнечного излучения. Математическая модель РКССУ включает элементы моделей РССУ и КССУ. Отличие РКССУ от КССУ также в том, что если в КССУ температуры продукта t всегда меньше температуры теплоносителя t_v , то в РКССУ, практически всегда $t > t_v$.

Характерные кпд и скорости сушки, полученные на основе стационарной численной модели РКССУ приведены на рис.10а,б.

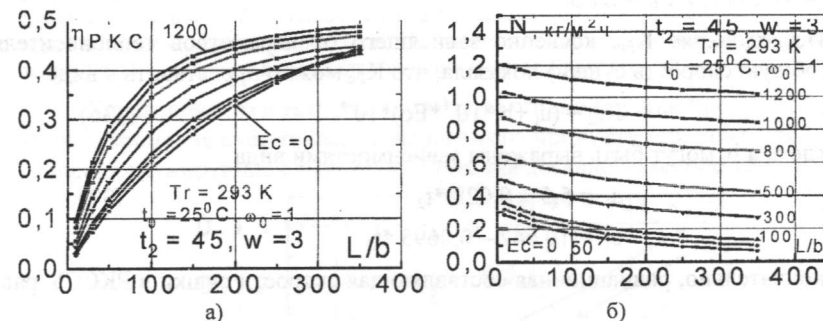


Рис.10. Зависимость кпд и скорости сушки в РКССУ от L/b и E_s .

Как видно, кпд РКССУ достаточно сложно зависит от E_s и длины РКССУ, достаточно существенно и изменение скорости сушки. Причем можно отметить принципиальное различие между кпд КССУ и РКССУ. В идеальной КССУ кпд стремится к единице, то в РКССУ, уже при $E_s > 100\text{ Вт/м}^2$ кпд выходит на стационарные значения и в пределе не превышает 0.5.

Для скорости сушки по длине РКССУ можно отметить следующую закономерность - независимо от величины E_s , разность скоростей между кривыми N практически постоянна во всех сечениях камеры сушки, т.е. эта разность не зависит от линейной координаты (или от относительного расстояния от входа в РКССУ - L/b). Отсюда следует, что скорости сушки в РКССУ могут быть в принципе обобщены по параметру E_s . Таким образом, для любого сечения камеры скорость сушки N в РКССУ может быть представлена в виде

$$N = B_k + M_E = I_k + K_e, E_e \quad (30)$$

где K_k - скорость сушки в РКССУ при $E_e = 0$ или конвективная составляющая. По аналогии I_r - радиационная составляющая, где K_r - коэффициент, характеризующий связь между E_e и M_E . Т.е. задача получения инженерных формул для скорости и кпд сушки сводится к задаче определения аппроксимационных формул для конвективной и радиационной составляющих N . Для определения конвективной составляющей в РКССУ используем подход, разработанный нами выше для КССУ, или

$$\hat{N} = \quad (31)$$

Как показали исследования, коэффициенты K_u , K_{ii} , $K_{...}$ и базовая скорость в РКССУ могут бы представлены в виде

$$K_{ш} = 0,3309 * \phi_{-н} \quad (32)$$

$$K_{,} = -0,44672 + 0,03211\% \quad (33)$$

$$K_{,,} = 1,34431 - 0,68192 * \phi_0 \quad (34)$$

$$N_5 = a_0 + a_1 * B_b + a_2 * B_b^2 + a_3 * B_b^3 + a_4 * B_b^4 \quad (35)$$

где $a_0 = 0,302674$; $a_1 = -0,00189$; $a_2 = 7,4489E-6$; $a_3 = -1,6592E-8$, $a_4 = 1,4905E-11$, и $B_b = B/B$.

Исследование K_{Ec} , косвенно зависящего от параметров теплоносителя (через общую скорость сушки) показала, что K_{Ec} можно представить в виде

$$K_{Ec} = (a_1 + B_1 * 10^{-4} * E_c) * 10^{-4} \quad (36)$$

где a_1 и B_1 могут быть выражены зависимостями вида

$$a_1 = 5,5 + 0,028 * T_2 \quad (37)$$

$$b_1 = 10,642 - 0,0695 \%$$

или, окончательно, радиационная составляющая скорости сушки в РКССУ равна

$$\hat{E} = K_{Ec} * E_e = (a_1 + B_1 * 10^{-4} * E_c) * 10^{-4} * E_e \quad (38)$$

Анализ показал, что погрешность определения N РКССУ на основе аналитических формул в основном не превышает $\pm 8\%$ в диапазоне изменения параметров гхм^У: влажности окружающего воздуха ϕ_0 от 0,3 до 0,7, температуры теплоносителя на входе $t_2 = 35-65^\circ\text{C}$, скорости теплоносителя $XV = 1,5-5 \text{ м/с}$, плотности солнечной радиации E_e от 0 до 1200 Вт/м^2 , т.е. также практически охватывается весь возможный режим сушки в РКССУ. Получение аналитической формулы для кпд РКССУ не представляется целесообразной, вследствие её громоздкости. Полученные на основе численных экспериментов аппроксимационные формулы позволяют проводить предварительный анализ параметров РКССУ.

Одна из важных задач при сушке овощей и фруктов это непрерывность процесса. Обеспечение этих условий в ССУ требует наличия аккумулятора

тепла для продолжения сушки в ночное время. Наиболее целесообразная схема такой ССУ (на которую получен патент) представлена на рис.11.

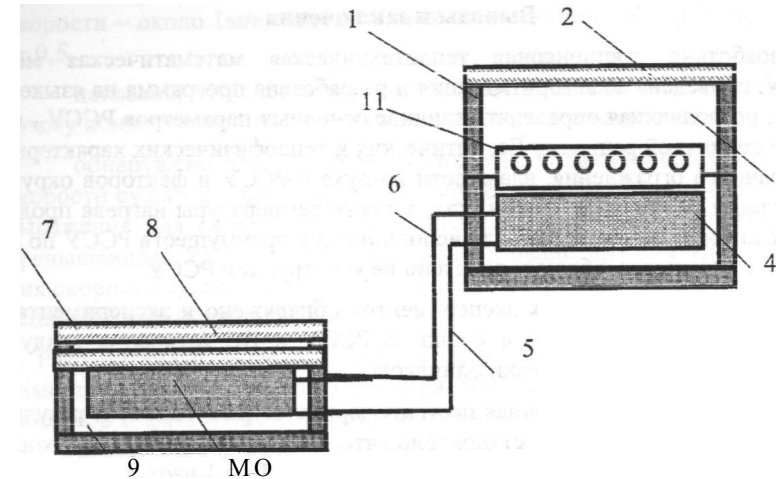


Рис.П. Солнечная сушильная установка: 1- камера сушки, 2- светопрозрачное ограждение, 3- аккумулятор тепла, 4 - емкость с теплоаккумулирующим веществом, 5,6 - трубопроводы воды, 7 - солнечный водонагреватель, 8 - двухслойное светопрозрачное ограждение, 9 - корпус нагревателя, 10 - приемник солнечного излучения (плоский коллектор) и 11 - поддоны для укладки высушиваемого продукта.

Характеристики естественной конвективной сушки продукта в камере в ночное время, за счет тепла, передаваемого продукту при контакте поддона с теплоаккумулирующей емкостью тепла представлены на рис.12.

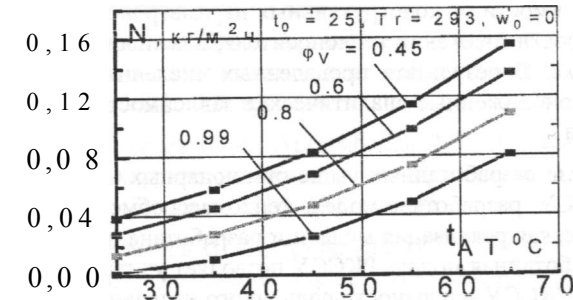


Рис. 4.10. Скорости сушки продукта в камере сушки ночью, в зависимости от температуры аккумулятора t_{AT} и влажности воздуха в камере ϕ_U .

Как видно, скорости сушки в камере в ночное время существенно зависят от температуры t_{AT} и влажности воздуха и реально будут составлять около $0,08 \text{ кг/м}^2\text{ч}$. Однако, этой скорости оказывается достаточным для досушки продукта в ночное время. В отличие от обычных ССУ, в которых для обеспечения сушки в течении дня необходима загрузка порядка 2 кг/м^2 , то применение аккумулятора позволяет увеличить загрузку до $4-5 \text{ кг/м}^2$. Введение те-

плоаккумулятора позволяет, таким образом, существенно расширить возможности ССУ и применять их и для интенсивной сушки овощей и фруктов.

Выводы и заключения

1. Разработана стационарная теплотехническая математическая модель РССУ, проведена её алгоритмизация и разработана программа на языке Бейсик-4, позволяющая определять влияние основных параметров РССУ - плотности солнечной радиации E_e , оптических и теплофизических характеристик прозрачного ограждения, влажности воздуха в РССУ и факторов окружающей среды на скорость сушки, КПД, а также температуры нагрева продукта. Исследования показали, что для использования преимуществ РССУ по сравнению с ВС, целесообразны простейшие конструкции РССУ.
2. В результате численных экспериментов обнаружено и экспериментально подтверждено, что скорости сушки в РССУ и ВС (открытая воздушно-солнечная сушка) практически одинаковы.
3. Разработана упрощенная нестационарная модель РССУ. В результате расчетных исследований установлено, что если времена выхода скорости сушки на стационарные значения составляет от 0,5 до 1 часа, то времена выхода КПД на стационарные значения занимает существенно большее время - от 1,5 до 3 часов и существенно зависит от удельной загрузки продукта.
4. Разработана стационарная численная математическая модель тепло-массообмена в КССУ, на основе которой разработана вычислительная программа на языке Бейсик-4. Модель позволяет определять предельные КПД и скорости сушки в КССУ, их изменение по длине камеры сушки, а также изменение температуры и влажности теплоносителя по ходу её движения в камере в зависимости от конструктивных параметров камеры сушки, температуры и скорости движения теплоносителя, влажности и скорости окружающего воздуха. В результате проведенных численных исследований КССУ получены приближенные аналитические зависимости для КПД КССУ и скорости сушки.

На базе разработанных выше стационарных математических моделей РССУ и КССУ разработана модель тепло-массообмена в РКССУ. Проведена алгоритмическая реализация модели и разработана программа на языке Бейсик-4. Разработанная модель РКССУ позволяет учитывать влияние основных параметров РКССУ - плотности солнечного излучения E_e , температуры t_2 и скорости U_0 теплоносителя на входе в камеру сушки, влажности φ_0 , скорости U_0 окружающего воздуха, радиационной температуры неба, а также собственно параметров РКССУ - толщины стенок δ , теплофизических (теплопроводность) и оптических (пропускательная и поглощательная способности) характеристик прозрачного ограждения, ширины a , высоты B и длины L камеры сушки.

Проведены численные исследования теплотехнических характеристик РКССУ - скорости сушки B_{PKC} и КПД η . В результате исследований:

- получено, что КПД РКССУ имеет предел, который для обычных условий -ПО из стекла толщиной 4мм, температуры окружающего воздуха 25°C, ее скорости - около 1м/с, радиационной температуры неба 20 С не превышает 0,5.

показано, что скорость сушки в РКССУ N можно рассматривать как сумму конвективной N_1 и радиационной N_2 составляющих.

обнаружено практическое постоянство радиационной составляющей скорости сушки по длине камеры. Получено приближенное аналитическое выражение для скорости сушки в РКССУ, которое с погрешностью, не превышающей $\pm 10\%$, может быть использовано для анализа и определения скорости сушки практически во всем возможном диапазоне изменения тепловых параметров РКССУ.

7. Разработанные модели и методы позволили впервые установить зависимости теплотехнических характеристик основных типов ССУ от их параметров и факторов окружающей среды и плотности солнечного излучения. Расчетно и экспериментально определены предельно возможные теплотехнические характеристики ССУ. Результаты исследований могут быть использованы как для проектирования ССУ, так и для их технического обслуживания.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации:

1. Исманжанов А.И., Клычев Ш.И., Алдашева Н.Т. Методика теплотехнического расчета солнечных воздухонагревателей //Проблемы управления и информатики. Докл. межд. конф. Бишкек, 19-22- сентября 2000. «Проблемы управления и информатики». Бишкек, 2000, 505с., с.437-441.
2. Исманжанов А.И., Клычев Ш.И., Аргымбаева ЭЛ., Алдашева Н.Т. Моделирование процесса радиационной сушки сельхозпродуктов //Наука. Образование. Техника, 2000, №2, с.81-83.
3. Исманжанов А.И., Клычев Ш.И., Аргымбаева ЭЛ., Алдашева Н.Т. Теплотехнические характеристики радиационных сушилок //Наука.Образование.Техника, 2000, №2, с.83-85.
4. Исманжанов А.И., Клычев Ш.И., Алдашева Н.Т. Сравнительные характеристики сушки урюка воздушно- солнечным способом в радиационной солнечной сушилке //Гелиотехника, 2000, №4, с.40-43.
5. Патент РУз №1ДР 04571, 7А23В7/02, Р26В3/28, Бюлл. изобр. 2001, №1, Солнечная сушилка /Исманжанов А.И., Клычев Ш.И., Бахрамов С.И., Алдашева Н.Т.
6. Исманжанов А.И., Клычев Ш.И., Бахрамов С.А., Нуритдинов Х., Аргымбаева ЭЛ., Алдашева Н.Т.Тепловая эффективность радиационных, конвективных и радиационно- конвективных солнечных сушилок //Гелиотехника, 2002, №1, с.31-36.

7. Исманжанов А.И., Клычев Ш.И., Алдашева Н.Т. Динамика первого периода сушки в радиационных сушилках //Сб. научных трудов КУУ, вып.3 Ош 2003, 362с., с.256-258.
8. Исманжанов А.И., Клычев Ш.И., Алдашева Н.Т. Конструктивно-компоновочные решения солнечных сушилок и опреснителей //Сб. научных трудов КУУ, вып.3, ОШ, 2003, 362с., с.259-261.
9. Исманжанов А.И., Клычев Ш.И., Захидов Р.А., Саткулов Т.Т., Алдашева Н.Т. Теплотехнические характеристики солнечных установок типа «горячий ящик» //Гелиотехника, 2003, №1, с.45-49.
10. Алдашева Н.Т. Инженерные методы расчета солнечных сушильных установок //Наука.Образование.Техника, 2004, №1, с.208-211.

Резюме

Алдашева Нуржамал Тунаевна

Моделирование и разработка солнечных сушильных установок

05.14.08. - Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии.

Ключевые слова: Солнечная энергия, солнечная сушильная установка (ССУ), численные модели, моделирование тепломассообменных процессов при сушке, КПД ССУ, скорость сушки.

Объектом исследования являются радиационные, конвективные и радиационно-конвективные солнечные сушильные установки.

Целью работы является разработка методов численного модельного исследования тепломассообменных процессов в ССУ и определение на этой основе их теплотехнических характеристик.

Методы исследования - Математическое моделирование, численные и натурные эксперименты.

Полученные результаты и их новизна: - разработаны стационарные численные математические модели тепломассообмена в основных типах ССУ - радиационной (РССУ), конвективной (КССУ) и радиационно-конвективной (РКССУ) и проведена их алгоритмизация;

- определены предельные КПД и скорости сушки РССУ, показано, что они сравнимы со скоростями и КПД воздушно-солнечной сушки;

-разработана приближенная нестационарная модель РССУ и определены времена выхода РССУ на стационарный режим работы;

-получены приближенные аналитические зависимости для скоростей и КПД сушки в КССУ и РКССУ;

-показано, что в РКССУ предельные значения КПД находятся на уровне 0,5;

- разработана новая конструкция радиационной ССУ, отличающаяся наличием аккумулятора тепла, на которую получен патент.

Практическая значимость: Разработанные модели могут быть использованы для расчета, исследования и проектирования ССУ.

Стенень внедрения: Результаты работы в виде методик и программ расчета использованы в ряде организаций.

Область применения: - Солнечные сушильные установки, теплотехника.

Резюме

Алдашева Нуржамал Тунаевна

Б"Илимийн Утгааршил Шийдийн Гант Иргэн ЮУШ ЯТУУЧУ
1 |түрмт үшдэр ицтэр П.П.П.?

05.14.08. - Жацыланып туруучу энергия турлерунун эсебинен иштеечу энергетикалык тузулуигтеру.

Негизги сездер: кун энергиясы, кундун энергиясы менен кургатуучу тузулуш (КЭКТ), сандык моделдер, кургатуу учурундагы жылуулук, масса алмашуучу процесстерди моделдештируу, кундун энергиясы менен кургатуучу тузулуштун п.а.к. кургоо ышдамдыгы.

Изилдев объектиси болуп радиациалык, конвективдуу жана радиация-конвективдуу КЭКТ эсептелет.

Иштин максаты: КЭКТ жылуулук масса алмашуучу процесстердин сандык моделдик изилдев усулдарын иштеп чыгуу жана апын негизинде алардын жылуулук техникалык мунвздмвлерун аныктоо болуп эсептелет.

Изилдев усулдары- математикалык моделдештируу, сандык жана натуралдык эксперименттер.

Алынган жыйынтыктар жана алардын жацылыгы: - радиациалык конвективдуу жана радиациалык-конвективдуу КЭКТ жылуулук масса алмашуунун стационардык сандык математикалык модели иштелип чыккан жана алардын алгоритми тузулген.

Радиациалык КЭКТ чектик п.а.к. жана кургее ышдамдыгы анык талган жана алар ачык кун алдында кургатуунун п.а.к. жана кургос ылдамдыгы менен барабар экендши и кергезулген.

-Радиациалык КЭКТ процесстердин жакындаштырылган стационардык эмес модели иштелип чыккан жана радиациалык КЭКТ стационардык режимде иштесундегу чыгуу убактысы аныкталган.

-Конвективтуу жана радиациалык- конвективдуу КЭКТ кургос ышдамдыгы учун жакындаштырылган аналитикалык кез карандылыгы алынган.

- Радиациалык- конвективдуу КЭКТ п.а.к. чектик мааниси 0,1 децгээлинде жата тургандыгы керсетулген.

- Жылуулук аккумуляторунун болушу менен айырмаланга* радиациалык кургаткычтын жацы конструкциясы иштелип чыккан жана ага патент алынган.

Практикалык мааниси: - Иштелип чыккан моделдер КЭКТ долборлоо, изилдөө жана эсептөө үчүн колдонулат.

Пайдалануу даражасы: Иштин жыйынтыгы, бир катар организацияларда эсептөөнүн программасы жана усулу түрүндө колдонулган.

Колдонуу областы: - КЭКТ, жылуулук техникасында.

Resume

Nurjamal Tunaevna Aldasheva

Modeling and processing of solar devices

05.14.08. – Energy devices based on renewed types of energy

Keywords: solar energy, solar drying plants, numerical models, modeling of heat mass exchange processes of drying, coefficient of efficiency of the solar drying plants and the speed of drying.

The object of the research is radiational, convectional and radiation-convectional drying equipment.

The aim of the research is processing the methods of numerical modeling research heat mass exchange on the SDP and on this basis definition of its heat technological characters.

The research methods – Mathematical modeling, numerical and natural experiments.

Research outcomes and its innovation: stationary numerical mathematical models of heat exchange in the main types of SDP – radiational (RD), convectional (CD) and radiation-convectional (RCD) and their practical algorithmization have been carried out.

- limited coefficient of efficiency and drying speed of radiation SDP are defined; it is shown that they are in the same speed with coefficient of efficiency of air-solar drying;
- approximate non-stationary model of RD is carried out and the time of RD turn to stationery work regime is defined;
- approximate analytical dependence for speed and coefficient of efficiency of drying in solar convectional drying plants has been received;
- approximate analytical dependence for drying speed in radiation-convectional solar drying plants has been received;
- it is shown that in RCD the limited meaning of coefficient of efficiency is at the 0,5 level;
- new radiational SDP that differs with the availability of heat accumulator has been worked out, for which we have got a patent.

Practical meaning: SDP construction has been carried out.

Application rate: research results in the form of methods and programmes of calculation have been applied to in certain organizations.

The sphere of use: - Solar drying machinery, heat technology.

N. Tunaeva

Марам-Ош
10.01.05

Подписано в печать 04.04.05.

Формат 60/84 1/16. Печать офсетная. Объем 1,2 усл. п.л.

Тираж 120 экз. Заказ № 0356

Отпечатано в типографии Ошского технологического университета.

714018, г. Ош. ул.Исанова, 81