

ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНО-ТОПЛИВНОЙ ТЕПЛИЦЫ ТРАНШЕЙНОГО ТИПА

Б.М. Ботиров¹
И.А. Юлдошев¹
А.С. Халимов²
Ю.М. Курбанов¹
Ж.Ш. Исмонлов³
Ж. Жураев¹

¹Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова Узбекистан, 100095, Ташкент, ул. Университетская, 2

²Физико-технический институт АН РУз, Узбекистан, 100084, Ташкент, ул. Чингиза Айтматова, 2Б

³ООО “JURU Energy Consulting” Узбекистан, 100095, Ташкент, ул. Чуст 10А

e-mail: yuldashev.i2004@gmail.com

<https://doi.org/10.5281/zenodo.13377600>

Аннотация: В статье представлены результаты исследования оптимального проекта траншейной теплицы с ограничениями по удельной годовой тепловой нагрузке и первоначальной инвестиции. В первой части исследования получен оптимальный проект траншейной теплицы с ограничением удельной годовой тепловой нагрузки до 50 кВт·ч/(м²·год) при первоначальной инвестиции в размере 2000 долларов США. При проектировании траншейных теплиц с ограниченным бюджетом инвестиций рекомендуется использовать двухслойные поликарбонатные листы толщиной 10 мм с коэффициентом теплопередачи 2,75 Вт/(м²·К) и толщину траншеи 6,32 см. При необходимости снижения удельной годовой тепловой нагрузки теплицы до уровня ниже 33,52 кВт·ч/(м²·год) рекомендуется использовать трехслойные поликарбонатные листы толщиной 16 мм с коэффициентом теплопередачи 0,62 Вт/(м²·К) и глубину траншеи 6,32 см. Проведен анализ второго варианта траншейного тепличного проекта, основанного на использовании газобетонных блоков и сотового поликарбоната. Оптимизированный проект позволил снизить удельную тепловую нагрузку на отопление на 50% по сравнению с исходным проектом и сократить выбросы CO₂ на 75%. Общая сумма первоначальной инвестиции составила 1653,13 доллара США, а срок дисконтированной окупаемости реконструкции составил 4,7 месяцев. Результаты исследования показывают, что траншейные теплицы могут быть эффективным и устойчивым способом выращивания сельскохозяйственных культур. Оптимизация проектирования и строительства траншейных теплиц может привести к значительному снижению энергопотребления и выбросов парниковых газов.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, технико-экономические показатели, солнечно-топливная теплица, траншейный тип, метод градусо-суток отопительного периода, годовая солнечная радиация; толщина теплоизоляции; оптимальная глубина траншеи.

1 ВВЕДЕНИЕ

В мире 20% общего теплового энергопотребления в отраслях, предназначенных для выращивания сельскохозяйственной продукции, расходуется на системы теплоснабжения защищенных почвенных структур, т.е. теплицы [1]. Теплицы – основные производственные объекты, обеспечивающие рынок потребителей местными свежими овощами круглый год.

Исследования показывают, что такое производство затратно и требует значительного объема энергии. Важнейшим условием в таких случаях является минимизация энергопотребления. Для снижения энергопотребления необходимо выбирать оптимальный дизайн с учетом теплопотерь в теплицах и использовать эффективные теплоизоляционные материалы на основе теплотехнических расчетов.

В выращивании овощей в теплицах используется 10÷13 кг у.т. на 1 кг продукции. Расходы на

отопление составляют 40÷60%, оплата труда - 15÷25%, амортизация - 10÷15% [10]. При проектировании тепличного хозяйства важно выбирать рациональные источники обогрева, включая комбинацию с возобновляемыми источниками и тепловыми отходами.

В южных регионах Европы годовая потребность в отоплении теплицы составляет 1,715 МВт·ч, что соответствует 638 кВт·ч/м² [2]. Максимальная тепловая нагрузка в среднем составляет около 590 кВт в самые холодные зимние месяцы.

Результаты расчетов на основе данных о погоде января 2021 года в Узбекистане показывают, что средние теплопотери в теплице с пленочным покрытием и площадью 108 м² составляют 21,4 кВт, с стеклянным покрытием - 18,6 кВт, с поликарбонатным покрытием - 15,6 кВт, с двойным остеклением - 2,6 кВт, с двойным поликарбонатным покрытием - 1,9 кВт. Эти теплопотери представляют тепловую нагрузку теплицы с учетом коэффициента

инфильтрации. Среднемесячная тепловая нагрузка теплицы с пленочным покрытием площадью 108 м² составляет 21,4 кВт, и 31,3% (6,7 кВт) этой тепловой нагрузки могут быть покрыты солнечной энергией [3].

В результате проведенных экспериментов в климатических условиях города Карши было установлено, что тепловая нагрузка теплицы с полезной площадью двухслойной пленки 100 м² составляет около 18÷22,5 кВт, то есть удельная тепловая нагрузка равна 180÷225 Вт/м², и тепловая нагрузка теплицы с двумя слоями пластикового покрытия. Было научно доказано, что это позволяет снизить расход топлива в 1,73 раза по сравнению с ламинированным покрытием [1].

Результаты исследований применения земельно-воздушного теплообменника (ЗВТО) в качестве источника неглубокой геотермальной энергии для обеспечения тепловых потребностей тепличного комплекса в провинции Альборз, Иран показали, что для удовлетворения потребностей в отоплении в этом регионе требуется больше энергии, чем для охлаждения. Средний потенциал системы ЗВТО на основе индекса тепловых дней составил 10,76°C для повышения температуры в холодный сезон и 17,96 °C для ее снижения в теплый сезон. Это означает, что система ЗВТО способна удовлетворять тепловые потребности теплицы в этом регионе в соответствии с рассчитанными значениями градусо-сутки отопления (ГСОП) и градусо-сутки охлаждения (ГСОХ). Этот метод может быть полезен для мониторинга и оптимизации условий для роста растений, выбора оптимальных культур, что в свою очередь может помочь в управлении поливом и внесении удобрений для выращиваемых культур [4].

Сравнение технических и экономических вариантов обогрева солнечной теплицы показывает, что комбинированный вариант с теплицей-хранилищем и тепловым насосом экономит 222,6 долларов США (400700 сумов в 2012 году) ежегодно. Использование теплового насоса увеличивает энергопотребление почти в три раза, но одновременное охлаждение хранилища и обогрев теплицы с использованием теплового насоса снижает энергопотребление на 80%, что приводит к экономии 1171,04 долларов США (2107880 сумов в 2012 году) в год [5].

Оптимизация солнечной радиации в зиму и лето увеличивает время выращивания растений. Минимизация площади покрытия снижает затраты на строительство и обслуживание. Лучшая ориентация теплицы на севере Ирана - с востока на запад, оптимальная длина максимальна. Высота теплицы и угол наклона крыши для Рашта - 3.6 м и 14° соответственно. Соотношение материала покрытия к площади пола для двух вариантов площади - 3.84 м² и 2.96 м. Модель может быть адаптирована для других местоположений и климатов [6].

Необходимость эффективного использования энергии вызвана увеличением выбросов парниковых газов и ростом стоимости ископаемых топлив. Тепличные системы развиваются для безопасного и качественного производства продовольствия, особенно во внесезонье. В странах, таких как Иран, использование топлива в теплицах высоко, и есть потенциал для улучшения систем отопления. Экспериментально изучены тепловые рекуперационные системы (ТРС) с и без встроенного фазопереходного материала (ФПМ). Эффективность системы отопления увеличилась на 40% и 33% для ТРС и ТРС с ФПМ соответственно. С использованием ФПМ в ТРС температуры внутреннего воздуха и отработавших газов изменились на +17% и -8.2%. Экономия топлива составила 19% и 48% с временем окупаемости инвестиций 3 и 4 месяца [7].

Разработана экономичная система сезонного солнечного аккумулирования тепла в почве (СССАТП) для теплицы [8]. Технология хранения тепла в почве позволяет использовать солнечную энергию, накопленную под теплицей, для сокращения энергопотребления в холодную зиму и облачные дни. По сравнению с традиционными системами подземного отопления, не требуются тепловые насосы, что снижает затраты. Проведенные испытания подтвердили выполнимость сезонного теплового накопления и частичное решение проблемы дисбаланса между спросом и предложением солнечной энергии. Моделирование с использованием TRNSYS, калибровка на основе полного сезона. Сравнение с традиционной солнечной системой в Шанхае показало экономию энергии 27,8 кВт·ч/(м²·год). В заключении обсуждаются оптимизация системы, включая площадь солнечных коллекторов и глубину закопанных труб, а также результаты испытаний на пилотном объекте.

Исследован оптимальный дизайн комбинированной системы солнечного коллектора и геотермальной тепловой помпы для обогрева теплицы. Проанализирована система с точки зрения экономики и техники, достигнут баланс между ними с оптимальным дизайном, приблизительный срок окупаемости - 14 лет [9].

Современные тепличные комплексы подразделяются на две категории в зависимости от режима их эксплуатации: сезонные и круглогодичные. Обычно сезонные теплицы применяются в период с ноября по март, обеспечивая возможность получения урожая в холодный сезон; при этом они могут быть реализованы в форме надземных или траншейных структур [11-13]. Важно отметить, что надземные теплицы, в отличие от траншейных, подвержены воздействию ветров и перепадам температур, что существенно сказывается на затратах энергии, направленной на обогрев в зимний период [12]. Одним из ключевых преимуществ теплиц траншейного типа является их

относительно низкое энергопотребление [14-18]. Современное сельское хозяйство сталкивается с рядом вызовов, требующих инновационных подходов для обеспечения устойчивого и эффективного производства. Одним из ключевых направлений в этом контексте является разработка и оптимизация систем тепличного земледелия, способных сочетать в себе высокую производительность и энергетическую эффективность.

Настоящая научная работа посвящена многокритериальной оптимизации технико-экономических показателей солнечно-топливной теплицы траншейного типа. В центре внимания исследования находится использование инновационных методов оценки, таких как метод градусо-суток отопительного периода и годовая солнечная радиация. Эти методы позволяют более точно анализировать энергетические потребности теплицы и оптимизировать ее параметры для максимальной эффективности.

Основной целью исследования является оптимизация двух ключевых параметров солнечно-топливной теплицы: толщины теплоизоляции, встроенной на наружной стене, и глубины траншеи. Эти параметры играют решающую роль в обеспечении оптимальных условий тепличного климата, воздействуя на сохранение тепла, энергопотребление и, следовательно, экономическую эффективность производства.

2 МЕТОДОЛОГИЯ

Этапы методологии объединяются с целью создания комплексного подхода к многокритериальной оптимизации технико-экономических показателей солнечно-топливной теплицы траншейного типа, обеспечивая точность и приложимость полученных результатов в практических условиях.

Определение климатических особенностей местоположения теплицы.

Характеристика солнечной радиации и температурных условий в г. Ташкенте

Ташкент расположен в зоне умеренного климата, с жарким летом и холодной зимой. В осенний и зимний периоды солнечная радиация значительно снижается. Средняя годовая солнечная радиация в Ташкенте составляет 1200 кВт·ч/(год·м²). В осенний период (октябрь-ноябрь) она составляет около 500 кВт·ч/м², в зимний (декабрь-февраль) - около 200 кВт·ч/м². В весенний период (март-апрель) она постепенно увеличивается до 500 кВт·ч/(год·м²). В осенний период (октябрь-ноябрь) среднесуточная температура воздуха в Ташкенте составляет около 15-18°C. В зимний период (декабрь-февраль) она опускается до -5-10 °C. В весенний период (март-апрель) она постепенно повышается до 15-18°C [28-33].

Расчет годовых градусо-суток отопительного периода в г.Ташкенте

Градусо-сутки отопительного периода — это количество суток, в течение которых среднесуточная температура воздуха ниже 8 °C. Годовые градусо-сутки отопительного периода в г.Ташкенте составляют около 1800. Из них на осенний период (октябрь-ноябрь) приходится около 300, на зимний (декабрь-февраль) - около 1200, на весенний (март-апрель) - около 300.

Методика расчета удельного годового расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию теплицы

Расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию теплицы в течение отопительного периода $Q_{от}^{год}$ кВт·ч/год, следует определять по формуле [28,29]

$$Q_{от}^{год} = 0,024f \cdot ГСОП(K_{т} + K_{в}) + 0,024ГСОП^{*} \cdot K_{г} - \eta(Q_{с} + Q_{п}) \quad (1)$$

где f - коэффициент включения ночного снижения температуры системы отопления = 0,95 (к·ч/д), ГСОП – градусо-сутки отопительного периода теплицы над земной части (°C·день); ГСОП^{*} - градусо-сутки отопительного периода траншейной части теплицы (°C·день); $K_{т}$ – трансмиссионные теплопотери через наружные ограждения над земной части теплицы (Вт/°C), $K_{г}$ – трансмиссионные теплопотери через траншею теплицы (Вт/°C), $K_{в}$ – коэффициент теплопотери за счет вентиляционного воздухообмена с учетом инфильтрации за отопительный период (Вт/°C), η - коэффициент включения коэффициента полезного использования внутренних и солнечных теплопоступлений, $Q_{с}$ - полезные солнечные теплопоступления (постоянное значение) (кВт·ч/год), $Q_{п}$ - полезные внутренние теплопоступления (постоянное значение) (кВт·ч/год) [28].

$$K_{т} = \sum_{i=1}^n \left[U_i A_i \right] = [U_{с} A_{с} + U_{бс} A_{бс} + U_{юс} A_{юс} + U_{сс} A_{сс} + U_{кр} A_{кр}] \quad (2)$$

$$K_{г} = U_{ос} A_{ос} + U_{ст} A_{ст} \quad (3)$$

где $U_{с}$, $U_{кр}$, $U_{ос}$, и $U_{ст}$ коэффициент теплопередачи (Вт/(м²·°C)) наружных стен, крыши, основания траншея и боковых стен траншея до реконструкции. $A_{бс}$, $A_{юс}$, $A_{сс}$, $A_{кр}$, $A_{ос}$, и $A_{ст}$ – площади наружных боковых стен, южной стены, северной стены, крыши теплицы, и основания и боковой стены траншея (м²).

Площадь боковых стен траншея зависит от глубины траншея, которая определяется следующим образом

$$A_{ст} = h(a + b) \quad (5)$$

$$A_{бс} = \frac{1}{2}(H_1 + H_2 - 2h)a \quad (6)$$

$$A_{сс} = (H_1 - h)b \quad (7)$$

$$A_{юс} = (H_2 - h)b \quad (8)$$

$$A_{ос} = ab \quad (9)$$

$$A_{кр} = b\sqrt{a^2 + (H_1 - H_2)^2} \quad (10)$$

где a и b - ширина и длина основания траншея, соответственно (м); H_1 и H_2 высота северной и южной стены теплицы (м).

ГСОП – градусо-сутки отопительного периода, определяемые по формуле [29]:

$$\text{ГСОП} = (t_{\text{в}} - t_{\text{от}}) z_{\text{от}} \quad (11)$$

где: $t_{\text{от}}$, $z_{\text{от}}$ - среднесуточная температура наружного воздуха, °С, и продолжительность, в сутках, отопительного периода, из СНиП 41-02-2003; $t_{\text{в}}$ – расчетная температура внутреннего воздуха теплицы, °С, из СНиП 41-01-2003.

Замена теплого воздуха окружающей среды холодным наружным воздухом приводит к потерям тепла за счет вентиляции. Для расчета этих потерь пренебрегаются различиями в герметичности теплиц, поэтому $K_{\text{в}}$ – коэффициент теплопотери за счет вентиляционного воздухообмена с учетом инфильтрации за отопительный период (Вт/°С) определяется следующим образом:

$$K_{\text{в}} = \gamma V \quad (12)$$

где $\gamma = 0,19$ Вт/(м³°С), и V - отапливаемый объем теплицы (м³), который определяется следующим уравнением;

$$V = (A_{\text{ст}} + A_{\text{бс}}) b. \quad (13)$$

Теплопоступления через светопрозрачные ограждения солнечной радиации в течение отопительного периода $Q_{\text{с}}$, кВт·ч/(г·м²), для четырех фасадов зданий, ориентированных по четырем направлениям, следует определять по формуле

$$Q_{\text{с}} = [\xi g]_{\text{сп}} (I_{\text{кр}} A_{\text{кр}} + [A_{\text{бс}} (I_3 + I_{\text{в}}) + I_{\text{ю}} A_{\text{ю}}]) \quad (14)$$

где $I_{\text{кр}}$, I_3 , $I_{\text{в}}$, $I_{\text{ю}}$ – плотность потока солнечной радиации подающей на крышу, западную стену, восточную стену, южно-ориентированную стену теплицы (кВт·ч/(год×м²)) (Таблица 1); ξ – коэффициент утилизации полученной полезной солнечной энергии [-]; $g_{\text{сп}}$ - коэффициент относительного проникания солнечной радиации для светопрозрачного ограждения [-] (Таблица 1).

Таблица 1: Плотности потоков солнечной радиации на и ГСОП в городе Ташкенте

Месяц	Западная стена, кВт × ч / (год × м ²)	Восточная стена, кВт × ч / (год × м ²)	Северная стена, кВт × ч / (год × м ²)	Южная стена, кВт × ч / (год × м ²)	Крыша теплицы, кВт × ч / (год × м ²)	ГСОП, °С · день
Октябрь	239,2	240,7	118,5	620,4	397,7	71
Ноябрь	187,5	188,6	88,1	492,6	315,3	275
Декабрь	147	148,2	68,5	394,4	252,6	461
Январь	130,6	129,9	59,8	299,4	195,4	633
Февраль	160,6	159,4	73,8	396,7	255,9	551
Март	209,4	208,8	99,9	516	332	400
Апрель	251	250,8	121,4	624,6	406,8	197
	1325,3	1326,4	630	3344,1	2155,7	2588

ГСОП^{*}- градусо-сутки отопительного периода траншейной части теплицы (°С·день) осуществляется следующим образом [29] (Таблица 2);

$$\text{ГСОП}^* = (t_{\text{в}} - t_{\text{гр.пв.}}) z_{\text{от}} \quad (15)$$

$t_{\text{в}}$ - температура воздуха в теплице (°С), $t_{\text{гр.пв.}}$ – средняя температура поверхности грунта в зимний период (°С), $z_{\text{от}}$ – продолжительность, в сутках, отопительного периода.

Таблица 2: Средняя месячная температура поверхности грунта в Ташкенте

Месяц	Температура поверхности грунта, °С	Разница температуры, 18°С	Продолжительность отопительного периода, в сутках	ГСОП*, °С · день
Октябрь	13,5	4,5	31	139,5
Ноябрь	7,2	10,8	30	324
Декабрь	2,3	15,7	31	486,7
Январь	-0,5	18,5	31	573,5
Февраль	3,2	14,8	28	414,4
Март	9,4	8,6	31	266,6
Апрель	17,2	0,8	30	24
				2228,7

Общая тепловая нагрузка системы отопления теплицы до реконструкции

Тепловая нагрузка, обусловленная функционированием системы отопления теплицы до проведения реконструкции, представляет собой общее энергопотребление в виде тепловой энергии. Потребность в отоплении теплицы рассматривается как необходимость в тепловой энергии. Общее ежегодное энергопотребление (в кВт·ч/год) в теплице до проведения модернизации может быть выражено следующим образом:

$$Q_{\text{тн}} = \frac{Q_{\text{от}}^{\text{год}}}{\eta_{\text{со}}}, \quad (16)$$

где $\eta_{\text{со}}$ – КПД системы отопления теплицы [29].

Общая тепловая нагрузка системы отопления теплицы после реконструкции

Тепловая нагрузка системы отопления теплицы до проведения реконструкции будет снижена путем улучшения внешних светопрозрачных ограждений с использованием теплоизоляционных светопрозрачных материалов. Общая годовая тепловая нагрузка ($Q_{\text{тн}}^*$, кВт·ч / год), выраженная в кВт·ч/год) теплицы после реконструкции может быть представлена следующим образом:

$$Q_{\text{тн}}^* = \frac{Q_{\text{от}}^{\text{год}*}}{\eta_{\text{со}}} \quad (17)$$

где $[(Q_{\text{от}}^{\text{год}})^*]$ – потребность в отоплении теплицы (кВт·ч/год) после соответствующей реконструкции.

Сокращение выбросов CO₂ благодаря мере реконструкции

Уменьшение выбросов диоксида углерода (CO₂) достигается через внедрение мер реконструкции. Выбросы CO₂ в атмосферу обусловлены использованием энергии, произведенной из первичных источников, основанных на сжигании ископаемых топлив. Годовой объем выбросов CO₂ (M_{CO_2} , кг/год) может быть вычислен согласно следующей формуле [29]:

$$M_{\text{CO}_2}^* = \mu_f Q_{\text{тн}}^* \quad (19)$$

где μ_f - удельная эмиссия CO₂ (кг/кВт·ч) из-за использования топлива (в нашем случае природный

газ) из локальной сети. Соответственно, после реконструкции выброс CO₂ можно записать следующим образом:

$$M_{\text{CO}_2}^* = \mu_f Q_{\text{тн}}^* \quad (19)$$

Мера реконструкции

В ходе одновременной оптимизации были рассмотрены вопросы модернизации светопрозрачных ограждений теплицы с целью улучшения эффективности наружных светопрозрачных ограждений теплицы. Также был проанализирован вопрос о глубине траншеи теплицы. В качестве элементов для утепления внешних светопрозрачных ограждений были рассмотрены различные теплоизоляционные светопрозрачные материалы.

Коэффициенты теплопередачи для основания и боковых стен траншеи теплицы

Коэффициенты теплопередачи для основания и боковых стен траншеи теплицы представляют собой параметры, зависящие от глубины самой траншеи. Эта зависимость предполагает, что тепловые характеристики структурных элементов траншеи изменяются в соответствии с её глубиной [12, 24].

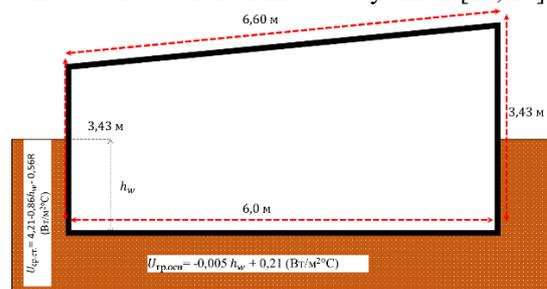


Рис. 1. Тепловые потери через нижележащие стены траншеи [12, 24].

Fig. 1. Heat loss through underlying trench walls [12, 24].

Для построения регрессионного уравнения для данных из таблицы Таблица 1. Тепловые потери через нижележащие стены траншеи ((Вт/м²·°С)) нам необходимо определить независимые и зависимые переменные.

Таблица 3

Тепловые потери через нижележащие стены траншеи (U (ст.), (Вт/м²·°С)) [12, 24]

Глубина траншеи, м	С			
	Без теплоизоляции, (м ² ×°С/Вт)	теплоизоляцией на уровне R=0,73 м ² ×°С/Вт	теплоизоляцией на уровне R=1,47 м ² ×°С/Вт	теплоизоляцией на уровне R=2,2 м ² ×°С/Вт
0,0	7,77	2,87	1,77	1,27
0,3	4,2	2,2	1,5	1,2
0,6	2,93	1,77	1,27	1
0,9	2,23	1,5	1,13	0,9
1,2	1,8	1,3	1	0,83
1,5	1,5	1,13	0,9	0,77
1,8	1,3	1	0,83	0,7

Исследование этой зависимости важно для более глубокого понимания теплового режима внутри траншеи и, соответственно, для оптимизации процессов теплоснабжения и эффективности теплицы в целом [12, 24]:

$$U_{oc}^* = -0,005h + 0,21 \quad (20)$$

$$U_{ct}^* = 4,141e^{-10h} + 2,565 e^{-1.654h} + U_0 \quad (21)$$

где h - глубина траншея (м); U_0 - уровень теплоизоляции траншея, Вт/(м²×°C). В рамках исследования, направленного на определение оптимальной глубины траншеи теплицы, также был проведен анализ, касающийся глубины траншеи данного объекта. Следует отметить, что услуга по прокладке траншей предоставляется в широком диапазоне цен, варьирующемся до 11 долларов США за каждый кубический метр.

Экономический анализ для оптимального дизайна

При проведении реконструкции ограждающих конструкций теплицы очевидно, что начальные капитальные затраты на теплоизоляционные светопрозрачные материалы увеличиваются, однако уровень первичной энергии, требуемой для отопления теплицы, снижается, что соответственно приводит к уменьшению затрат на энергию. Оптимальное проектирование реконструкции заключается в том, чтобы общая стоимость достигала минимума. Общая стоимость представляет собой сумму стоимости всех использованных материалов и фактической стоимости (PVF) энергопотребления в течение срока службы материалов, которая определяется как [29]:

$$C_{общ} = C_T^* PVF + C_M, \quad (22)$$

где C_T - годовая стоимость энергии (долл. США) для подачи тепловой энергии, рассчитывается следующим образом:

$$C_T^* = C_{топ} \times Q_{тн}^*, \quad (23)$$

где $C_{топ}$ - удельная стоимость топлива (долл. США/(кВт×ч)). Стоимость материала (C_M) рассматривается как начальная инвестиционная стоимость, которая состоит из:

$$C_M = C_c(A_{bc} + A_{cc} + A_{юс})x_c + C_{кр}A_{кр}x_{кр} + C_h A_{oc} x_h \quad (24)$$

где C_c , и $C_{кр}$ - удельные затраты на изоляционные материалы для наружных стен, крыши теплицы, соответственно ((долл. США)/(Вт/(м²×°C))); и C_h - удельная стоимость (долл. США/м²) прокладки траншея [24].

Present Value Factor (PVF) представляет собой коэффициент, используемый для дисконтирования

будущих денежных потоков на настоящее время. Этот фактор учитывает временную стоимость денег, что означает, что деньги, полученные или потраченные в будущем, имеют меньшую стоимость, чем те же деньги сегодня. PVF зависит от уровня инфляции g и процентной ставки i . PVF можно определить следующим образом [29]:

$$PVF = \frac{(1+r)^N - 1}{r(1+r)^N}, \begin{cases} r = \frac{i-g}{1+g} & i > g \\ r = \frac{g-i}{1+i} & g > i \end{cases} \quad (25)$$

$$PVF = \frac{N}{1+i}, i = g \quad (26)$$

Принимая во внимание временную стоимость инвестиций, (τ_D) дисконтированные периоды окупаемости (в году) меры по модернизации могут быть определены следующим образом [28,29]:

$$\tau_D = -\frac{\ln\left|1 - \frac{rC_M}{C_T - C_T}\right|}{\ln|1+r|} \quad (27)$$

где $C_T = C_{топ} \times Q_{топ}$ - годовая стоимость общей энергии до реконструкции (долл. США).

Оптимизационная задача и стратегия её решения.

Для оптимизации проектирования ограждающих конструкций теплицы, проведено рассмотрение оптимальных вариантов проекта для различных сценариев. В качестве переменных проектирования рассматривались параметры теплоизоляции светопрозрачных ограждений, крыши теплицы и глубины траншеи. В первом сценарии основным критерием оптимизации является минимизация общей стоимости реконструкции с целью достижения оптимальных значений переменных проектирования. Второй сценарий направлен на максимальное снижение потребления первичной энергии для отопления помещений при одновременной минимизации инвестиционных затрат. В последнем сценарии, нацеленном на создание почти нулевого уровня углеродных выбросов в процессе функционирования теплицы, основное внимание уделяется минимизации общего потребления первичной энергии, при этом инвестиционные затраты также поддерживаются на минимальном уровне. Сформулированная задача оптимизации была реализована в среде Excel и успешно решена с применением пакета Solver [20].

Таблица 4

Перечень светопрозрачных материалов и их теплотехнические свойства, внедряемых в ограждающие конструкции теплицы [21].

Наименование материала	Коэффициенты теплопередачи (Вт/(м ² ×°C))	$g_{сп}$ - коэффициент проникания солнечной радиации для	Стоимость, долл.США/м ²

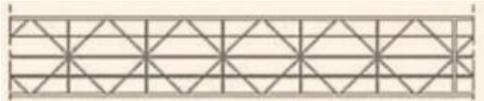
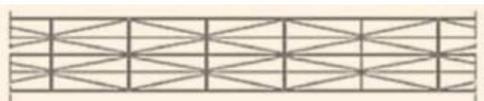
		светопрозрачного ограждения [-].	
0,1 мм	6,2	0,9	1,23
0,15 мм	5,5	0,88	1,67
0,2 мм	5,4	0,86	2,11
0,25 мм	5,2	0,84	2,55
0,3 мм	5	0,82	2,99
10 мм Однослойный	2,39	0,65	6,8
16 мм Однослойный	1,88	0,58	8,6
16 мм Однослойный	1,77	0,54	8,9
10 мм Двухслойный	1,29	0,46	10,6
16 мм Двухслойный	0,97	0,38	11,8
16 мм Двухслойный	0,91	0,34	12,0
10 мм Трехслойный	0,87	0,35	12,1
16 мм Трехслойный	0,66	0,28	12,9
16 мм Трехслойный	0,62	0,24	13,0

При проведении многоцелевой оптимизации были рассмотрены различные варианты (Таблица 4, 5) светопрозрачных ограждений с целью определения оптимальных параметров для эффективного тепличного земледелия. Исследованные материалы включают в себя пленку

различной толщины (от 0,1 мм до 0,3 мм) и поликарбонатные листы различных толщин и структур: однослойные (10 мм, 16 мм пятистенные, 16 мм девятистенные), двухслойные (10 мм, 16 мм пятистенные, 16 мм девятистенные) и трехслойные (10 мм, 16 мм пятистенные, 16 мм девятистенные).

Таблица 5

Конфигурация светопрозрачного сотового поликарбонатного листа различной конфигурации [21,24].

Именование структуры	Структуры	Толщины (мм)	Весы (кг/м ²)	Коэффициент теплопотери
Высокоизоляционные				
пятистенные		10	1,75	2,39
пятистенные x-структура		32	3,8	1,32
		25	3,4	1,51
		16	2,7	1,88
девятистенные x-структура		16	1,5	1,77
		20	2,8	1,59
		25	3,0	1,40

Этот широкий спектр материалов был включен в оптимизационный процесс с целью выявления влияния различных светопрозрачных ограждений на тепловые и энергетические показатели теплицы. Пленка с различной толщиной и поликарбонатные листы с разнообразными характеристиками стали

объектом детального анализа, чтобы выявить оптимальные параметры, обеспечивающие эффективное тепловое управление и минимизацию энергетических затрат в условиях тепличного производства.

Таблица 6

Наименование величин	Обозначение	Значение	Единица измерения
Ширина теплицы	a	6	м
Длина теплицы	b	16,3	м
Высота северной стены теплицы	H_1	3,7	м
Высота южной стены теплицы	H_2	2,7	м

Результаты и обсуждения

Оптимизация теплотехнических показателей теплицы траншейного типа первого варианта

Исследование направлено на оптимизацию теплотехнических параметров теплицы траншейного типа первого варианта (рис. 2) с целью улучшения энергоэффективности и снижения затрат на поддержание оптимальных климатических условий для растительности. Геометрические характеристики теплицы оказывают существенное воздействие на ее тепловые свойства (Таблица 6). В частности, ширина теплицы составляет 6 м, длина - 16,3 м. Важными параметрами являются высота северной стены (3,7 м) и высота южной стены (2,7 м).



Рис. 2. Теплица траншейного типа первого варианта [24,25].

Fig. 2. Trench-type greenhouses - the first option [24,25].

В ходе проведения оптимизации использовались коэффициенты теплопередачи светопрозрачных ограждений теплицы и глубина траншеи в качестве независимых переменных. Минимизация общей стоимости жизненного цикла теплицы была установлена в качестве целевой функции. Этот подход позволяет учесть экономические аспекты при выборе параметров для оптимизации теплового режима теплицы. Учет ограничений, связанных с удельной годовой тепловой нагрузкой на отопление теплицы, добавляет дополнительный уровень сложности в оптимизационный процесс, обеспечивая сбалансированный подход к повышению эффективности системы. Этот научный подход к оптимизации теплотехнических показателей теплицы траншейного типа открывает перспективы для более глубокого понимания взаимосвязи между геометрическими параметрами и энергетической эффективностью.

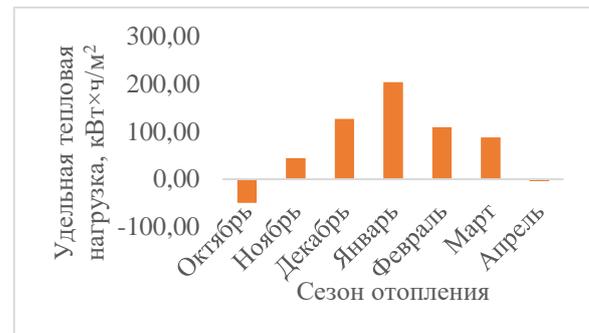


Рис. 3. Тепловая нагрузка в теплице во время сезона отопления.

Fig.3. Heat load in a greenhouse during the heating season.

Рис. 3. представляет данные о тепловых нагрузках в теплице с октября по апрель предоставляют полезную информацию о колебаниях тепловых потребностей в различные месяцы. В октябре отмечается отрицательная тепловая нагрузка, свидетельствующая об использовании охлаждения. С ноября по январь тепловая нагрузка растет, достигая максимума в январе, что указывает на необходимость интенсивного обогрева в холодные зимние месяцы. В феврале и марте отмечается некоторое снижение тепловой нагрузки, связанное с постепенным улучшением погодных условий. В апреле снова наблюдается отрицательная тепловая нагрузка, из-за повышения температуры весеннего периода. Годовая тепловая нагрузка составляет 591,91 кВт·ч/(год×м²), что предоставляет общий обзор энергетической потребности теплицы за весь период. Удельная стоимость отопления, равная 23,68 долл. США/м², отражает затраты на отопление в расчете на единицу тепловой нагрузки. Общий анализ этих данных может быть полезен для оптимизации системы отопления, адаптации к изменениям климатических условий и снижения общих затрат на отопление в долгосрочной перспективе.

Общая годовая тепловая нагрузка (кВт·ч/м²×год) и удельные годовые выбросы CO₂ (кгсо₂ /м²×год) при использовании различных светопрозрачных ограждений для теплицы

Проведенные исследования направлены на анализ удельной годовой тепловой нагрузки на отопление теплицы первого варианта, учитывая использование различных светопрозрачных ограждений. Представленные данные о характеристиках тепловой нагрузки представляют собой важный вклад в оптимизацию эффективности тепличной системы.

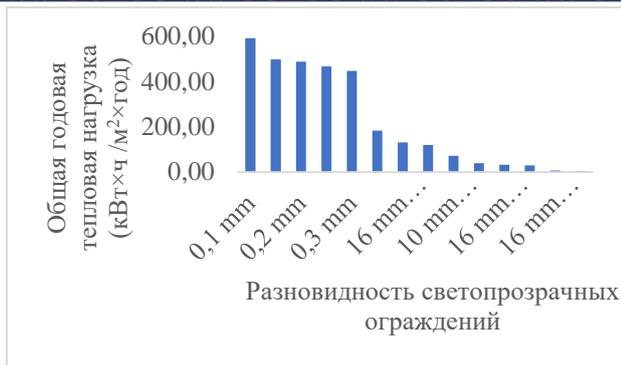


Рис. 4. Общая годовая тепловая нагрузка (кВт·ч / м²·год) при использовании различных светопрозрачных ограждений для теплицы.

Fig. 4. Total annual heat load (kW·h/m²·year) when using various translucent greenhouse fencing.

Из графика видно, что тепловая нагрузка значительно варьируется в зависимости от используемых материалов. При использовании пленки с различной толщиной (от 0,1 мм до 0,3 мм) наблюдается тенденция к уменьшению тепловой нагрузки с увеличением толщины пленки. Напротив, использование поликарбонатных листов с различными толщинами и структурами приводит к более значительному снижению тепловой нагрузки.

Особенно выделяется эффективность двухслойных поликарбонатных листов с толщиной 10 мм, где годовая тепловая нагрузка значительно уменьшается. Этот результат подчеркивает важность правильного выбора светопрозрачных материалов с учетом их толщины и структуры для достижения оптимальных теплотехнических характеристик теплицы.

Полученные результаты могут послужить основой для реализации эффективных тепличных систем, которые сочетают в себе высокую энергоэффективность и уменьшенные эксплуатационные затраты. Дополнительные исследования в этом направлении могут углубить понимание влияния различных светопрозрачных материалов на теплотехнические характеристики теплицы.

Представленные исследования об удельных годовых выбросах CO₂, связанных с расходом топлива на отопление теплицы, предоставляют значимые данные о экологическом воздействии различных светопрозрачных ограждений. График наглядно демонстрирует изменение удельных выбросов в зависимости от типа и толщины используемого материала.

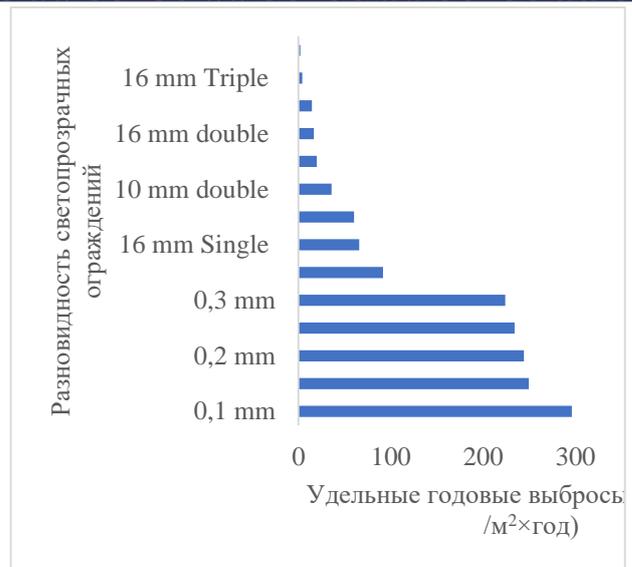


Рис. 5. Удельные годовые выбросы CO₂ (кгCO₂ / м²·год) при использовании разных светопрозрачных покрытий.

Fig. 5. Comparison annual CO₂ emissions (kgCO₂ / m²·year) when using different translucent coatings.

Варьирование толщины пленки от 0,1 мм до 0,3 мм сопровождается снижением удельных годовых выбросов CO₂. Отмечается, что уменьшение толщины пленки сопровождается более высокими выбросами CO₂, что может быть связано с увеличенными потерями тепла и, следовательно, увеличением расхода топлива на отопление.

В контексте поликарбонатных листов, результаты показывают, что двухслойные структуры с толщиной 10 мм имеют значительно более низкие удельные годовые выбросы CO₂ по сравнению с однослойными аналогами. Этот эффект свидетельствует о более эффективном удержании тепла и сокращении расхода топлива, что в свою очередь снижает общие выбросы CO₂ в окружающую среду.

Эти результаты предоставляют важную основу для выбора оптимальных светопрозрачных материалов с учетом их воздействия на энергетическую эффективность и окружающую среду в условиях тепличного земледелия. Улучшение удельных годовых выбросов CO₂ в этом контексте имеет важное значение с точки зрения экологической устойчивости и содействия переходу к более эффективным методам тепличного производства.

Оптимизация теплотехнических показателей теплицы траншейного типа второго варианта

Проведенное исследование нацелено на оптимизацию теплотехнических параметров теплицы траншейного типа второго варианта (представленного на рис. 1) с акцентом на повышение энергоэффективности и снижение эксплуатационных затрат для поддержания оптимальных климатических условий для растений. Для возведения стен теплицы было использовано 300 газобетонных блоков стандартного размера, шириной 600 мм, высотой 300 мм и толщиной 200 мм

— наиболее распространенного формата для строительства стен. Эти блоки обеспечивают прочность и теплоизоляцию, что является важным фактором для создания оптимальной тепличной среды.

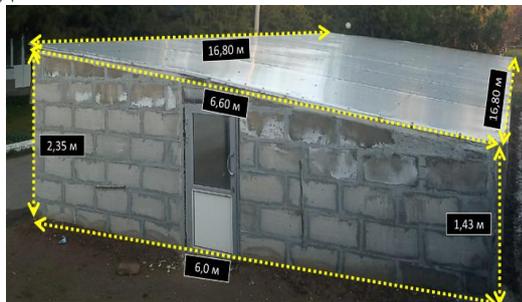


Рис. 6. Теплица траншейного типа второго варианта.

Fig. 6. Trench-type greenhouses - the second option.

Геометрические характеристики теплицы включают ширину 6 м и длину 16,3 м, а также существенные параметры высоты северной стены (3,7 м) и высоты южной стены (2,7 м). Эти параметры имеют ключевое значение для оптимизации тепловых свойств структуры и обеспечивают эффективное использование солнечного излучения и теплового потока внутри теплицы.

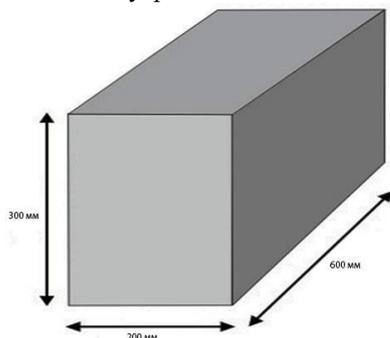


Рис. 7. Стандартные размеры газоблока - 600×300×200 мм.

Fig. 7. Standard dimensions of gas block - 600×300×200 мм.

Кроме того, учтен коэффициент теплопроводности газобетона, который составляет 0,145 Вт/м²С, что связано с его высокой пористостью. Важность этого параметра заключается в его влиянии на теплопередачу через стены теплицы, что существенно воздействует на ее тепловые характеристики. Данные параметры и характеристики обеспечивают основу для дальнейшего исследования и оптимизации тепличной системы, направленной на обеспечение оптимальных условий для роста растений при минимальном энергопотреблении.

В данном исследовании рассмотрены коэффициенты теплоотдачи на внешних и внутренних поверхностях ограждений, которые играют ключевую роль в определении энергетической эффективности здания. Конкретно, коэффициент теплоотдачи на наружных поверхностях составляет 23 Вт/(м²×С), в то время

как на внутренних поверхностях - 8,7 Вт/(м²×С). При анализе теплопроводности и толщины газобетонных блоков, которые являются основными строительными материалами, было выявлено, что их коэффициент теплопроводности составляет 0,145 Вт/(м²×С), а толщина равна 0,2 м. Эти параметры важны для оценки термического коэффициента. На основе этих данных, общий коэффициент теплопередачи через газобетонные блоки был рассчитан. С учетом ограниченных теплопотерь наружных и внутренних поверхностей ограждений, общий коэффициент теплопередачи составил 0,65 Вт/(м²×С). Это значение представляет собой важный параметр для оценки энергетической эффективности здания и может служить основой для принятия решений по улучшению теплоизоляции и снижению энергопотребления.

Представленное исследование предоставляет обширный анализ экономических и теплотехнических параметров тепличного проекта, основанного на использовании газобетонных блоков и сотового поликарбоната. Рассмотрим ключевые аспекты и результаты этого исследования.

Стоимость газобетонных блоков оценивается в 44,64 доллара США за кубический метр или 1,6 доллара США за блок. Для возведения стен теплицы использовано 300 газобетонных блоков. Крыша теплицы покрыта сотовым поликарбонатным двухслойным листом толщиной 10 мм с коэффициентом теплопередачи 1,29 Вт/(м²×С). Общий трансмиссионный коэффициент теплопередачи для ограждающих конструкций оценен в 191,7 Вт/°С, учитывая площадь поверхности крыши теплицы в размере 99,15 м². Стоимость сотового поликарбонатного двухслойного листа составляет 10,6 долларов США.

Глубина траншеи теплицы составляет 1,0 м, а площадь основания – 97,8 м², с объемом 97,8 м³. Стоимость услуги по прокладке траншей оценивается в 11 долларов США за каждый кубический метр. Таким образом, общая сумма первоначальной инвестиции составляет 2567,0 долларов США.

В данном варианте проекта удельная тепловая нагрузка на отопление снизилась с 591,91 до 106,05 кВт·ч/(м²×год), который объясняется эффективностью нового проекта, что подтверждается сокращением выбросов CO₂ с 509,75 до 53,026 кг/(м²×год). Расчеты также указывают на период окупаемости проекта в 7,3 месяца, что свидетельствует о его высокой эффективности в снижении энергопотребления и экологической устойчивости.

Закключение

В первой части исследования получен оптимальный проект траншейной теплицы с ограничением удельной годовой тепловой нагрузки до 50 кВт·ч/(м²·год) при первоначальной инвестиции в размере 2000 долларов США. При проектировании траншейных теплиц с

ограниченным бюджетом инвестиций рекомендуется использовать двухслойные поликарбонатные листы толщиной 10 мм с коэффициентом теплопередачи $2,75 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times ^\circ\text{C})$ и толщину траншеи 6,32 см. При необходимости снижения удельной годовой тепловой нагрузки теплицы до уровня ниже $33,52 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ рекомендуется использовать трехслойные поликарбонатные листы толщиной 16 мм с коэффициентом теплопередачи $0,62 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times ^\circ\text{C})$ и глубину траншеи 6,32 см.

В результате проведенного исследования оптимального проекта траншейной теплицы с установленными ограничениями удельной годовой тепловой нагрузки и первоначальной инвестиции были выявлены важные аспекты, способствующие повышению эффективности и устойчивости системы. При учете ограничения удельной годовой тепловой нагрузки до $50 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ и первоначальной инвестиции до 1653,13 доллара США, определены оптимальные коэффициенты теплопередачи для светопрозрачных ограждений, включая нулевую оптимальную глубину траншеи.

Трансмиссионные теплотери через ограждения и траншею теплицы были количественно оценены, что важно для дальнейшей разработки эффективных систем теплоизоляции. Общая стоимость жизненного цикла проекта оценена в 5584,4 доллара США, а срок дисконтированной окупаемости реконструкции составил 4,7 месяцев. Предложенное оптимальное решение приводит к значительному сокращению удельных годовых выбросов CO_2 с $509,75$ до $50 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$, что подчеркивает его высокую экологическую эффективность.

В итоге исследования оптимизации тепличного проекта второго варианта траншейного типа, основанного на использовании газобетонных блоков и сотового поликарбоната, выявлены ключевые параметры и результаты. Газобетонные блоки и геометрические характеристики теплицы спроектированы для повышения теплоизоляции и энергоэффективности. Учтены коэффициенты теплоотдачи и теплопроводности, обеспечивая основу для будущей оптимизации. Экономический анализ учтенных параметров, таких как стоимость материалов и услуг, позволяет оценить общую сумму первоначальной инвестиции. Проект существенно снизил удельную тепловую нагрузку на отопление, что подтверждается заметным сокращением выбросов CO_2 . Важные параметры, такие как период окупаемости в 7,3 месяца, указывают на высокую эффективность в снижении энергопотребления и улучшении экологической устойчивости проекта.

REFERENCES:

[1] Khairulla Davlonov, Abdimalik Toshboev, and Samandar Sultanov. The main heat-technical parameters of solar greenhouses in the southern climate of Uzbekistan APEC-VI-2023 E3S Web of Conferences 411, 01038 (2023) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341101038>.

[2] August Brækken, Sigurd Sannan, Ionut Ovidiu Jerca, Liliana Aurelia Bădulescu, Assessment of heating and cooling demands of a glass greenhouse in Bucharest, Romania. Thermal Science and Engineering Progress 41 (2023) 101830.

[3] A A Khusenov, G N Uzakov, A Kh Rakhimov, and Sh H Ergashev Evaluation of heat losses of the solar greenhouse during the heating season. APEC-VI-2023 E3S Web of Conferences 411, 01025 (2023) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341101025>

[4] H. Faridi, A. Arabhosseini, Gh. Zarei, M. Okos. Degree-Day Index for Estimating the Thermal Requirements of a Greenhouse Equipped with an Air-Earth Heat Exchanger System. Journal of Agricultural Machinery Vol. 11, No. 1, Spring- Summer 2021, p. 83-95.

[5] G. N. Uzakov Technical and Economic Calculation of Combined Heating and Cooling Systems Vegetable Store-Solar Greenhouse. Applied Solar Energy, 2012, Vol. 48, No. 1, pp. 60–61.

[6] Mahjoob Karambasti, B., Ghodrati, M., Naghashzadegan, M. et al. Optimum design of a greenhouse for efficient use of solar radiation using a multi-objective genetic algorithm. Energy Efficiency 15, 66 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12053-022-10073-6>

[7] Shu-Rong Yan, Mohammad Ali Fazilati, Navid Samani, Hamid Ghasemi, Davood Toghraie, Quyen Nguyen, Arash Karimipour. Energy efficiency optimization of the waste heat recovery system with embedded phase change materials in greenhouses: A thermo-economic environmental study. Journal of Energy Storage 30 (2020) 101445.

[8] Liang Zhang, Peng Xu, Jiachen Mao, Xu Tang, Zhengwei Li, Jianguo Shi. A low cost seasonal solar soil heat storage system for greenhouse heating: Design and pilot study. Applied Energy Volume 156, 15 October 2015, Pages 213-222.

[9] Mehdi Mehrpooya, Hoofar Hemmatabady, Mohammad H. Ahmadi. Optimization of performance of Combined Solar Collector-Geothermal Heat Pump Systems to supply thermal load needed for heating greenhouses. Energy Conversion and Management 97 (2015) 382–392.

[10] Пенджиев А.М. Возможности экономии тепловой энергии в теплицах сельскохозяйственных предприятий. Научный результат. Экономические исследования. – Т.4, №1, 2018, с. 66-78.

[11] Tiwari, G.N., Din, M., Srivastava, N.S.L., Jain, D., Sodha, M.S., “Evaluation of solar fraction (F_n) for north wall of a controlled environment greenhouse: an experimental validation”, Int. J. Energ. Res. Vol. 26, pp. 203–215, 2002.

[12] Çengel Yu.A., Ghajar A.J. “Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications, Fifth Edition”, McGraw-Hill Education, P.1208. 2015

[13] Shcherbakov, M.V., Brebels, A., Shcherbakova, N.L., Tyukov, A.P., Janovsky, T.A., Kamaev, V.A., “A survey of forecast error measures”, World Appl. Sci. J., Vol.24, pp. 171–176, 2013.



- [14] Kobayashi, K., Salam, M.U., “Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components”. *Agron. J.* Vol. 92 (2), pp. 345–352, 2000.
- [15] Kottegoda, N.T., Rosso, R., “Applied statistics for civil and environmental engineers”, Blackwell Publishing Ltd., Oxford, United Kingdom, p. 718. 2008.
- [16] Я.В. Коженко, А.В. Катаев, Т.М. Катаева, Н.В. Лихолетова, Е.Л. Макарова, Л.В. Шаронина; Коллективная монография - Уфа: «ОМЕГА САЙНС», - 108 с. 2016.
- [17] Пенджиёв А.М. “Энергоэффективность энергетических ресурсов и климатическое районирование солнечных теплиц”, *Аэкономика: экономика и сельское хозяйство*, №9 (21), 2017
- [18] Пенжиёв, А.М. Агротехника выращивания дынного дерева (*Carica papaya L.*) в условиях защищенного грунта в Туркменистане. Автореф. дис. д-р сельхоз. наук. Москва, 54 с. 2000.
- [19] Пенджиёв, А.М. “Математическая модель теплотехнических расчетов микроклимата траншейной солнечной теплицы», *Международный журнал «Альтернативная энергетика и экология*. №7. pp. 62-70, 2010.
- [20] Bayatvarkeshi, M., Imteaz, M., Kisi, O. et al. Application of M5 model tree optimized with Excel Solver Platform for water quality parameter estimation. *Environ Sci Pollut Res* 28, 7347–7364 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11047-w>
- [21] Saleh Kaji Esfahani, Ali Karrech, Robert Cameron, Mohamed Elchalakani, Rosangela Tenorio, Fernando Jerez. Optimizing the solar energy capture of residential roof design in the southern hemisphere through Evolutionary Algorithm. *Energy and Built Environment* Volume 2, Issue 4, October 2021, Pages 406-424.
- [22] Akhatov, Z.S., Khalimov, A.S. Numerical calculations of heat engineering parameters of a solar greenhouse dryer. *Appl. Sol. Energy* 51, 107–111 (2015). <https://doi.org/10.3103/S0003701X15020024>
- [23] Avezova, N.R., Avezov, R.R., Samiev, K.A. Halimov A.S. Integration of the Trombe Wall into Rural Residential Buildings in Climatic Conditions of Uzbekistan. *Appl. Sol. Energy* 57, 333–339 (2021). <https://doi.org/10.3103/S0003701X21040022>
- [24] Botirov, B.M., Halimov, A.S., Yuldoshev, I.A. et al. Experimental Verification of a Mathematical Model for the Temperature Mode of a Solar-Fuel Trench-Type Greenhouse. *Appl. Sol. Energy* 57, 510–516 (2021). <https://doi.org/10.3103/S0003701X21060050>
- [25] I.A. Yuldashev, B.M. Botirov, N.S. Kholmirezayev, and Y.M. Qurbanov About the Production of Lemons Grown in an Autonomous Gabled Solar Greenhouse // *Applied Solar Energy*. 2023. -Vol.59, №1. -pp. 44–47.
- [26] Iskandarov, Z.S., Halimov, A.S. Numerical calculation of the useful capacity obtained from regenerating an exhaust drying agent in a solar-fuel drying installation. *Appl. Sol. Energy* 50, 138–142 (2014). <https://doi.org/10.3103/S0003701X14030050>
- [27] Samiev, K.A., Halimov, A.S. Annual Thermal Performance of the Trombe Wall with Phase Change Heat Storage under Climate Conditions of Uzbekistan. *Appl. Sol. Energy* 58, 297–305 (2022). <https://doi.org/10.3103/S0003701X22020189>
- [28] Samiev, K.A., Halimov, A.S. & Fayziev, S.S. Multiobjective Optimization of Integration of the Trombe Wall in Buildings Using a Full Factorial Experiment. *Appl. Sol. Energy* 58, 127–136 (2022). <https://doi.org/10.3103/S0003701X22010169>
- [29] Halimov, A., Nürenberg, M., Müller, D. et al. Multi-Objective Optimization of Complex Measures on Supplying Energy to Rural Residential Buildings in Uzbekistan Using Renewable Energy Sources. *Appl. Sol. Energy* 56, 137–148 (2020). <https://doi.org/10.3103/S0003701X20020073>
- [30] Akhatov, Z.S., Khalimov, A.S., Saidov, K.K. A study of the influence of inlet air flow humidity and temperature on thermal efficiency of an evaporation chamber of a solar desalination plant (2016) *Applied Solar Energy (English translation of Geliotekhnika)*, 52 (2), pp. 109-114.
- [31] Halimov, A., Lauster, M., Müller, D. Development and validation of PCM models integrated into the high-order building model of modelica library - AixLib (2019) *Building Simulation Conference Proceedings*, 7, pp. 4698-4705.
- [32] Yuldoshev, I., Shoyusupov, Sh., Botirov, B., Jamolov, T., Boliev, A. Experimental Verification of the Mathematical Model of the Temperature Regime of a Solar-Fuel Trench Greenhouse (2023) *AIP Conference Proceedings*, 2612, art. no. 050023.
- [33] Kurbonov, Y.M., Saitov, E.B., Botirov, B.M. Analysis of the influence of temperature on the operating mode of a photovoltaic solar station (2020) *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 614 (1), art. no. 012034.