

УДК 631.371:234:628.8

КЕПКО О.И.¹, ВИНОГРАДОВ-САЛТЫКОВ В.А.²

¹Уманский государственный аграрный университет

²Национальный университет пищевых технологий

ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЯ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ И ВЕНТИЛЯЦИИ ТЕПЛИЦ

Наведено результати досліджень теплообмінних та газообмінних процесів в замкнутій системі опалення та вентиляції теплиць.

Представлены результаты исследований теплообменных и газообменных процессов в замкнутой системе отопления и вентиляции теплиц.

The results of studying heat-transfer and gas-exchange processes in a closed system of greenhouse heating and ventilation are presented.

a, b, c – коэффициенты экспоненциальной регрессии;

$$C = \frac{\alpha_c S_c}{m_c c_c};$$

C_1, C_2, C_3 – постоянные решения дифференциального уравнения;

c_c – теплоемкость субстрата;

c_p – массовая теплоемкость воздуха;

C_{II} – начальное значение концентрации CO_2 ;

$C_{нов}$ – концентрация CO_2 в приточном воздухе;

$C_{менл}$ – концентрация CO_2 в приточном воздухе из теплицы;

$$D^{zp} = D_1 + k_{II} + k_{n.инф}^{zp};$$

$$D_1 = \frac{k_{ог}^m S_{ог}^m}{m_{II}^m c_p};$$

$$E = \frac{\alpha_c S_c}{m_{II}^{zp} c_p};$$

$$F_1 = \frac{\alpha_{оп}^m S_{оп}^m}{m_{II}^m c_p};$$

$G_{M.1}$ – воздухообмен между помещениями, ур-е (1);

$G_{M.2}$ – воздухообмен с внешней средой, ур-е (1);

$k_{n.инф}^{zp}$ – коэффициент воздухообмена инфильтрации грибницы;

k_{II}^{zp} – коэффициент воздухообмена между помещениями;

k_{II} – коэффициент воздухообмена между грибницей и внешней средой;

$k_{ог}^m$ – коэффициент теплопередачи через ограждение теплицы;

$k_в$ – кратность воздухообмена вентиляции;

$k_{инф}$ – кратность воздухообмена инфильтрации;

k_c – кратность воздухообмена между теплицами;

k_1, k_2, k_3 – корни характеристического уравнения

$$\text{вида } k^3 + ak^2 + bk + c = 0;$$

$L_{M.1.1}$ – воздухообмен между помещениями;

$L_{M.1.2}$ – воздухообмен с внешней средой, табл. 1;

$L_{инф}$ – воздухообмен инфильтрации, табл. 1;

$L_{CO_2 ep}$ – выделение CO_2 из 1 кг массы субстрата;

m_{II}^m, m_{II}^{zp} – масса воздуха соответственно в теплице и грибнице;

m – масса субстрата в грибнице;

$Q_{от.}$ – мощность системы отопления;

$Q_{m.в}$ – мощность теплопотерь через ограждения и с инфильтрационным воздухом;

$Q_{T.H.}$ – мощность теплоступлений;

$S_{ог}^m$ – площадь поверхности ограждений теплицы;

$S_{оп}^m$ – площадь поверхности отопительных приборов теплицы;

S_c – площадь поверхности субстрата, которая обдувается воздухом;

$t_c^{cm}, t_в^{m.cm}, t_в^{zp.cm}$ – установившееся значение соответственно температуры субстрата, температуры воздуха в теплице и грибнице;

$t_в$ – температура внутреннего воздуха;

t_n – температура наружного воздуха;

$\alpha_{оп}^m$ – коэффициент теплоотдачи от отопительных приборов к воздуху теплицы;

α_c – коэффициент теплоотдачи от субстрата к воздуху;

$$\lambda = D^{zp} + E + F_1 + k_{II}^{zp}$$

τ – время;

ЗСОВ – замкнутая система отопления и вентиляции теплиц;

ТН – тепловой насос.

Одной из проблем сельского хозяйства в Украине является уменьшение энергоемкости производства продукции, особенно при выращивании овощей в закрытом грунте [1]. В работе предложена замкнутая система отопления и вентиляции (ЗСОВ) теплиц, которая позволяет улучшить газовый баланс в помещениях, а также уменьшить расходы энергии на отопление и вентиляцию.

Основу работы составили исследования, выполненные в Уманском государственном аграрном университете в 1999–2005 гг. в соответствии с тематическими планами НИР университета. Работа также связана с общеукраинскими научными программами: государственной научно-технической программой „Энерго– и ресурсосберегающие технологии в сельскохозяйственном производстве”; постановлением Кабинета Министров Украины от 22.06.1994 г. № 429 «О реализации приоритетных направлений развития науки и техники»; научно-технической программой Министерства агропромышленного комплекса Украины от 30.02.1998 г. № 339 «Научно-исследовательские и исследовательско-конструкторские разработки».

Замкнутая система отопления и вентиляции теплиц предлагается впервые [2].

Цель исследований – создание энергосберегающей системы отопления и вентиляции теплиц при выращивании овощных культур и грибов в закрытом грунте.

Постановка задачи

Теоретически и экспериментально изучить тепло- и массообменные характеристики процессов в теплицах во время выращивания овощной и грибной продукции в ЗСОВ. Обосновать и разработать конструкцию замкнутой системы отопления и вентиляции теплиц и разработать технологические основы ее автоматизации. Разработать методику инженерного расчета замкнутой системы отопления и вентиляции теплиц, ее программное обеспечение, провести производственную проверку и определить экономическую эффективность системы.

Основной материал исследований

Основой запатентованной ЗСОВ есть система помещений (рис. 1) которая состоит из трех по-

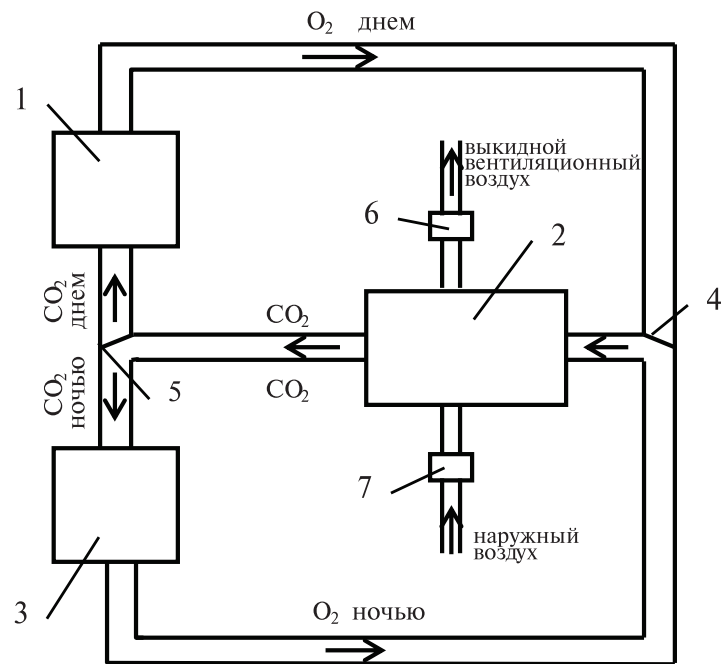


Рис. 1. Функциональная схема замкнутой системы вентиляции

1 – дневная теплица; 2 – грибница; 3 – ночная теплица; 4,5 – заслонки; 6 – испаритель ТН; 7 – конденсатор ТН.

мещений – грибницы, ночной растительной и дневной растительной теплиц [3, 4]. Принцип работы предложенной системы заключается в следующем: в дневной теплице выращиваются растения, а грибы – в грибном помещении. Между помещениями происходит перекачивание воздуха, которое проводится в светлую пору суток. Кроме того, выращивают растения в ночной теплице со светонепроницаемым покрытием в темную пору суток при искусственном освещении, и в темную пору суток перекачивают воздух между этим помещением и грибницей, а перекачивание воздуха между дневной теплицей и грибницей прекращают. При этом перекрывают воздух заслонками 1, которые поворачивают на ночь вверх, как показано на рис. 1. Тем самым прекращается подача воздуха в дневную теплицу и обеспечивается подача в помещение с искусственным освещением.

Предложенная система решает одновременно вопрос экономии тепловой энергии, поскольку теперь нет необходимости выбрасывать теплоту наружу, и при этом происходит газовая взаимоподкормка растений и грибов.

Внедрение ЗСОВ нуждается в исследовании тепломассообменных процессов во всех элементах блока „теплицы – грибница” и энергосберегающих свойств ЗСОВ при условиях соответствия параметров газовой среды, в которой выращиваются овощные растения и грибы. Для этого результаты исследований тепломассообмена нужно исследовать с помощью уравнений тепловых балансов и уравнений, описывающих содержание CO_2 в вентиляционном воздухе. ЗСОП должны быть экономически выгодными, а выбросы в окружающую среду – минимальными.

$$\begin{cases} -Q_{T.H.1} - Q_{om.1} + Q_{m.e.1} - c_p [G_{M.1}(t_{e.2} - t_{e.1}) + G_{M.2}(t_H - t_{e.1})] = 0 \\ -Q_{T.H.2} - Q_{om.2} + Q_{m.e.2} - c_p G_{M.1}(t_{e.1} - t_{e.2}) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Решение системы уравнений приводит к определению температур в грибнице и теплице в зависимости от мощности отопительной системы (рис. 2). Зависимости приводятся для зимнего периода ($t_H = -15^\circ\text{C}$, $G_{M.1} = 0,0346$ кг/с, $G_{M.2} = 0,0194$ кг/с).

Температура субстрата и воздуха являются определяющими факторами, которые влияют на процесс выращивания грибов, одновременно температура воздуха является основным фактором во время выращивания овощных культур в теплице. Для определения функциональной зависимости между температурой субстрата и воздуха в грибнице и теплице во времени предложе-

Математическое моделирование работы такой системы дает возможность оценить эффективность работы отопительно–вентиляционного оборудования и оценить значение технологических параметров микроклимата.

Разработанная статическая математическая модель ЗСОВ представляет собой систему трех уравнений тепловых балансов помещений. Для реальных условий эксплуатации, с учетом того, что часть воздуха должна обновляться, и помещения с ЗСОВ работают попарно, система будет иметь вид:

на математическая модель в виде системы из трех дифференциальных уравнений [5], при аналитическом решении которой получены зависимости:

– для температуры субстрата –

$$t_C = C_1 \exp(k_1 \tau) + C_2 \exp(k_2 \tau) + C_3 \exp(k_3 \tau) + t_C^{cm}; \quad (2)$$

– для температуры воздуха в грибнице –

$$t_e^{gp} = \left(\frac{k_1}{C} + 1 \right) C_1 \exp(k_1 \tau) + \left(\frac{k_2}{C} + 1 \right) C_2 \exp(k_2 \tau) + \left(\frac{k_3}{C} + 1 \right) C_3 \exp(k_3 \tau) + t_e^{gp,cm}; \quad (3)$$

– для температуры воздуха в теплице –

$$t_e^m = \left(\frac{k_1^2}{Ck_{II}^{gp}} + \frac{C + \lambda}{Ck_{II}^{gp}} k_1 - \frac{E - \lambda}{k_{II}^{gp}} \right) C_1 \exp(k_1 \tau) + \left(\frac{k_2^2}{Ck_{II}^{gp}} + \frac{C + \lambda}{Ck_{II}^{gp}} k_2 - \frac{E - \lambda}{k_{II}^{gp}} \right) C_2 \exp(k_2 \tau) + \left(\frac{k_3^2}{Ck_{II}^{gp}} + \frac{C + \lambda}{Ck_{II}^{gp}} k_3 - \frac{E - \lambda}{k_{II}^{gp}} \right) C_3 \exp(k_3 \tau) + t_e^{m,cm}. \quad (4)$$

На рис. 3 приведены экспериментальные данные и кривые, построенные по зависимостям (2), (3), (4), рассчитанным для параметров, при которых проводился эксперимент.

Концентрация CO_2 является одним из главных факторов, влияющих на процесс выращивания грибов и овощных культур в теплицах. Функциональная зависимость между концентрацией углекислого газа и временем в системе „теплица –

грибница” определяется дифференциальным уравнением [6], при аналитическом решении которого получены варианты зависимостей для различных режимов работы ЗСОВ. Различные режимы работы ЗСОВ обусловлены тем, что в реальных условиях эксплуатации воздухообмена в помещениях разные. Кроме того, при циркуляции воздуха в замкнутом контуре вентиляции в нем накапливаются вредные примеси. Поэтому

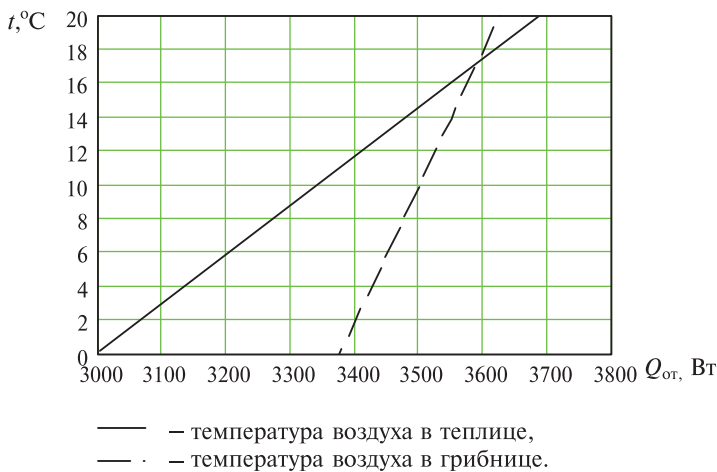


Рис. 2. Зависимость температуры воздуха в грибнице и теплице в зависимости от мощности отопительной системы.

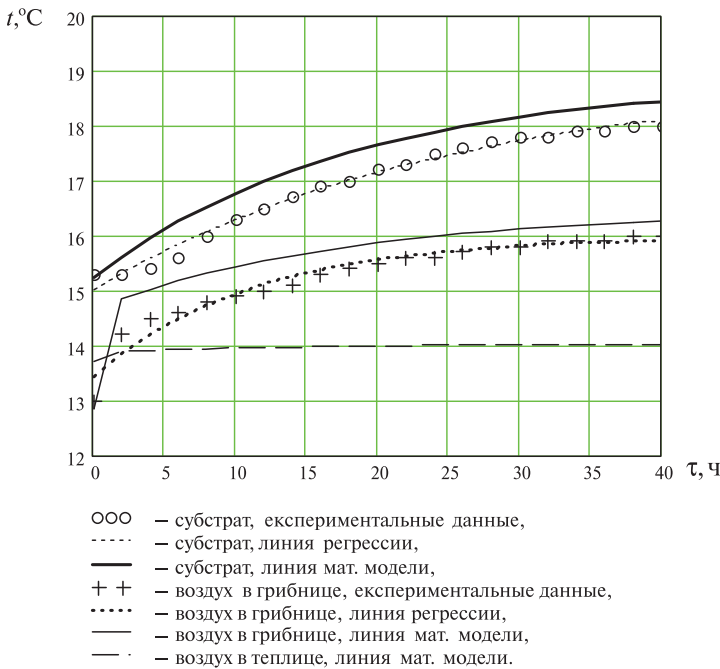


Рис. 3. Динамика изменения температуры субстрата и внутреннего воздуха в грибнице при изменении температуры воды в отопительной системе от 50 до 60 °С.

моделировалось четыре варианта динамики концентрации CO_2 в зависимости от режима работы вентиляционных систем. Первые два варианта касались режима при наличии воздухообмена с внешней средой и замкнутой и разомкнутой ЗСОВ, два других варианта – при отсутствии воздухообмена с внешней средой и замкнутой и разомкнутой ЗСОВ. Уравнение динамики концент-

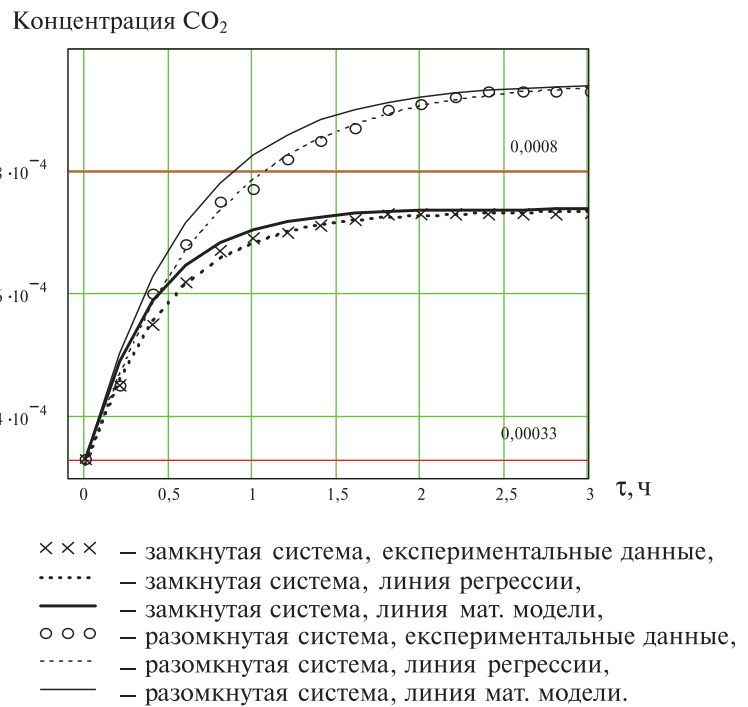


Рис. 4. Экспериментальные и расчетные характеристики концентрации CO_2 при наличии воздухообмена с внешней средой.

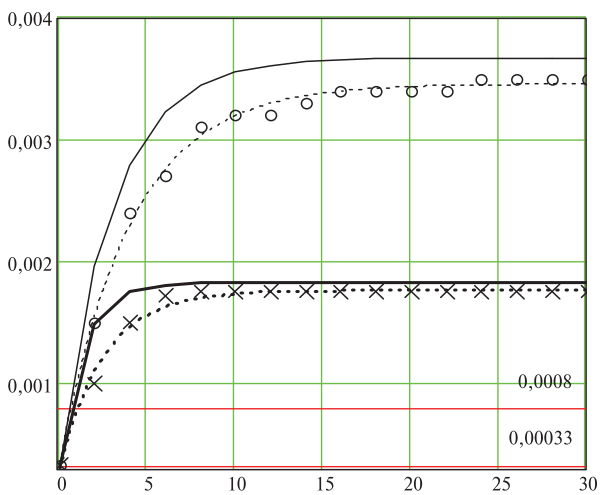
рации CO_2 приведены в табл. 1. Результаты моделирования при массе субстрата в экспериментальной грибнице 2100 кг, полезной площади теплицы 36 m^2 и параметрах, при которых проводился эксперимент, приведены на рис. 4, 5.

Целью экспериментальных исследований является проверка и уточнение полученных для замкнутой системы вентиляции аналитических зависимостей между концентрацией CO_2 , температурой воздуха и субстрата и энергетическими и технологическими параметрами системы, а также определение энергетических показателей системы для разработки методики расчета ЗСОВ теплиц.

Экспериментальные исследования предусматривали: определение статических характеристик объекта для расчета теплового баланса системы; исследование динамики изменения концентрации CO_2 в ЗСОВ; исследование динамики изменения температуры воздуха и субстрата в ЗСОВ; определение расходов энергии в системе сооружений закрытого грунта при работе вентиляции в замкнутом и разомкнутом режимах; проверка работы ЗСОВ в производственных условиях.

Табл. 1. Уравнение динамики концентрации CO₂ в зависимости от режима работы вентиляции

Режим работы ЗСОВ	При наличии воздухообмена с внешней средой	При отсутствии воздухообмена с внешней средой
ЗСВ замкнутая	$C = \frac{C_{нов} (L_{инф} + L_{M1.2} m) + m(C_{менл} L_{M1.1} + L_{CO_2, зр})}{L_{инф} + L_{M1.1} m + L_{M1.2} m} +$ $+ \frac{C_{нов} L_{M1.1} m - m(C_{менл} L_{M1.1} + L_{CO_2, зр})}{L_{инф} + L_{M1.1} m + L_{M1.2} m} \times$ $\times \exp(-(k_{инф} + k_с + k_с) \tau)$	$C = \frac{L_{CO_2, зр} m + C_{нов} L_{инф} + C_{менл} L_{M1.1} m}{L_{инф} + L_{M1.1} m} +$ $+ C_{II} \frac{L_{CO_2, зр} m + C_{нов} L_{инф} + C_{менл} L_{M1.1} m}{L_{инф} + L_{M1.1} m} \times$ $\times \exp(-(k_{инф} + k_с) \tau)$
ЗСВ разомкнутая	$C = C_{нов} + \frac{L_{CO_2, зр} m}{L_{инф} + L_{M1.2} m} \times (1 - \exp(-(k_{инф} + k_с) \tau))$	$C = C_{нов} + \frac{L_{CO_2, зр} m}{L_{инф}} \times (1 - \exp(-k_{инф} \tau))$



- ××× – замкнутая система, экспериментальные данные,
- – замкнутая система, линия регрессии,
- — — — — замкнутая система, линия мат. модели,
- – разомкнутая система, экспериментальные данные,
- – разомкнутая система, линия регрессии,
- — — — — разомкнутая система, линия мат. модели.

Рис.5. Экспериментальные и расчетные характеристики концентрации CO₂ при отсутствии воздухообмена с внешней средой.

Методика экспериментальных исследований предусматривала проведение работ в условиях опытной теплицы кафедры садово-паркового хозяйства УГАУ. Экспериментальные данные показаны на рис. 4, 5.

Аппроксимация опытных данных произведена с помощью экспоненциальной регрессии:

$$f(x) = ae^{bx} + c, \tag{5}$$

коэффициенты экспоненциальной регрессии приведены в табл. 2.

Производственная проверка работоспособности системы по выращиванию грибов (вешенка обычная штамм НК 35) была проведена в ООО „Славута” Белоцерковского района Киевской области. Экономическая эффективность работы ЗСОВ определялась по грибному помещению следующим образом: одни сутки система вентиляция работала в замкнутом режиме, а следующие – в разомкнутом режиме, на третьи сутки – опять в замкнутом режиме и так далее. Данные по замкнутой и разомкнутой системе были статистически обработаны и сгруппированы по температурам внешнего воздуха. Экономия тепловой энергии за период проверки (30 дней) составляла 1980 кВт·ч, что позволило уменьшить расходы на отопление и вентиляцию на 10,7%.

Выводы

1. Аналитически получены и экспериментально подтверждены характеристики тепломассообменных процессов во время отопления и вентиляции растительных теплиц и грибной теплицы в ЗСОВ – статические в виде балансов теплоты и содержания CO₂, а также динамические в виде разгонных кривых по температуре и содержанию CO₂; для замкнутой системы отопления и вентиляции теплиц получены регрессионные уравнения нестационарных режимов по каналам температуры и концентрации CO₂; для замкнутой системы отопления и вентиляции теплиц

Табл. 2. Коэффициенты экспоненциальной регрессии в (5)

Параметр		Коэффициенты регрессии		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Температура внутреннего воздуха		-2,55	-0,089	15,99
Температура субстрата		-3,87	-0,041	18,89
Концентрация CO ₂ при наличии воздухообмена с внешней средой	разомкнутая система	-0,000623	-1,36	0,000947
	замкнутая система	-0,000412	-2,1	0,000734
Концентрация CO ₂ при отсутствии воздухообмена с внешней средой	разомкнутая система	-0,00313	-0,249	0,00346
	замкнутая система	-0,000889	-0,462	0,00121

предложены технологические основы автоматизации тепломассообменных процессов.

2. ЗСОВ позволяет уменьшить расходы тепловой энергии на 10...12% по сравнению с разомкнутой системой. Удовлетворительное совпадение результатов аналитического и экспериментального исследования тепло- и массообмена между воздухом и субстратом является основанием для продолжения и обобщения этих исследований.

3. Разработанные технологические основы автоматизации теплотехнических и газообменных процессов замкнутой системы отопления и вентиляции теплиц являются основанием для создания соответствующей АСУТП.

4. Разработанная методика инженерного расчета замкнутой системы отопления и вентиляции теплиц позволяет использовать ее при реконструкции существующих и проектировании новых тепличных комплексов в агропромышленном комплексе.

5. Работу следует продолжить в масштабах агропромышленного комплекса Украины и других государств.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гірченко М.Т., Жоров В.І., Шаповалов Л.В., Кепко О.І.* Энергозбереження в приміщеннях закритого ґрунту для вирощування овочевої та вітамінної продукції. // Тези доповідей науково-технічної конференції „Енергозберігаючі технології та технічні засоби для виробництва сільськогосподарської продукції”. – Глеваха. ІМЕСГ УААН, – 1993. – С.87–89.

2. *Патент № 57956 А Україна, МКВ А01G9/24.* Спосіб вентиляції споруд закритого ґрунту / *Гірченко М.Т., Голуб Г.А., Жоров В.І., Вдовенко С.А., Кепко О.І., Шаповалов Л.В.* (Україна), – №2002021688; Опубл. 15.07.2003. Бюл. № 7.

3. *Кепко О.І.* Моделювання енергозберігаючих режимів роботи опалювально-вентиляційного обладнання в спорудах закритого ґрунту при вирощуванні білкової продукції. // *Механізація та електрифікація сільського господарства.* – Вип.83. – Глеваха. ННЦ ІМЕСГ, 2000. – С. 199–202.

4. *Кепко О.І.* Математична модель опалювально-вентиляційної системи замкнутого повітрообміну між окремими приміщеннями в закритому ґрунті // *Збірник наукових праць Національного аграрного університету.* Том XV. – К., 2003. – С. 413–419.

5. *Голуб Г.А., Кепко О.І.* Динамічні характеристики грибного приміщення в замкнутій системі вентиляції // *Електрифікація та автоматизація сільського господарства.* – № 4(9). – 2004. – С. 51–57.

6. *Кепко О.І.* Динаміка зміни концентрації CO₂ в системі споруд „рослинна теплиця – грибниця” // *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції Агромех–2004, 22–24 вересня 2004 р.* – Львів: Львівський державний аграрний університет, 2004. – С. 97–103.

Получено 12.10.2007 г.