

АГРОИНЖЕНЕРИЯ
4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

Научная статья
УДК 631.311.86
doi: 10.28983/asj.y2024i12pp175-179

**Математическая модель оценки эффективности технологического процесса
приготовления и использования парниково-тепличного грунта**

**Павел Иванович Павлов¹, Николай Алексеевич Ченцов¹,
Александр Олегович Везилов^{1,2}, Иван Леонидович Дзюбан¹**

¹Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова,
г. Саратов, Россия

²Всероссийский институт научной и технической информации Российской академии наук, г. Москва, Россия
e-mail: vezirov2008@mail.ru

Аннотация. Грунтовая технология выращивания растений в тепличном овощеводстве предполагает использование парниково-тепличных грунтов. Для их приготовления применяют машины и оборудование различных конструкций. В статье предложена новая технология и машины для приготовления теплично-парникового грунта. Показано сравнение характеристик существующей и предлагаемой технологий. На основе методов математического моделирования провели исследования, по результатам которых установлен характер зависимости общей эффективности внедрения технологии от показателей технологических машин, входящих в ее состав. Выявили математическую модель эффективности внедрения технологии, учитывающую параметры агротехнологических показателей грунта, а также показатели производительности, энергоёмкости и конструктивной материалоемкости каждой машины. Установили влияние каждого показателя на общую эффективность технологии, обусловленную поправочными коэффициентами. Разработали показатель оценки эффективности внедрения новой технологии в сравнении с существующей. Результаты исследований могут быть использованы для оценки новых машин и оборудования, а также технологий в целом для различных условий сельскохозяйственного производства при работе с органическими удобрениями и различными видами парниково-тепличных грунтов.

Ключевые слова: защищенный грунт; технологический процесс; оценка эффективности; энергоёмкость; материалоемкость; производительность; коэффициент смешивания

Для цитирования: Павлов П. И., Ченцов Н. А., Везилов А. О., Дзюбан И. Л. Математическая модель оценки эффективности технологического процесса приготовления и использования парниково-тепличного грунта // Аграрный научный журнал. 2024. № 12. С. 175–179. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i12pp175-179>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

**Mathematical model for assessing the efficiency of the technological process
of greenhouse soil preparation and use**

Pavel I. Pavlov¹, Nikolay A. Chentsov¹, Aleksandr O. Vezirov^{1,2}, Ivan L. Dzyuban¹

¹ Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov, Saratov, Russia

²Russian Institute for Scientific and Technical Information, Moscow, Russia

e-mail: vezirov2008@mail.ru

Abstract. Soil-based technology in greenhouse vegetable production involves the use of greenhouse soil. Various machines and equipment designs are employed for its preparation. This article proposes a new technology and machinery for preparing greenhouse soil. A comparison of the characteristics of the new technology with the existing soil preparation methods is presented. Analytical studies are conducted on the impact of a set of technological machine indicators on the efficiency of the technology, utilizing mathematical analysis methods. A mathematical model for assessing the efficiency of the technology implementation is developed, which takes into account agritechnological soil parameters, as well as the performance, energy consumption, and material intensity of each machine in the





technological scheme. The influence of each indicator on the overall efficiency of the technology, determined by correction coefficients, is established. A metric for evaluating the efficiency of implementing the new technology compared to the existing one is developed. The research results can be used to assess new machines and equipment, as well as technologies in general, for various agricultural production conditions involving organic fertilizers and different types of greenhouse soil.

Keywords: greenhouse; technological process; efficiency assessment; energy consumption; material consumption; productivity; mixing coefficient

For citation: Pavlov P. I., Chentsov N. A., Vezirov A. O., Dzyuban I. L. Mathematical model for assessing the efficiency of the technological process of greenhouse soil preparation and use. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2024;(12):175–179. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i12pp175-179>.

Введение. Организация производства овощей в защищенном грунте предполагает использование парниково-тепличных грунтов, состоящих из органических и минеральных компонентов [5, 6, 8]. Процесс приготовления грунтов состоит из нескольких последовательно выполняемых операций, основные из которых: послойная укладка компонентов на площадке с твердым покрытием, смешивание и погрузка в транспортное средство, укладка грунта в теплице и полная (частичная) замена грунта [3].

Выполнение данных операций обеспечивается различными машинами как общего назначения (погрузчики, бульдозеры, разбрасыватели удобрений), так и специального. Каждое тепличное предприятие самостоятельно подбирает линейку технических средств для приготовления парниково-тепличных грунтов в зависимости от наличия машин и экономических возможностей. В связи с этим возникает потребность в определении технологической эффективности использования конкретной машины в совокупности с другими техническими средствами в общем технологическом процессе. Кроме этого, разработка инновационных машин и технологий для работы с грунтом требует системного подхода и разработки математической модели для оценки эффективности их внедрения и использования в сравнении с существующими аналогами.

В Вавиловском университете предложена технологическая схема приготовления грунта с использованием машин новых конструкций, оснащенных приспособленными к условиям тепличного производства специальными рабочими органами [7]. Для операции по послойной укладке компонентов грунта предлагается использовать комбинированный укладчик [1], для смешивания компонентов – погрузчик-смеситель [2], для удаления слоя грунта – почвоудаляющую машину [1]. Предлагаемые машины объединены в общую технологическую схему с последовательно выполняемыми операциями. Сравнение операций, выполняемых по существующей и предлагаемой технологии, представлено на рисунке 1.

Использование комбинированного укладчика позволяет отказаться от применения трех машин (бульдозера, разбрасывателей минеральных и органических удобрений), тем самым снижая металлоемкость и энергоемкость операций и одновременно повышая производительность. За счет отсутствия прохода машины по уже уложенному слою компонента грунта (как это происходит по существующей технологии) снижается уплотнение грунта, что качественно влияет на агротехнические показатели: воздухоемкость и влагоемкость. Особая конструкция шнекофрезерного питателя погрузчика-смесителя позволяет добиться требуемого качества смешивания за один проход машины, что экономит ГСМ и повышает производительность труда. Почвоудаляющая машина, оснащенная ковшем специальной геометрической формы и малыми размерами (для работы внутри помещения теплицы), с наименьшими потерями удаляет грунт и одновременно осуществляет его погрузку в транспортное средство для последующего вывоза за пределы тепличного сооружения.

Для качественной оценки внедряемых машин, выполняющих операции в рамках единой технологической схемы (технологии), необходимо разработать способ, позволяющий проводить количественную оценку новой технологии (оценить эффект от ее применения) и объединяющий наиболее важные критерии эффективности каждой машины, включенной в технологическую схему.

Цель исследования – разработка математической модели оценки технологии приготовления (использования) парниково-тепличного грунта с учетом критериев эффективности машин, выполняющих операции в рамках представленной технологической схемы: производительности, энергоемкости, конструктивной материалоемкости, агротехнических показателей, демонстрация возможности использования данной модели для качественной оценки внедрения новой технологии и ее сравнения с существующей согласно условиям производства.

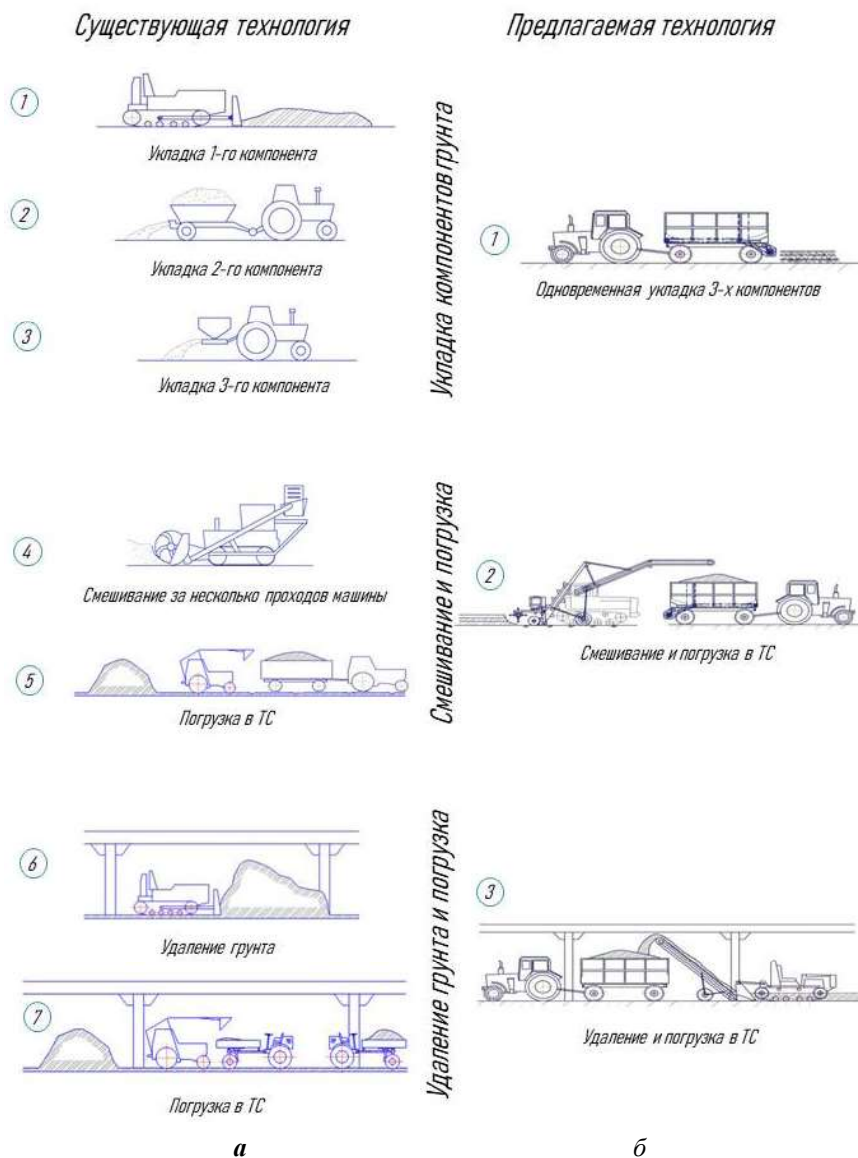


Рисунок 1 – Порядок выполнения операций в технологической схеме:
а) по существующей технологии, б) по предлагаемой технологии

Figure 1 – The procedure for performing operations in the flow chart:
a) according to the existing technology, b) according to the proposed technology

Материалы и методы. Для построения модели используем методы математического моделирования [4]. В общем случае подход к оценке эффективности технологии приготовления грунта может быть представлен в виде зависимости затрачиваемых ресурсов на приготовление грунта при требуемом значении агротехнических показателей. Чем меньше затрачиваемых ресурсов, тем технология становится более ресурсосберегающей и более эффективной. Эффективность технологии будет зависеть от множества показателей машин, выполняющих операции, основными из которых являются производительность, энергоёмкость, конструктивная металлоёмкость и агротехнические показатели. К основным агротехническим показателям готового тепличного грунта можно отнести воздухоёмкость, влагоёмкость и качество смешивания компонентов. Эти показатели напрямую влияют на морфологию растений, но в тоже время зависят от геометрических параметров и режимов работы рабочих органов машин [3]. Для упрощения задачи заменим вышеперечисленные агротехнологические показатели одним интегральным показателем – качество тепличного грунта, *K*.

Влияние изменений данных показателей будет носить различный характер. Например, с повышением качества готового грунта (при постоянных значениях остальных показателей) очевидно, что эффективность технологии возрастает. Аналогичным будет характер влияния показателя производительности на эффективность. Обратная картина наблюдается, когда с уменьшением значения конструктивной металлоёмкости эффективность технологии будет возрастать при постоянных значениях других показателей.



Учитывая данные обстоятельства, модель эффективности внедрения технологии может быть представлена в следующем виде:

$$\text{ЭТ} = \Delta Q^\uparrow (1/\Delta E_\downarrow)(1/\Delta M_\downarrow)\Delta K^\uparrow, \quad (1)$$

где ЭТ – показатель эффективности внедрения технологии; ΔQ^\uparrow – суммарный показатель значений производительности; ΔE_\downarrow – суммарный показатель значений энергоемкости; ΔM_\downarrow – суммарный показатель значений конструктивной материалоемкости; ΔK^\uparrow – суммарный показатель качества готового грунта.

Очевидно, что чем выше эффективность каждой машины, входящей в технологическую схему, и выше значение показателя качества готового грунта, тем выше эффективность технологии в целом:

$$\text{ЭТ} = Q \frac{1}{\sum_{n=1}^N (E_n)} \cdot \frac{1}{\sum_{n=1}^N (M_n)} \cdot K, \quad (2)$$

где Q – общая производительность технологии (технологической линии); E_n – энергоемкость операции, выполняемой n -й машиной; M_n – конструктивная материалоемкость n -й машины; K – качество готового грунта; N – количество машин, выполняющих операции.

Вклад в общую эффективность технологии каждого показателя будет различен. Для учета данного обстоятельства введем в выражение (2) поправочные коэффициенты значимости для каждого из показателей:

$$\text{ЭТ} = K_Q Q \frac{K_E}{\sum_{n=1}^N (E_n)} \cdot \frac{K_M}{\sum_{n=1}^N (M_n)} \cdot K_K K, \quad (3)$$

где K_Q , K_E , K_M , K_K – коэффициенты значимости производительности, энергоемкости, конструктивной материалоемкости, качества готового грунта.

Из анализа уравнения (3) следует, что повышение эффективности технологии может быть достигнуто за счет следующих действий. Объединение нескольких технологических процессов в одном рабочем цикле позволяет уменьшить количество используемых машин, что снижает энергоемкость и материалоемкость. Использование новых конструкторских решений способствует снижению материалоемкости и повышению долговечности, а улучшение параметров обработки и подготовки грунта позволяет получить продукт более высокого качества.

Результаты исследований. Для количественной оценки предлагаемой технологии в сравнении с существующей ЭТ_{comp} можно использовать отношение показателей эффективности внедрения предлагаемой ЭТ_{new} и существующей ЭТ_{exist} технологий. С учетом выражения (3) отношение примет следующий вид:

$$\text{ЭТ}_{comp} = \frac{\text{ЭТ}_{new}}{\text{ЭТ}_{exist}} = \frac{K_Q Q_{new} \frac{K_E}{\sum_{n=1}^N E_{new}} \cdot \frac{K_M}{\sum_{n=1}^N M_{new}} \cdot K_K K_{new}}{K_Q Q_{exist} \frac{K_E}{\sum_{n=1}^N E_{exist}} \cdot \frac{K_M}{\sum_{n=1}^N M_{exist}} \cdot K_K K_{exist}}, \quad (4)$$

где Q_{new} , E_{new} , M_{new} , K_{new} – фактические значения производительности, энергоемкости, конструктивной материалоемкости, показателя качества грунта предлагаемой технологии; Q_{exist} , E_{exist} , M_{exist} , K_{exist} – фактические значения производительности, энергоемкости, конструктивной материалоемкости, показателя качества грунта существующей технологии.

Используя модель (4) для оценки предлагаемой и существующей технологий, представленной на рисунке 1, получим выражение

$$\text{ЭТ}_{comp} = \frac{K_Q Q_1 \frac{K_E}{E_{11} + E_{12} + E_{13}} \cdot \frac{K_M}{M_{11} + M_{12} + M_{13}} \cdot K_K K_1}{K_Q Q_2 \frac{K_E}{(E_{21} + E_{22} + E_{23}) + (E_{24} + E_{25}) + (E_{26} + E_{27})} \cdot \frac{K_M}{(M_{21} + M_{22} + M_{23}) + (M_{24} + M_{25}) + (M_{26} + M_{27})} \cdot K_K K_2}, \quad (5)$$

где Q_1 , Q_2 – производительность предлагаемой и существующей технологий; E_{11} , E_{12} , E_{13} – энергоемкость соответствующих операций, выполняемых каждой машиной по предлагаемой техно-



логии; $E_{21}, E_{22}, E_{23}, E_{24}, E_{25}, E_{26}, E_{27}$ – энергоёмкость соответствующих операций по существующей технологии; M_{11}, M_{12}, M_{13} – материалоемкость машин по предлагаемой технологии; $M_{21}, M_{22}, M_{23}, M_{24}, M_{25}, M_{26}, M_{27}$ – материалоемкость машин по существующей технологии; K_1, K_2 – показатель качества грунта, приготовленного по предлагаемой и существующей технологиям.

Использование выражения (5) позволяет определить эффективность внедрения предлагаемой технологии в сравнении с существующей, но для более точной количественной оценки необходимо провести дополнительные механико-математическое исследование в части обоснования величин коэффициентов значимости.

Заключение. Разработан показатель оценки эффективности внедрения технологии приготовления парниково-тепличного грунта, а также представлена математическая модель для сравнительной оценки эффективности внедрения существующей и предлагаемой технологий, учитывающая производительность, энергоёмкость, конструктивную металлоёмкость и показатель качества готового грунта.

Математическая модель (3) отражает системный подход к проблеме оценки эффективности внедрения новых технологий приготовления парниково-тепличного грунта и позволяет оценить технологию по нескольким основным показателям, что может быть подтверждено соответствующими расчетами по выражению (5).

Дальнейшая разработка предложенной математической модели должна быть направлена на детализацию входящих в нее параметров. В частности, необходимо разработать методику обоснования величины коэффициентов значимости для различных условий.

Для повышения эффективности технологии необходимо продолжить исследование взаимодействия факторов, влияющих на технологический процесс, и оптимизировать параметры машин и оборудования, используемых в производстве парниково-тепличного грунта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комбинированный укладчик почвенных компонентов: патент № 211840 Российская Федерация, МПК А01С 3/00 А01В 49/06 / П. И. Павлов, А.О. Везиров; заявл. 27.09.2021; опубл. 24.06.2022.
2. Погрузчик-смеситель органоминерального компоста: патент № 119337 Российская Федерация, МПК В 65 G 65/22 / А. О. Везиров, И. Л. Дзюбан, П. И. Павлов; заявл. 11.04.2012; опубл. 20.08.2012.
3. РД-АПК 1.10.09.01-14. Методические рекомендации по технологическому проектированию теплиц и тепличных комбинатов для выращивания овощей и рассады. М.: Росинформагротех, 2014. 109 с.
4. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование. М.: Наука. Физматлит, 1997. 320 с.
5. Hupenyu A. M., Mnkeni P. N. S. Optimizing the vermicomposting of organic wastes amended with inorganic materials for production of nutrient-rich organic fertilizers: a review // *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. No. 25(11). P. 10577–10595.
6. Liang Y., Lin X., Yamada S. Soil degradation and prevention in greenhouse production // *Springer Plus*. 2013. No. 2. P. 1–10.
7. Mechanization of soil preparation for greenhouses / P. I. Pavlov et al. // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018. No. 9(3). P. 1023–1030.
8. Tuzel Y., Leonardi C. Protected cultivation in Mediterranean region: Trends and needs // *Journal of Agriculture Faculty of Ege University*. 2010. No. 46(3). P. 215–223.

REFERENCES

1. Combined laying machine for soil components: patent No. 211840 Russian Federation, IPC A01C 3/00 A01B 49/06 / P. I. Pavlov, A. O. Vezirov; appl. 09/27/2021; publ. 06/24/2022. (In Russ.).
2. Loader-mixer of organomineral compost: patent No. 119337 Russian Federation, IPC B 65 G 65/22 / A. O. Vezirov, I. L. Dzyuban, P. I. Pavlov; appl. 04/11/2012; publ. 08/20/2012. (In Russ.).
3. RD-APK 1.10.09.01-14. Methodological recommendations for technological design of greenhouses and greenhouse complexes for growing vegetables and seedlings. Moscow: Rosinformagrotech; 2014. 109 p. (In Russ.).
4. Samarsky A. A., Mikhailov A. P. *Mathematical Modeling*. Moscow, 1997. 320 p. (In Russ.).
5. Hupenyu A. M., Mnkeni P. N. S. Optimizing the vermicomposting of organic wastes amended with inorganic materials for production of nutrient-rich organic fertilizers: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25(11):10577–10595.
6. Liang Y., Lin X., Yamada S. Soil degradation and prevention in greenhouse production. *Springer Plus*. 2013;(2):1–10.
7. Mechanization of soil preparation for greenhouses / P. I. Pavlov, E. E. Demin, R. R. Khakimzyanov, G. V. Levchenko, A. O. Vezirov. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018;9(3):1023–1030.
8. Tuzel Y., Leonardi C. Protected cultivation in Mediterranean region: Trends and needs. *Journal of Agriculture Faculty of Ege University*. 2010;46(3):215–223.

Статья поступила в редакцию 15.03.2024; одобрена после рецензирования 16.04.2024; принята к публикации 22.04.2024.
The article was submitted 15.03.2024; approved after reviewing 16.04.2024; accepted for publication 22.04.2024.

