

АГРОИНЖЕНЕРИЯ
4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

Научная статья
УДК 635.89
doi: 10.28983/asj.y2024i10pp131-137

**Теоретическое исследование процесса формирования блоков грибного субстрата
в поршневом прессе**

Павел Иванович Павлов, Дмитрий Андреевич Смотряков, Иван Леонидович Дзюбан
Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова
e-mail: pavlovsgau@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрено взаимодействие поршневого пресса с субстратом при формировании блоков для выращивания грибов. Существующие конструкции поршневых прессов имеют прямоугольный канал, что обуславливает характер процесса прессования и действующие на материал силы. Блок может формироваться с непостоянной плотностью по сечению. Для выравнивания плотности в предлагаемом прессе канал прессования выполнен в виде конуса. Проведенный силовой анализ позволил установить аналитические выражения для определения усилий на поршне. Для работы в канале переменного сечения поршень выполнен в виде двух подвижных соприкасающихся рабочих пластин с возможностью перемещения относительно друг друга.

Ключевые слова: грибной субстрат; поршень; рабочие пластины; сила тяжести; сила трения

Для цитирования: Павлов П. И., Смотряков Д. А., Дзюбан И. Л. Теоретическое исследование процесса формирования блоков грибного субстрата в поршневом прессе // Аграрный научный журнал. 2024. № 10. С. 131–137. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i10pp131-137>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

**Theoretical study of the formation process
of mushroom substrate blocks in a piston press**

Pavel I. Pavlov, Dmitri A. Smotryakov, Ivan L. Dzyuban
Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov, Saratov, Russia
e-mail: pavlovsgau@yandex.ru

Abstract. The article discusses the interaction of a piston press with a substrate when forming blocks for growing mushrooms. Existing piston press designs have a rectangular channel, which determines the nature of the pressing process and the forces acting on the material. A block can be formed with a non-constant density across the cross-section. To equalize the density in the proposed press, the pressing channel is made in the form of a cone. The conducted force analysis made it possible to establish analytical expressions for determining the forces on the piston. To work in a channel of variable cross-section, the piston is made in the form of two movable contacting working plates with the ability to move relative to each other.

Keywords: mushroom substrate; piston; working plates; gravity; friction force

For citation: Pavlov P. I., Lykova A. S., Prokhorova Yu. A. Theoretical study of the formation process of mushroom substrate blocks in a piston press. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2024;(10): 131–137. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i10pp131-137>.

Введение. Формирование субстратного блока является одной из наиболее важных операций при выращивании грибов. Субстратный блок должен иметь определенную плотность, равномерно распределенную по сечению и по длине блока. В этом случае обеспечиваются



наиболее благоприятные условия для развития грибов. Широкое распространение получили конструкции прессов для формирования субстратных блоков с использованием гидроцилиндров с поршнем [4]. Субстрат сжимается в прямоугольном канале и подается в полиэтиленовый пакет. Основным недостатком является возможная неравномерная плотность по сечению и длине формируемого блока, что снижает урожайность грибов. Для определения направлений совершенствования конструкций проведен теоретический анализ процесса работы поршневого пресса.

Материалы и методы. Формирование блока субстрата происходит под воздействием комплекса сил, возникающих в процессе прессования. Движущей силой является сила давления поршня пресса на субстрат, остальные силы образуют сопротивление движению. За счет взаимодействия этого комплекса сил происходит сжатие субстрата и формирование блока.

В существующих поршневых прессах блок субстрата формируется в прямоугольном канале. Процесс взаимодействия включает контакт и взаимодействие поршня с поступившей массой субстрата, далее происходит разгон массы до скорости движения поршня и движение по прямоугольному каналу (рисунок 1). Субстрат, на который воздействует поршень силой F_{Π} , оказывается в ограниченном стенками корпуса объеме. После разгона он движется по каналу со скоростью v .

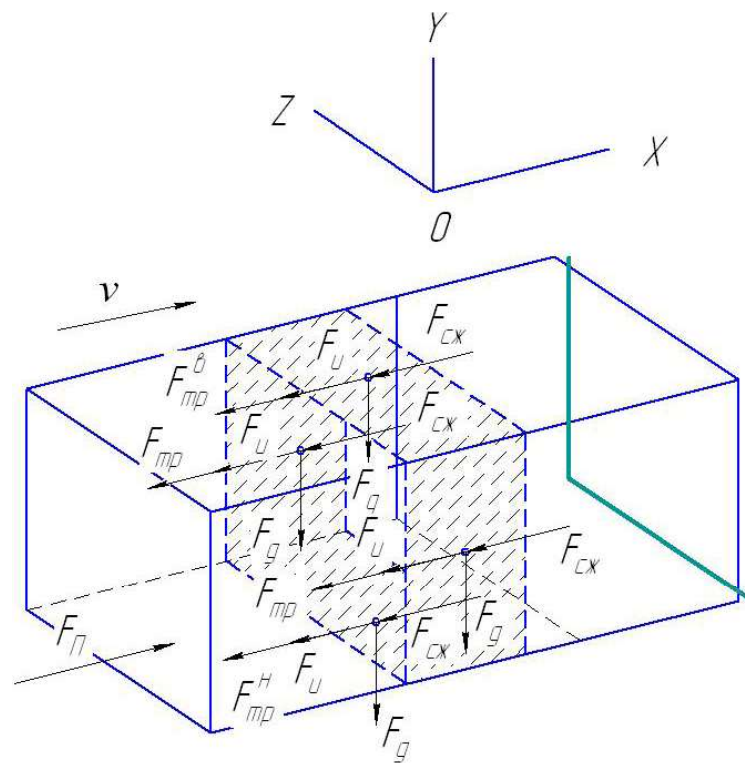


Рисунок 1 – Схема сил при движении субстрата в первом положении
Figure 1 – Layout of forces during the substrate movement in the first position

На элементарный объем воздействуют: сила тяжести F_g , направленная вертикально вниз; сила трения $F_{\text{тр}}$, направленная в сторону, противоположную движению поршня и субстрата; сила инерции $F_{\text{и}}$, также направленная в сторону, противоположную движению; сила предварительного сжатия $F_{\text{сж}}$, также создающая сопротивление движению поршня и поэтому направленная в сторону, противоположную движению поршня и субстрата. При этом сила трения на двух боковых стенках канала, верхней и нижней стенках будут иметь разное значение, поскольку нормальное давление имеет разное значение.

Составим уравнения сил по осям, используя принцип Даламбера. Для этого выделим элементарный объем на каждой стенке канала пресса (рисунок 1). На боковых стенках сумма проекций сил на ось OX составит:

$$\Sigma F_x^{\delta} = F_{\Pi} - F_{\text{тр}} - F_{\text{и}} - F_{\text{сж}} = 0. \quad (1)$$



Определим составляющие сил в уравнении (1). Сила трения на боковых стенках составит:

$$F_{\text{тр}} = fpA_{\text{б}}, \quad (2)$$

где f – коэффициент трения субстрата о поверхность корпуса; p – нормальное давление на поверхность боковой стенки, связанное с условным «распирианием» субстрата в канале при давлении поршня, Па; $A_{\text{б}}$ – площадь контакта субстрата с боковой стенкой, м².

Сила инерции, возникающая при разгоне субстрата до скорости движения поршня v , определяется по формуле

$$F_{\text{и}} = \frac{v}{t}m, \quad (3)$$

где v – скорость поршня, t – время разгона, m – масса субстрата. При этом начальная скорость равна нулю.

Сила предварительного сжатия $F_{\text{сж}}$ связана с тем, что сила давления поршня с одной стороны и сила трения с другой стороны приводят к уплотнению субстрата. При этом происходит деформация сжатия частиц, на что требуется усилие поршня. Данная деформация определяется прочностными и упругими свойствами частиц субстрата. Очевидно, что предельное сжатие не может быть больше силы трения, т.к. уплотнение ограничено скольжением субстрата по стенкам канала. Соотношение между силой трения субстрата о поверхность канала и силой сжатия субстрата рассчитывается с помощью коэффициента сжатия $k_{\text{сж}}$:

$$F_{\text{сж}} = k_{\text{сж}}fpA_{\text{б}}. \quad (4)$$

Тогда сумма проекций сил на ось OX на боковых стенках примет вид:

$$\Sigma F_x^{\text{б}} = F_{\text{п}} - fpA_{\text{б}} - \frac{v}{t}m - k_{\text{сж}}fpA_{\text{б}} = 0. \quad (5)$$

На верхней и нижней стенке сила тяжести изменяет нормальное давление на поверхность: на нижней стенке увеличивает, на верхней уменьшает.

Сумма проекций сил на нижней стенке рассчитывается следующим образом:

$$\Sigma F_x^{\text{н}} = F_{\text{п}} - F_{\text{тр}}^{\text{н}} - F_{\text{и}} - F_{\text{сж}}^{\text{н}} = 0, \quad (6)$$

где $F_{\text{тр}}^{\text{н}}$ – сила трения на нижней стенке.

На нижней стенке сила трения будет обусловлена действием силы трения, аналогичной силе трения о боковые стенки. Однако сила тяжести субстрата увеличивает силу нормального давления на поверхность, при этом сила трения возрастает:

$$F_{\text{тр}}^{\text{н}} = F_{\text{тр}} + fmg = fpA_{\text{н}} + fmg = f(pA_{\text{н}} + mg), \quad (7)$$

где $F_{\text{сж}}^{\text{н}}$ – сила предварительного сжатия субстрата на нижней стенке, определяется аналогично силе на боковых стенках с помощью коэффициента пропорциональности $k_{\text{сж}}$; $A_{\text{н}}$ – площадь контакта с нижней стенкой, м².

$$F_{\text{сж}}^{\text{н}} = k_{\text{сж}}f(pA_{\text{н}} + mg). \quad (8)$$

Тогда сумма проекций сил на ось OX на нижней стенке примет вид:

$$\Sigma F_x^{\text{н}} = F_{\text{п}} - f(pA_{\text{н}} + mg) - \frac{v}{t}m - k_{\text{сж}}f(pA_{\text{н}} + mg) = 0. \quad (9)$$

Сумма проекций сил на верхней стенке рассчитывается по формуле

$$\Sigma F_x^{\text{в}} = F_{\text{п}} - F_{\text{тр}}^{\text{в}} - F_{\text{и}} - F_{\text{сж}}^{\text{в}} = 0, \quad (10)$$

где $F_{\text{тр}}^{\text{в}}$ – сила трения на верхней стенке, рассчитанная по формуле

$$F_{\text{тр}}^{\text{в}} = F_{\text{тр}} - fmg = fpA_{\text{в}} - fmg = f(pA_{\text{в}} - mg), \quad (11)$$

где $A_{\text{в}}$ – площадь контакта субстрата с верхней стенкой, м².



Силу сжатия субстрата на верхней стенке рассчитывают по формуле

$$F_{сж}^B = k_{сж} f(pA_B - mg). \quad (12)$$

Для существующих прессов с прямоугольным каналом сумма проекций сил на ось Ox на верхней стенке примет следующий вид:

$$\Sigma F_x^B = F_{\Pi} - f(pA_B - mg) - \frac{v}{t} m - k_{сж} f(pA_B - mg) = 0. \quad (13)$$

Анализ выражений (6–13) показывает, что суммарная сила сопротивления на нижней стенке больше силы сопротивления на верхней стенке, что обуславливает различное уплотнение блока в нижней и верхней части.

В новой конструктивно-технологической схеме машины (пресса) для формирования блоков тепличного субстрата [5, 6] канал сжатия имеет два участка – прямой и конусный. Для работы в канале переменного сечения на втором участке поршень выполнен в виде двух подвижных соприкасающихся рабочих пластин с возможностью перемещения относительно друг друга. В соответствии с конструкцией имеются два положения поршня, отличающихся силами, действующими на субстрат. В первом положении происходит разгон и предварительное обжатие поступившей массы субстрата (рисунок 2). Во втором положении (рисунок 3) за счет уменьшения поперечного сечения канала в корпусе пресса происходит основное сжатие субстрата до требуемой плотности формирующегося блока. Рассмотрим положения по отдельности и выполним силовой анализ.

В первом положении (рисунок 2) масса субстрата поступила в корпус и при движении поршня разгоняется и сжимается на участке прямоугольной формы с прямыми стенками.

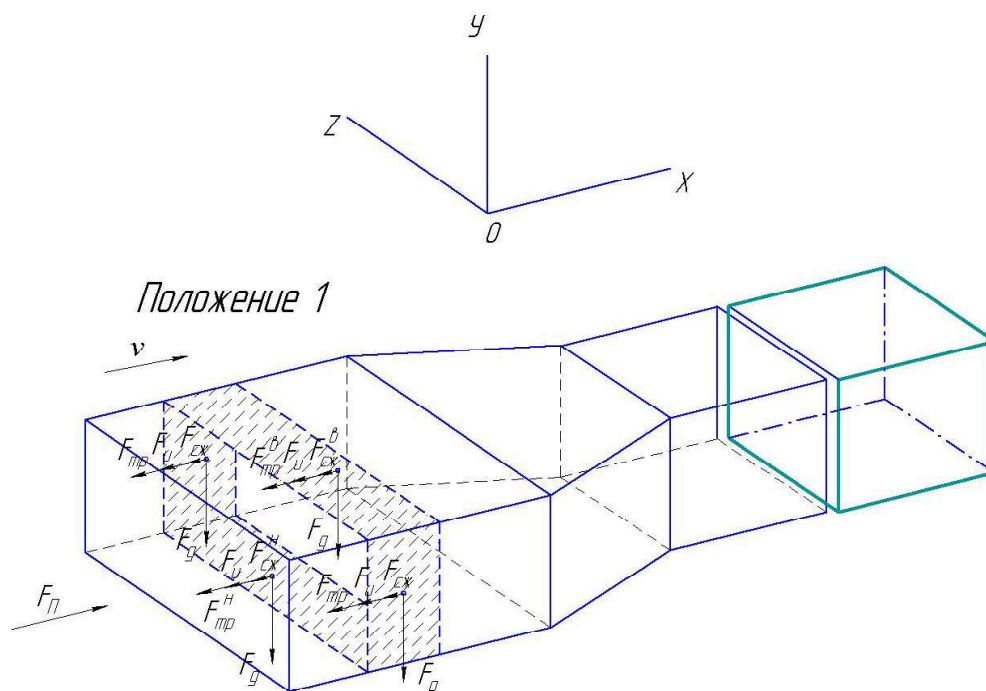


Рисунок 2 – Схема сил, действующих на субстрат в первом положении

Figure 2 – Layout of forces acting on the substrate in the first position

На элементарный объем субстрата в первом положении воздействуют: сила тяжести F_g , направленная вертикально вниз; сила трения $F_{тр}$, направленная в сторону, противоположную движению поршня и субстрата; сила инерции $F_{ин}$, также направленная в сторону, противоположную движению поршня и субстрата; сила предварительного сжатия $F_{сж}$, создающая сопротивление движению поршня и поэтому направленная в сторону, противоположную движению поршня и субстрата.

Аналогично предыдущей схеме можно выделить нижнюю, верхнюю и боковые стенки. Сумма проекций сил на нижней, верхней и боковых стенках определяется по выражениям (5), (9), (13).



Таким образом, в первом положении выражение проекции суммы сил сопротивления движению поршня на ось X будет иметь следующий вид:

$$F_{\Pi} = 2F_{\text{тр}}^1 + F_{\text{и}} + 2F_{\text{сж}}^1 + F_{\text{тр}}^{\text{H}} + F_{\text{тр}}^{\text{B}} + F_{\text{сж}}^{\text{H}} + F_{\text{сж}}^{\text{B}}, \quad (14)$$

где $F_{\text{тр}}^1$ – сила трения по боковой стенке корпуса пресса в первом положении; $F_{\text{сж}}^1$ – сила сжатия субстрата на боковых стенках в первом положении; $F_{\text{тр}}^{\text{H}}$ – сила трения на нижней стенке корпуса; $F_{\text{тр}}^{\text{B}}$ – сила трения на верхней стенке корпуса; $F_{\text{сж}}^{\text{H}}$ – сила сжатия субстрата на нижней стенке; $F_{\text{сж}}^{\text{B}}$ – сила сжатия субстрата на верхней стенке.

Во втором положении (рисунок 3) субстрат движется с постоянной скоростью, равной скорости движения поршня, поэтому сила инерции отсутствует. Боковые стенки канала корпуса пресса во втором положении конусообразные. Сечение сужается по ходу поршня, т.е. в сторону движения массы. Благодаря этому субстрат сжимается, его плотность выравнивается, и давление на нижнюю, верхнюю и боковые стенки также выравнивается, несмотря на действие силы тяжести. Поэтому давление p примем одинаковым на всех четырех стенках корпуса.

Сумма проекций сил на ось OX с учетом принятых ранее условий на верхней и нижней стенках будет иметь следующий вид:

$$\Sigma F_x^{\text{B}} = F_x^{\text{H}} = F_{\Pi} - F_{\text{тр}2} = 0; \quad (15)$$

на боковых стенках:

$$\Sigma F_x^{\text{B}} = F_{\Pi} - F_{\text{тр}2} \cos \alpha - F_{\text{сж}2} \sin \alpha = 0. \quad (16)$$

На верхней и нижней стенках нет сил, действующих вдоль оси OZ .

На боковых стенках сумма проекций сил будет иметь следующий вид:

$$\Sigma F_z^{\text{B}} = F_{\text{тр}2} \sin \alpha - F_{\text{сж}2} \cos \alpha. \quad (17)$$

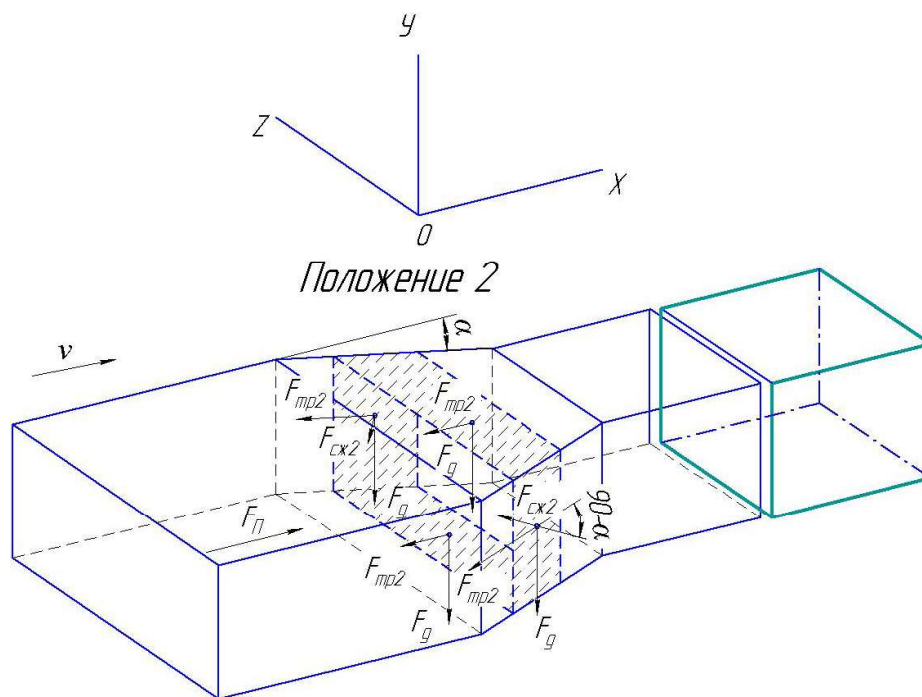


Рисунок 3 – Схема сил, действующих на субстрат во втором положении

Figure 3 – Layout of forces acting on the substrate in the second position

Сила трения на боковых стенках во втором положении:

$$F_{\text{тр}2} = fp_2 A_{\text{Б}2}, \quad (18)$$

где p_2 – нормальное давление на боковые стенки. Во втором положении давление на боковые стенки определяется степенью сжатия и сопротивлением сжатию. Поскольку объем канала уменьша-



ется за счет его конусности, а масса остается такой же, давление поршня приводит к увеличению плотности субстрата деформацией сжатия. Рядом исследований [2, 3] для соломы и силоса установлен пропорциональный характер между степенью сжатия, геометрическими характеристиками и напряжениями сжатия. Таким образом, за нормальное давление на боковые стенки во втором положении примем напряжения сжатия субстрата [1]. Выражение (18) представим в следующем виде:

$$F_{\text{тр}2} = f\sigma_{\text{сж}}A_{\text{Б}2}. \quad (19)$$

Сила сжатия субстрата на конусном участке, соответствующем второму положению, также будет определяться сопротивлением сжатию или напряжениями сжатия. Напряжения сжатия будут иметь минимальное значение при входе на конусный участок, максимальное значение – при выходе. Также используется среднее значение с учетом указанного ранее пропорционального характера изменения сопротивления сжатия:

$$F_{\text{сж}2} = \sigma_{\text{сж}}A_{\text{Б}2}. \quad (20)$$

Результаты исследований. В результате силового анализа процесса прессования в прямоугольном канале установлено, что на верхней стенке сила нормального давления меньше, чем на нижней стенке. Таким образом, сила трения на верхней и нижней стенках также различается. Поэтому в таком канале возникает неравномерное уплотнение субстрата. Субстрат уплотняется за счет сил сопротивления, основной из которых является сила трения о стенки канала. Вблизи нижней стенки плотность будет выше, чем у верхней стенки.

В предлагаемом прессе применительно ко всей массе субстрата M , находящейся в корпусе при формировании блока в первом положении, выражение (14) будет иметь следующий вид:

$$F_{\text{II}}^1 = 2(fpA_{\text{Б}} + k_{\text{сж}}fpA_{\text{Б}}) + \frac{v}{t}M + f(pA_{\text{H}} + Mg) + k_{\text{сж}}f(pA_{\text{H}} + Mg) + f(pA_{\text{В}} - Mg) + k_{\text{сж}}f(pA_{\text{В}} - Mg), \quad (21)$$

где p – нормальное давления субстрата на стенки корпуса при движении в положении 1. $A_{\text{Б}}$, A_{H} , $A_{\text{В}}$ – площадь боковой, нижней и верхней стенки канала корпуса пресса, f – коэффициент трения субстрата о поверхность стенок корпуса. Сила инерции будет определяться скоростью v и временем разгона t , т.к. начальная скорость равна нулю.

Во втором положении проекция суммы сил сопротивления движению поршня на ось X будет иметь следующий вид:

$$F_{\text{II}2} = 2F_{\text{тр}2} + 2F_{\text{сж}2} \sin \alpha + 2F_{\text{тр}2} \cos \alpha; \quad (22)$$

с учетом выражений (18) и (19):

$$F_{\text{II}2} = 2f\sigma_{\text{сж}}A_{\text{Б}2} + 2\sigma_{\text{сж}}A_{\text{Б}2} \sin \alpha + 2f\sigma_{\text{сж}}A_{\text{Б}2} \cos \alpha, \quad (23)$$

или

$$F_{\text{II}2} = 2\sigma_{\text{сж}}A_{\text{Б}2}(f + \sin \alpha + f \cos \alpha). \quad (24)$$

Таким образом, характеристиками, определяющими усилие на поршне во втором положении, являются напряжения сжатия субстрата, его коэффициент трения по поверхности канала, а также площадь взаимодействия.

Заключение. По результатам проведенных теоретических исследований формирования блоков субстрата сделаны следующие выводы. При формировании блоков грибного субстрата в прямоугольном канале на стенках канала действуют различные по величине силы, обуславливающие различное сопротивление движению субстрата под действием поршня. Различия силовых факторов у боковых стенок, верхней и нижней стенки прямоугольного канала пресса обуславливают



неравномерную плотность блока по сечению и длине. Для формирования блока необходимо разработать конструктивно-технологическую схему, обеспечивающую требуемую и постоянную по сечению блока плотность.

При формировании блоков грибного субстрата в предлагаемом прессе с прямоугольным и конусным участками: на первом участке происходит предварительное сжатие аналогично прямоугольному каналу существующих прессов, на втором участке канала за счет его конусности происходит основное сжатие и выравнивание плотности блока субстрата.

Усилие на поршне определяется выражениями (17) и (24) и зависит от массы формируемого блока, физико-механических свойств субстрата, скорости движения поршня, геометрических характеристик пресса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние конструктивных и режимных параметров на силовые характеристики машины для удаления и погрузки тепличного грунта / А. О. Везиров [и др.] // Вестник Курганской ГСХА. 2021. № 4. С. 97–99
2. Павлов П. И., Демин Е. Е., Дзюбан И. Л. Физико-механические свойства сельскохозяйственных грузов в расчетах подъемно-транспортных машин. Саратов: Волга-Медиа, 2022. 134 с.
3. Павлов П. И., Демин Е. Е., Шок О. В. Физико-механические свойства сельскохозяйственных грузов. Саратов: Изд-во Поволж. межрегион. учеб. центра, 2006. 132 с.
4. Павлов П. И., Смотряков Д. А., Курунин В. А. Анализ средств механизации, используемых при выращивании грибов // Проблемы и перспективы развития АПК: технические и сельскохозяйственные науки: материалы регион. науч.-техн. конф., посвящ. 110-летию Вавиловского ун-та. Саратов, 2023. С. 20–22.
5. Павлов П. И., Смотряков Д. А., Курунин В. А. Устройство для наполнения пакетов субстратом для выращивания грибов // Проблемы и перспективы развития АПК: технические и сельскохозяйственные науки: материалы регион. науч.-техн. конф., посвящ. 110-летию Вавиловского ун-та. Саратов, 2023. С. 23–25.
6. Устройство для наполнения пакетов субстратом для выращивания грибов: Патент на полезную модель № 219973 U1 / Д. А. Смотряков, П. И. Павлов, А. А. Смотряков. № 2022131485; заявл. 01.12.2022; опубл. 16.08.2022.

REFERENCES

1. Vezirov A. O. Influence of design and operating parameters on the power characteristics of the greenhouse soil removal and loading machine / P. I. Pavlov, A. V. Levchenko, V. V. Korsak. *Vestnik Kurganskoj GSHA*. 2021;(4):97–99. (In Russ.).
2. Pavlov P. I., Demin E. E., Dzyuban I. L. Physical and mechanical properties of agricultural cargoes in calculations of lifting and transport machines. *Saratov*, 2022. 134 p. (In Russ.).
3. Pavlov P. I., Demin E. E., Shock O. V. Physical and mechanical properties of agricultural cargoes. *Saratov*, 2006. 132 p. (In Russ.).
4. Pavlov P. I., Smotryakov D. A., Kurunin V. A. Analysis of mechanization tools used in mushrooms growing. Problems and Prospects for the Development of the Agro-industrial Complex: Technical and Agricultural Sciences. *Saratov*, 2023:20–22. (In Russ.).
5. Pavlov P. I., Smotryakov D. A., Kurunin V. A. Device for filling bags with substrate for growing mushrooms. Problems and Prospects for the Development of the Agro-industrial Complex: Technical and Agricultural Sciences. *Saratov*, 2023:23–25. (In Russ.).
6. Device for filling bags with substrate for growing mushrooms: Patent 219973 U1 / D. A. Smotryakov, P. I. Pavlov, A. A. Smotryakov. No. 2022131485; appl.: 12/01/2022; publ.: 08/16/2022. (In Russ.).

*Статья поступила в редакцию 12.03.2024; одобрена после рецензирования 15.05.2024; принята к публикации 18.05.2024.
The article was submitted 12.03.2024; approved after reviewing 15.05.2024; accepted for publication 18.05.2024.*

