

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАДЕЛКИ ПОСЕВНОЙ БОРОЗДКИ ПОЧВОЙ

кандидат технических наук **И.В. Казаков**

ФБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства»,
г. Пушкино, Российская Федерация

Одним из важных требований к качеству посева мелких семян хвойных пород в лесных питомниках является глубина их заделки в бороздках, которая должна быть в пределах от 1 до 2 см и плотностью почвы в зоне размещения семян, равной 1 г/см^3 . Для выполнения этой операции применяются различные рабочие органы, которые не в полной мере соответствуют этим требованиям. Поэтому выбор и обоснование параметров устройства для заделки посевных бороздок почвой представляет научный и практический интерес при разработке сеялок для лесных питомников. На основании разработанной математической модели процесса заделки семян почвой предлагаемой конструкцией загортача проведено ее теоретическое исследование, в котором в качестве исходных параметров загортача и свойств почвы приняты следующие показатели: угол схождения направляющих загортача; длина направляющих загортача; диаметр прутков загортача и коэффициент, характеризующий свойства почвы. Установлено, что свойства почвы не оказывают существенного влияния на качество заделки бороздки почвой, и предложена конструкция загортача, которая обеспечивает эффективную заделку семян на почвах с различными ее свойствами. Получены картограммы оптимизации параметров направляющих загортача, позволяющие оценить эффективность их работы и обосновать оптимальные параметры загортача.

Ключевые слова: сеялка, почва, бороздка, плотность почвы, математическая модель, оптимизация, параметры

SIMULATION RESULTS OF THE PROCESS OF EMBEDDING SEED DRILLS WITH SOIL

PhD (Engineering) **I.V. Kazakov**

All-Russian Research institute for Silviculture and Mechanization of Forestry (VNIILM),
Pushkino, Russian Federation

Abstract

One of the important requirements for the quality of sowing small seeds of conifers in forest nurseries is the depth of their seeding in the drills. It should be in the range of 1 to 2 cm and soil density in the seed distribution area should be 1 g/cm^3 . To perform this operation, various working bodies are used that do not fully comply with these requirements. Therefore, the selection and justification of the device parameters for embedding seed drills with soil is of scientific and practical interest in the development of seeders for forest nurseries. Based on the developed mathematical model of the process of embedding seeds with soil, proposed by the design of the covering device, its theoretical study was carried out, in which the following indicators were taken as the initial parameters of the covering device and soil properties. They are: angle of convergence of the covering device guides; length of the sticking boards, the diameter of rods and the coefficient characterizing the properties of the soil. It was found that the soil properties do not significantly affect the quality of the drill embedment by the soil. The design of the covering device is proposed, which provides an effective embedment of seeds on soils with various properties. Cartograms of optimizing the parameters of the sticking board of covering device have been obtained. They enable to evaluate the effectiveness of their work and justify the optimal parameters of the covering device.

Keywords: seeder, soil, drill, soil density, mathematical model, optimization, parameters

Введение

Одной из важных операций при посеве мелких семян хвойных пород в лесных питомниках является заделка их почвой. Существующие устройства для выполнения этой операции не обеспечивают требуемого качества ее выполнения. Поэтому обоснование оптимальных конструктивных параметров загорточей, обеспечивающих требуемую глубину заделки посевной бороздки почвой с необходимой ее плотностью, является актуальным при разработке сеялок для лесных питомников.

Методы и материалы

Для исследования процесса заделки посевной бороздки почвой разработана математическая модель и составлены компьютерные программы для обоснования оптимальных конструктивно-технологических параметров загортача [1, 4, 7].

Для анализа полученной математической модели и оценки ее эффективности проведено ее теоретическое исследование в соответствии со следующей схемой входных и выходных параметров, представленных на рис. 1. В качестве исходных параметров загортача и свойств почвы приняты следующие показатели:

α – угол между направляющими загортача;

L – длина направляющих загортача;

d – диаметр прутков загортача;

k_0 – коэффициент ограничения взаимодействия шарообразных элементов почвы. Этот показатель определяет ее связность и позволяет воспроизводить в модели почву от рассыпчатой песчаной до связной суглинистой.

При проведении компьютерного эксперимента рассчитывали следующие показатели эффективности работы загортача:

h – высота заделки бороздки почвой. Отсчитывается от первоначального уровня почвы. Отрицательные значения высоты почвы означают, что бороздка не полностью заделана;

ρ – средняя плотность почвы в бороздке. Если бороздка заделана почвой недостаточно эффективно, то плотность почвы в посевной бороздке не превышает ее первоначальной величины, рекомендуемой принимать равной 1 г/см^3 [1, 4, 7, 9];

$\Delta\rho$ – неоднородность плотности почвы в

сечении бороздки. Рассчитывается путем разделения квадратного сечения бороздки на 9 квадратных фрагментов (3×3), подсчета плотности в каждом квадратном сечении и определения разности между максимальной и минимальной локальными плотностями $\Delta\rho = \rho_{\max} - \rho_{\min}$.

Для теоретического исследования принята «звездообразная» схема: входные параметры изменяются поочередно относительно базового набора параметров, априори полагаемых оптимальными ($\alpha = 20^\circ$, $L = 120 \text{ мм}$, $d = 5 \text{ мм}$, $k_0 = 1,003$) [2, 10, 11].

Результаты и обсуждение

Влияние угла схождения направляющих загортача на процесс заделки бороздки. Основным параметром загортача, влияющим на количество сдвигаемой почвы в посевную бороздку, является угол α схождения его направляющих. От угла α схождения направляющих загортача зависит объем сдвигаемой почвы, и бороздка может оказаться как недостаточно засыпанной, так и чрезмерно переполненной по отношению к уровню почвы. Для выбора оптимального угла α схождения направляющих загортача проведена серия компьютерных экспериментов, в которых этот угол изменялся от 10° до 40° с шагом, равным 10° (табл. 1, рис. 2). С увеличением угла между направляющими загортача улучшается заделка посевной бороздки и повышается уровень почвы в ее центре (рис. 2).

При угле α , равном 20° , бороздка заделывается до первоначального уровня почвы (рис. 3, а). Однако с учетом последующего уплотнения почвы катком целесообразно рекомендовать в качестве оптимального больший угол, равный 30° , обеспечивающий превышение почвы над бороздкой. При угле α , равном 16° и более, плотность почвы в бороздке превышает минимально допустимый уровень $0,8 \text{ г/см}^3$ (рис. 3, б). При дальнейшем увеличении угла α плотность достигает значения $1,0 \text{ г/см}^3$ при $\alpha = 27^\circ$ и далее асимптотически стремится к $1,03 \text{ г/см}^3$ [1, 6, 9].

С увеличением угла α схождения направляющих α и, соответственно, улучшением заделки бороздки плотность почвы внутри бороздки становится более однородной, и при α более 25° неоднородность плотности почвы становится незна-

чительной и не превышает $0,02 \text{ г/см}^3$ (рис. 3, в).

Таким образом, при длине направляющих загортача, равной 120 мм, оптимальный угол их схождения составляет $25...30^\circ$.

Влияние длины направляющих загортача на процесс заделки бороздки. Управлять уровнем заделки бороздки почвой можно, кроме изменения угла схождения направляющих, длиной самих направляющих. Для изучения влияния длины направляющих L на эффективность заделки семян почвой проведена серия компьютерных экспериментов, в которых L изменялась от 80 до 140 мм с шагом 20 мм при постоянном угле между направляющими $\alpha = 20^\circ$ (табл. 2, рис. 5 и 6).

В результате проведенных исследований установлено, что при увеличении длины направляющих загортача от 80 до 140 мм высота заделки бороздки увеличивается (рис. 7, а), и при их длине, равной 140 мм, наблюдается заделка бороздки до первоначального уровня почвы ($h = 0 \text{ мм}$). Плотность почвы в бороздке также приближается к первоначальной величине, равной 1 г/см^3 (рис. 7, б). При длине направляющих в пределах от 80 до 120 мм плотность почвы в бороздке достаточно неоднородна, и составляет, соответственно, $0,079$ и $0,055 \text{ г/см}^3$. С увеличением длины направляющих до 140 мм неоднородность плотности почвы внутри бороздки уменьшается до $0,012 \text{ г/см}^3$, т. е. плотность почвы становится практически однородной (рис. 7, в).

Таким образом, при угле схождения направляющих $\alpha = 20^\circ$ оптимальная длина направляющих составляет около $L = 140 \text{ мм}$.

Влияние диаметра прутка загортача на процесс заделки бороздки. С целью изучения влияния диаметра прутка на эффективность заделки бороздки проведена серия компьютерных экспериментов, в которой изменяли диаметр прутка d от 4 до 7 мм с шагом 1 мм (табл. 3, рис. 8 и 9) [1, 3, 8].

Так как диаметр прутка d загортача определяет величину сдвигаемого в бороздку слоя

почвы, с увеличением d увеличивается высота уровня почвы в бороздке (рис. 10, а) и средняя плотность почвы в бороздке (рис. 10, б). При диаметре прутка загортача менее 5 мм почва внутри бороздки довольно неоднородная, однако при диаметре d более 6 мм неоднородность плотности почвы (рис. 10, в) пренебрежимо мала (менее $0,02 \text{ г/см}^3$) [1, 3, 8].

Таким образом, при угле схождения направляющих $\alpha = 20^\circ$ и длиной $L = 120 \text{ мм}$ оптимальный диаметр прутка загортача составляет около 6 мм.

Влияние свойств почвы на процесс заделки бороздки. Для исследования универсальности применения предлагаемого загортача проведены компьютерные эксперименты с различными свойствами почвы. В первую очередь, проведена проверка работоспособности загортача на рассыпчатой песчаной почве (коэффициент ограничения взаимодействия элементов почвы $k_0 = 1,0007$) и высокосвязной влажной почве (суглинистой, глинистой, черноземной) ($k_0 = 1,015$) [1, 3, 8]. Полученные результаты исследования представлены в табл. 4 и на рис. 11.

Несмотря на различное состояние почвы, предложенная конструкция загортача обеспечивает надежную заделку бороздки почвой. Высота заделки бороздки почвой близка к первоначальному ее уровню: $-2,45$ и $0,27 \text{ мм}$ (табл. 4). Плотность почвы в бороздке оказывается практически одинаковой: $0,895$ и $0,891 \text{ г/см}^3$ и определяется только параметрами α , L , d , определяющими объем сдвигаемой в бороздку почвы. Почва в бороздке оказывается достаточно однородной (неоднородность $\Delta\rho$ составляет, соответственно, $0,017$ и $0,031 \text{ г/см}^3$) и не зависит от типа почвы.

Таким образом, предлагаемая конструкция загортача обеспечивает одинаково эффективную заделку семян с различными свойствами почв: от рассыпчатых песчаных до высокосвязных влажных суглинистых, а также на глинистых и черноземах.



Рис. 1. Постановка задачи на теоретическое исследование процесса заделки бороздки почвой

Таблица 1

Результаты серии компьютерных экспериментов по исследованию влияния угла схождения направляющих загортача на показатели эффективности его работы

Номер компьютерного эксперимента	Угол схождения направляющих α , градус	Показатели эффективности		
		высота заделки бороздки h , мм	плотность почвы в бороздке ρ , г/см ³	неоднородность плотности почвы в бороздке $\Delta\rho$, г/см ³
1	10	-5,51	0,672	0,098
2	20	-1,92	0,907	0,027
3	30	2,57	1,057	0,003
4	40	6,63	1,062	0,006

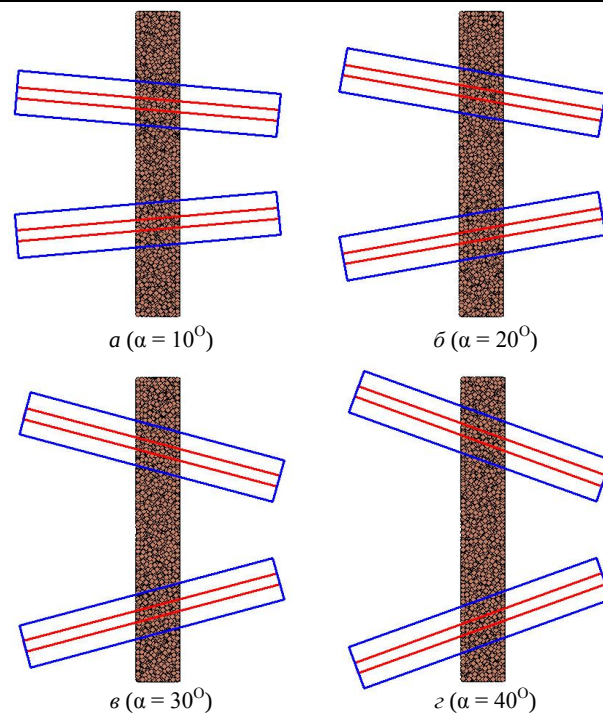


Рис. 2. Моделирование загортачей с различными углами α схождения направляющих

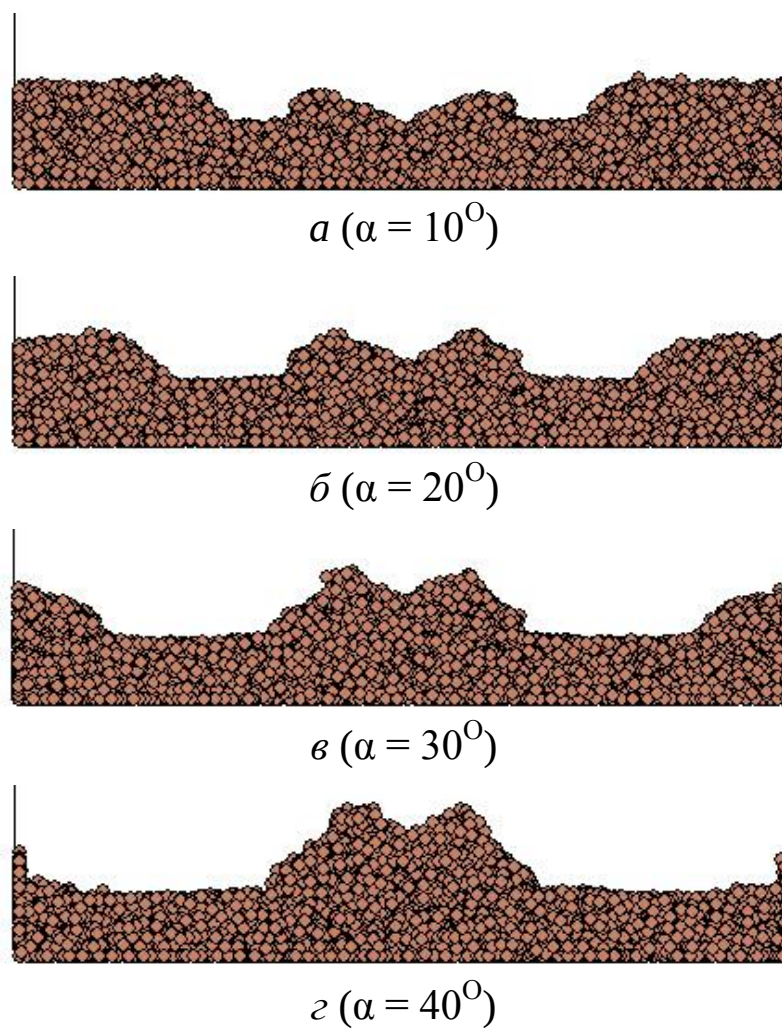


Рис. 3. Профили заделанной бороздки почвой при различных углах α схождения направляющих загортача

Таблица 2

Результаты серии компьютерных экспериментов по исследованию влияния длины направляющих загортача на показатели эффективности заделки бороздки почвой

Номер компьютерного эксперимента	Длина направляющих L , мм	Показатели эффективности		
		высота заделки бороздки h , мм	плотность почвы в бороздке ρ , г/см ³	неоднородность плотности почвы в бороздке $\Delta\rho$, г/см ³
1	80	–4,5	0,744	0,079
2	100	–3,1	0,823	0,055
3	120	–1,9	0,907	0,027
4	140	–0,16	0,993	0,012

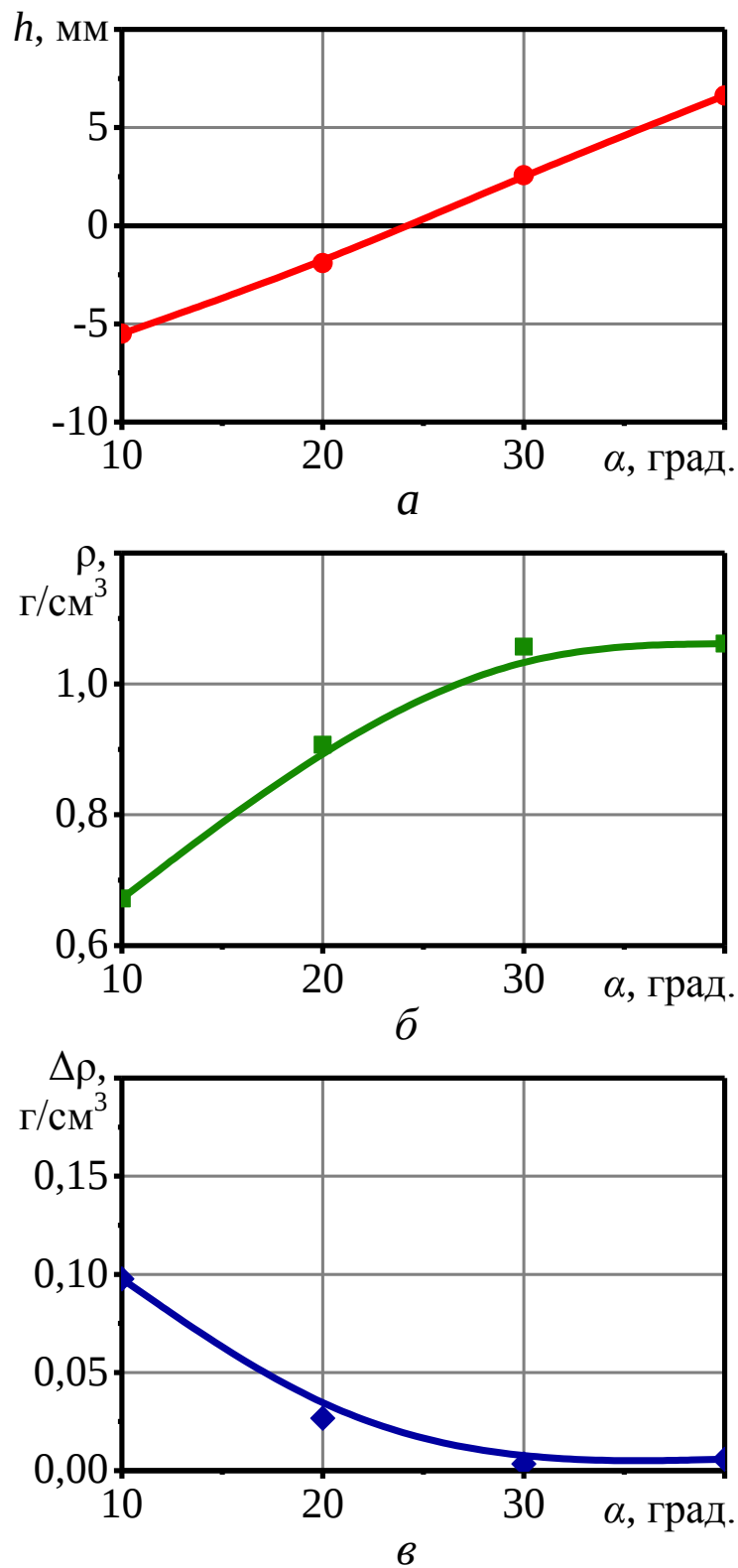


Рис. 4. Влияние угла α схождения направляющих на высоту заделки бороздки h (а), плотность почвы в бороздке ρ (б) и неоднородность плотности почвы $\Delta\rho$ (в)

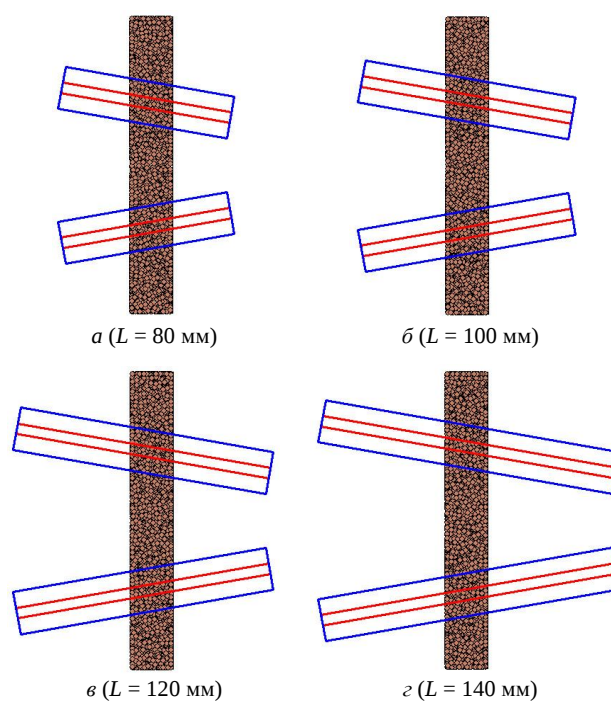


Рис. 5. Моделирование процесса работы загортачей с различной длиной L направляющих

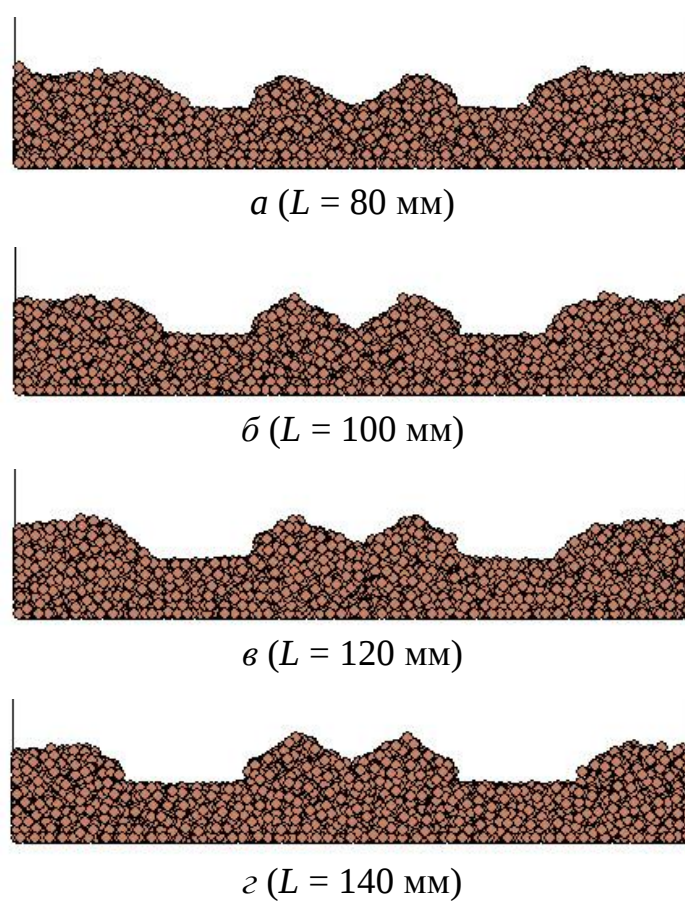


Рис. 6. Профили заделанной бороздки при различной длине L направляющих загортача

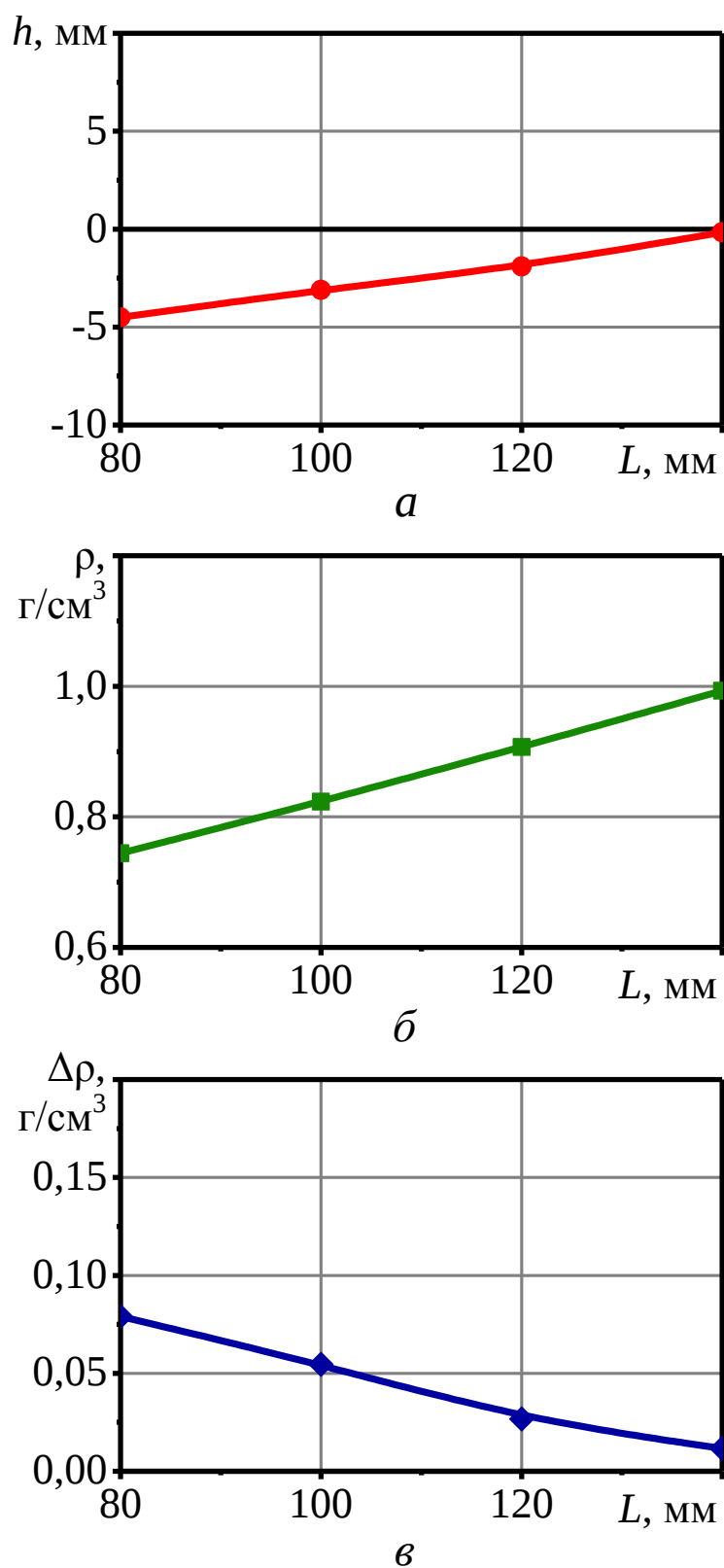


Рис. 7. Влияние длины L направляющих загортачей на высоту заделки бороздки h (а), плотность почвы в бороздке ρ (б) и неоднородность плотности почвы $\Delta\rho$ (в)

Таблица 3

Результаты серии компьютерных экспериментов по исследованию влияния диаметра прутка загортача на показатели эффективности

Номер компьютерного эксперимента	Диаметр прутка d , мм	Показатели эффективности		
		высота заделки бороздки h , мм	плотность почвы в бороздке ρ , г/см ³	неоднородность плотности почвы в бороздке $\Delta\rho$, г/см ³
1	4	-3,42	0,813	0,067
2	5	-2,35	0,888	0,030
3	6	-0,48	0,977	0,010
4	7	0,67	1,031	0,007

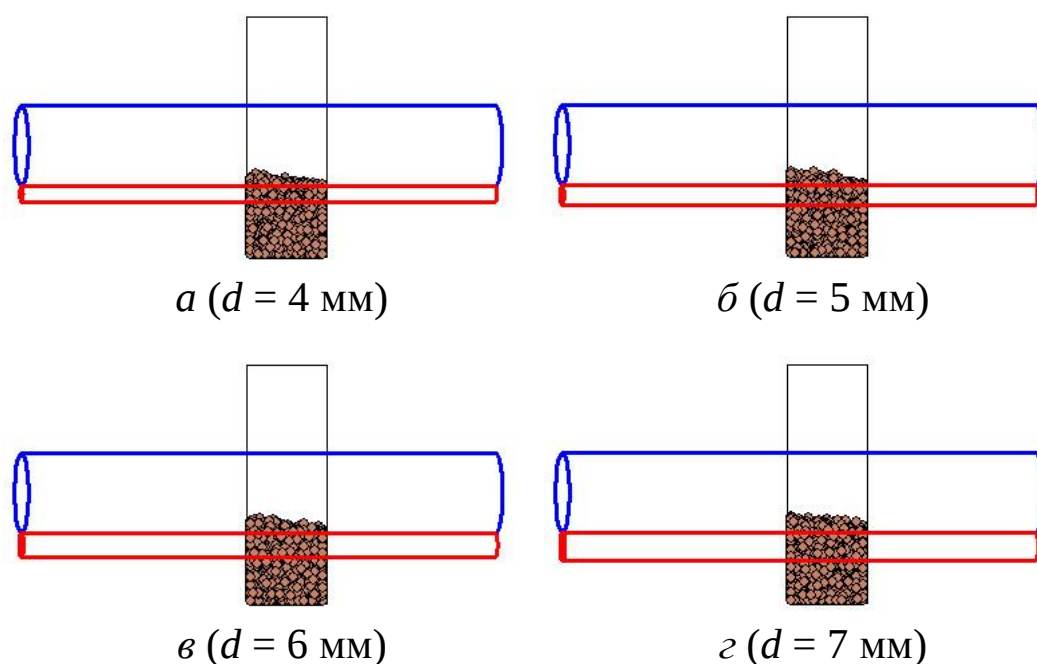


Рис. 8. Моделирование процесса работы загортачей с различными диаметрами d прутков загортача

Таблица 4

Результаты серии компьютерных экспериментов по исследованию влияния рассыпчатости почвы

Номер компьютерного эксперимента	Коэффициент ограничения взаимодействия элементов почвы, k_0	Показатели эффективности		
		высота заделки бороздки h , мм	плотность почвы в бороздке ρ , г/см ³	неоднородность плотности почвы в бороздке $\Delta\rho$, г/см ³
1	1,0007	-2,45	0,895	0,017
2	1,015	0,27	0,891	0,031

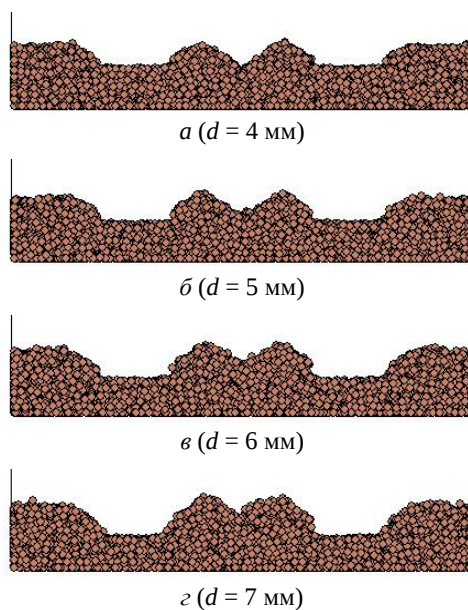


Рис. 9. Профили заделанной бороздки при различных диаметрах d прутков загортacha

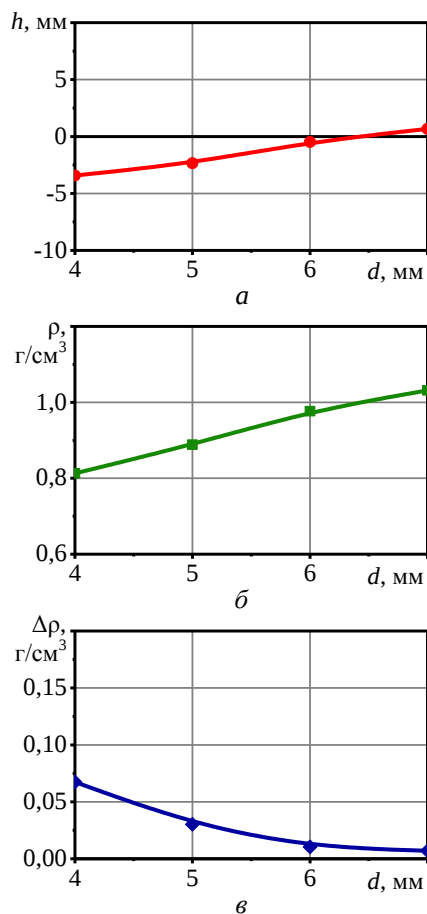


Рис. 10. Влияние диаметра d прутка загортacha на высоту заделки бороздки (a), плотность почвы в бороздке ρ (b) и неоднородность плотности почвы $\Delta\rho$ (v)

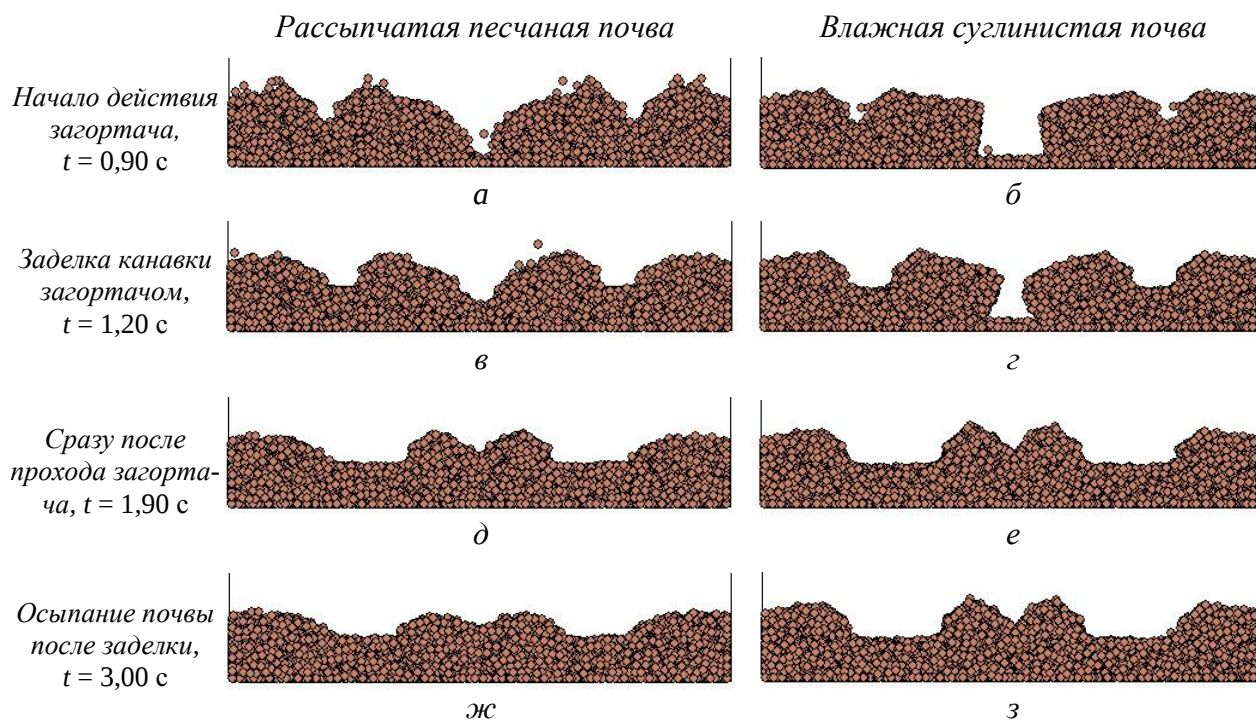


Рис. 11. Профили заделанной бороздки для рассыпчатой песчаной почвы (а, в, д, ж) и суглинистой почвы с высокой влажностью (б, г, е, з) в различные стадии заделки бороздок

Оптимизация параметров загортача и результаты моделирования. Проведенные исследования позволили оценить влияние отдельных параметров загортача на показатели эффективности его работы. Однако большую практическую ценность имеет исследование одновременного влияния нескольких параметров загортача. С этой целью проведена двухфакторная оптимизация параметров L и α направляющих загортача. Решаемую задачу оптимизации параметров загортача можно записать аналитически следующим образом [2, 5, 10]:

$$\begin{cases} h(L, \alpha) \rightarrow 0 \text{ мм}; \\ \rho(L, \alpha) \rightarrow 1 \text{ г/см}^3; \\ \Delta \rho(L, \alpha) \rightarrow 0. \end{cases} \Rightarrow L_{\text{опт}}, \alpha_{\text{опт}}.$$

Для установления взаимосвязи между факторами оптимизации L , α и критериями оптимизации h , ρ , $\Delta \rho$ проведены 16 компьютерных экспериментов, в которых варьировали длину направляющих L на уровнях 80, 100, 120, 140 мм, и угол направляющих α на уровнях 10, 20, 30, 40° (табл. 5).

Полученные результаты обработаны с помощью регрессионного анализа. Для функций $h(L, \alpha)$, $\rho(L, \alpha)$, $\Delta \rho(L, \alpha)$ получены аппроксимирующие выражения в виде полиномов второго порядка для сглаживания разброса результатов компьютерного эксперимента [8, 11, 12].

Графики анализированных функций представлены на рис. 12. Для удобства анализа графики функций $h(L, \alpha)$, $\rho(L, \alpha)$, $\Delta \rho(L, \alpha)$ перестроены в виде картограмм, представляющих собой набор линий уровня на плоскости факторного пространства (L, α) (рис. 13).

На картограммах оптимизации затемнены области благоприятных значений критерия. Для высоты h в качестве благоприятного выбран диапазон от -2 до 2 мм относительно исходного уровня почвы (рис. 13, а); для плотности почвы ρ от $0,8$ до $1,2 \text{ г/см}^3$ (рис. 13, б); для неоднородности плотности почвы $\Delta \rho$ менее $0,02 \text{ г/см}^3$ (рис. 13, в).

Для одновременного учета всех трех критериев оптимизации на рис. 13, г найдено пересечение соответствующих благоприятных областей. Черная область представляет собой общую опти-

мальную область, в которой все критерии h , ρ , $\Delta\rho$ имеют необходимые значения. Общая оптимальная область является достаточно протяженной, что косвенно свидетельствует о высокой устойчи-

вости оптимального режима работы загортача к изменению внешних факторов, неизбежному при их эксплуатации.

Таблица 5

Результаты оптимизационной серии компьютерных экспериментов

Номер компьютерного эксперимента	Параметры направляющих		Показатели эффективности		
	Длина направляющих L , мм	Угол схождения направляющих α , градусы	Высота заделки бороздки h , мм	Плотность почвы в бороздке ρ , г/см ³	Неоднородность плотности почвы в бороздке $\Delta\rho$, г/см ³
1	80	10	-6,19	0,599	0,105
2	80	20	-4,62	0,744	0,079
3	80	30	-1,69	0,892	0,029
4	80	40	1,54	1,030	0,017
5	100	10	-5,87	0,623	0,095
6	100	20	-3,11	0,823	0,055
7	100	30	0,72	1,005	0,006
8	100	40	4,17	1,051	0,007
9	120	10	-5,50	0,672	0,098
10	120	20	-1,92	0,907	0,027
11	120	30	2,57	1,057	0,003
12	120	40	6,63	1,062	0,006
13	140	10	-5,30	0,690	0,095
14	140	20	-0,16	0,993	0,012
15	140	30	4,99	1,064	0,007
16	140	40	6,84	1,080	0,003

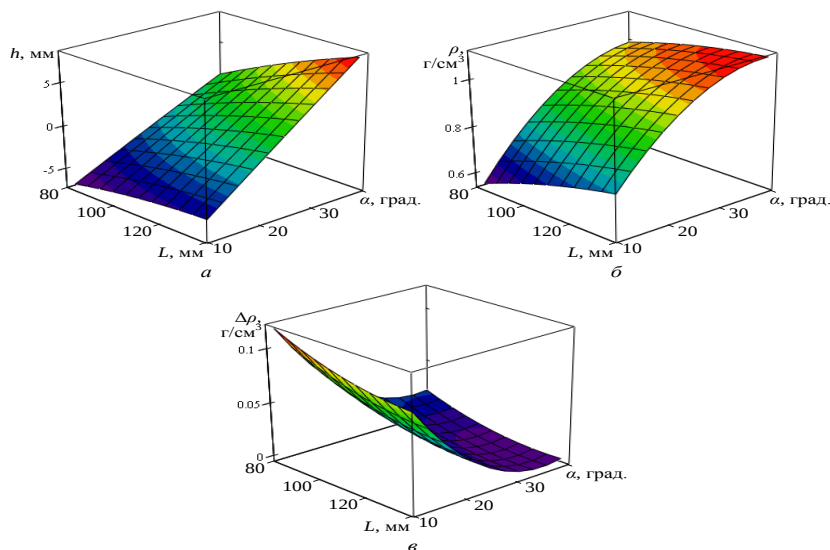


Рис. 12. Графики зависимостей показателей эффективности от параметров направляющих загортача

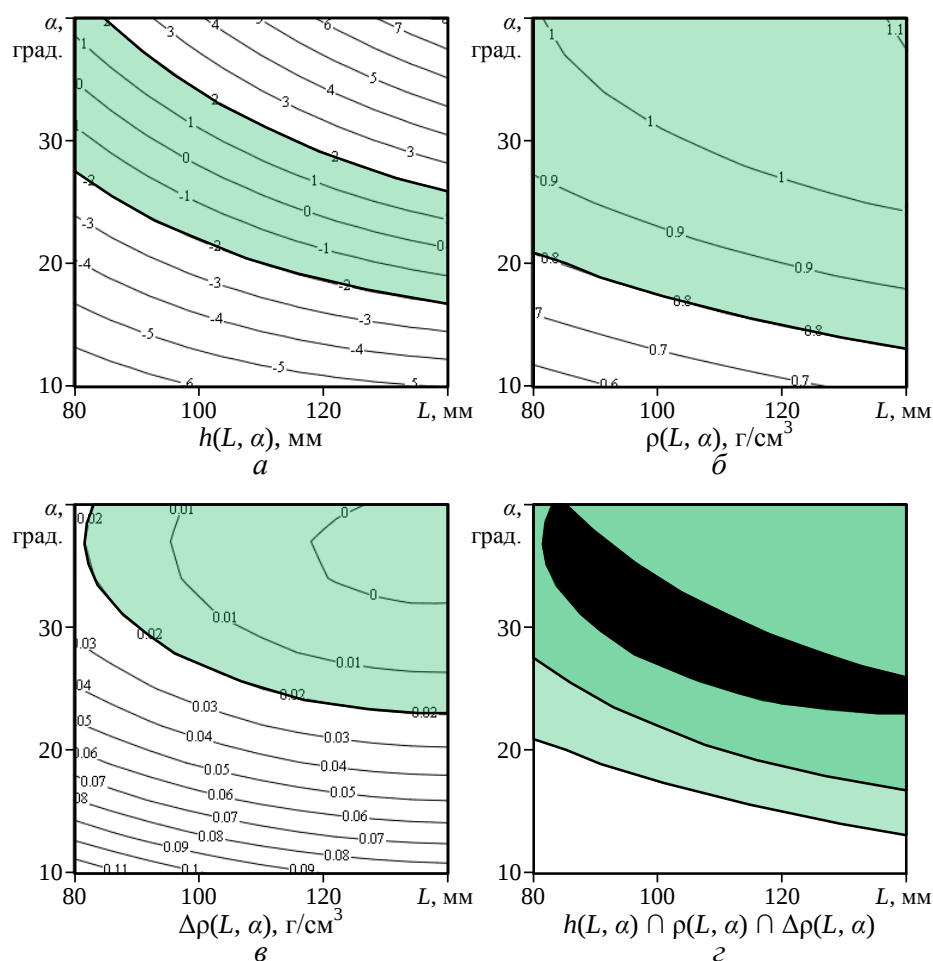


Рис. 13. Картограммы оптимизации параметров направляющих загортача L и α (затемнены благоприятные области факторного пространства, общая оптимальная область выделена черным цветом)

В качестве оптимального выбора параметров L и α можно рекомендовать любую точку из черной области, в частности точку $L = 120$ мм, $\alpha = 28^\circ$, близкую к верхней границе оптимальной области, при которой над бороздкой формируется горка почвы высотой 1...2 мм, подготовленной для последующего прохода уплотняющим катком. При таком оптимальном наборе параметров высота заделки бороздки h составит около 1 мм над исходным уровнем почвы, плотность почвы в бороздке составит около 1,01 г/см³, неоднородность плотности почвы составит около 0,01 г/см³.

Таким образом, решена задача двухфакторной оптимизации параметров направляющих загортача и получены картограммы оптимизации для быстрой оценки эффективности работы загортачей с различными их геометрическими параметрами.

В результате разработанной математической модели процесса заделки бороздки с семенами почвой получена модель, позволяющая с высокой детализацией и пространственным разрешением исследовать процесс заделки бороздки почвой.

Разработанная компьютерная программа для моделирования процесса заделки семян позволяет на основе компьютерных экспериментов определить оптимальные конструктивные и технологические параметры загортача:

- при длине направляющих загортача, равной 120 мм, оптимальный угол их схождения составляет 25...30°;
- при угле схождения направляющих, равном 20°, оптимальная длина направляющих составляет 140...150 мм;
- при угле схождения направляющих,

равном 20° , и их длине, равной 120 мм, оптимальный диаметр прутка составляет 6 мм.

Выводы

1. Предложена оригинальная конструкция загортача, обеспечивающая эффективную заделку бороздки с семенами для различных типов почв от легких песчаных до высокосвязных, тяжелых суглинистых и глинистых.

2. На основании решения задачи двухфакторной оптимизации параметров направляющих загортача получены картограммы оптимизации для быстрой оценки эффективности работы

загортачей с различными геометрическими параметрами.

3. Обоснованы оптимальные параметры загортача: длина направляющих 120 мм, угол схождения направляющих 28° и диаметр прутка загортача 6 мм, обеспечивающие рациональную высоту заделки бороздки 1 мм над исходным уровнем почвы, плотность почвы в бороздке составляет около $1,01 \text{ г/см}^3$, и неоднородность плотности почвы не превышает $0,01 \text{ г/см}^3$.

Библиографический список

1. Василенко, В. В. Расчет рабочих органов почвообрабатывающих и посевных машин : учеб. пособие / В. В. Василенко. – Воронеж : Изд-во ВП, 1994. – 288 с.
2. Гулд, Х. Компьютерное моделирование в физике Ч. 2 / Х. Гулд, Я. Тобочник. – Москва : Мир, 1990. – 400 с.
3. Инженерные расчеты на ЭВМ : справ. пособие / под ред. В. А. Троицкого. – Л. : Машиностроение, 1979. – 288 с.
4. Казаков, И. В. Математическое моделирование процесса заделки семян почвой / И. В. Казаков // Лесотехнический журнал. – 2018. – № 4. – С. 221–229.
5. Полухин, В. А. Компьютерное моделирование динамики и структуры жидких металлов / В. А. Полухин, В. Ф. Ухов, М. М. Дзугутов. – Москва : Наука, 1981. – 323 с.
6. Пошарников, Ф. В. Перспективные технологии выращивания лесопосадочного материала / Ф. В. Пошарников, И. В. Казаков. – Воронеж, 2007. – 290 с.
7. Советов, Б. Я. Моделирование систем : учеб. пособие / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев – Москва : Высш. шк., 1998. – 319 с.
8. Хеерман, Д. В. Методы компьютерного эксперимента в теоретической физике /Д. В. Хеерман. – Москва : Наука, 1990. – 176 с.
9. Allen, M. P. Computer Simulation of Liquids / M. P. Allen, D. J. Tildesley. – Oxford : Clarendon Press, 1987. – 408 p.
10. Hafner, J. Atomic-Scale Computation Materials Science / J. Hafner // Acta Mater. – 2000. – Vol. 48. – P. 71–92.
11. Hoover, W. G. Atomistic Nonequilibrium Computer Simulations / W. G. Hoover // Physica A. – 1983. – Vol. 118. – P. 111–122.
12. Monaghan, J. Smoothed Particle Hydrodynamics / J. Monaghan // Annu. Rev. Astron. Astrophys. – 1992. – Vol. 30. – P. 543–574.

References

1. Vasilenko V. V. *Raschet rabochih organov pochvoobratyvyayushchih i posevnyh mashin* Vasilenko V. V. [Calculation of working bodies of tillage and sowing machines: proc. The Manual. Voronezh: publishing house VP, 1994. 288 p. (In Russian).
2. Guld H., Tobochnik Ya. *Komp'yuternoe modelirovanie v fizike* [Computer simulation in physics. Part 2]. M.: World, 1990. 400 p. (In Russian).

3. *Engineering calculations on a computer* [Engineering calculations on a computer: reference book / Under the editorship of V. A. Troitsky]. L.: Mechanical Engineering, 1979. 288 p. (In Russian).
4. Kazakov I. V. *Matematicheskoe modelirovanie processa zadelki semyan pochvoi* [Mathematical modeling of process covering of seeds]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering Journal]. 2018, vol. 8, no. 4, pp. 221-229. (In Russian).
5. Poluhin V. A., Uhov V. F., Dzugutov M. M. *Komp'yuternoe modelirovanie dinamiki i struktury zhidkih metallov* [Computer simulation of dynamics and structure of liquid metals]. Moscow: Science, 1981. 323 p. (In Russian).
6. Posharnikov F. V., Kazakov I. V. *Perspektivnye tekhnologii vyrashchivaniya lesoposadochnogo materiala*. [Perspective technologies of cultivation of planting stock]. Voronezh, 2007. 290 p. (In Russian).
7. Sovetov B. Ya. *Modelirovanie sistem* [System Modeling : textbook]. M. : Vyssh. SHK., 1998. 319 p. (In Russian).
8. Heerman D. V. *Metody komp'yuternogo eksperimenta v teoreticheskoy fizike* [Methods of computer experiment in theoretical physics]. Moscow: Science, 1990. 176 p. (In Russian).
9. Allen M. P., Tildesley D. J. *Computer Simulation of Liquids*. Oxford: Clarendon Press, 1987. 408 p.
10. Hafner J. Atomic-Scale Computer Science // *Acta Mater.* 2000. Vol. 48. pp. 71-92.
11. Hoover W. G. Atomistic Nonequilibrium Computer Simulations // *Physica A*. 1983. Vol. 118. P. 111-122.
12. Monaghan J. Smoothed Particle Hydrodynamics // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 1992. Vol. 30. pp. 543-574.

Сведения об авторе

Казakov Игорь Владимирович – заведующий отделом механизации лесохозяйственных работ и стандартизации, ФБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства», кандидат технических наук, г. Пушкино, Российская Федерация, e-mail: igor.kazakov2015@bk.ru.

Information about the author

Kazakov Igor Vladimirovich – head of the Department of mechanization of forestry works and standardization, FBI "All-Russian research Institute of forestry and mechanization of forestry", PhD (Engineering), Pushkino, Russian Federation, e-mail: igor.kazakov2015@bk.ru.