

Научная статья

Original article

УДК 631.33.024

DOI 10.55186/25880209_2025_9_4_11

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИМИ
СИСТЕМАМИ ТОЧНОГО ВЫСЕВА: АЛГОРИТМЫ И ПОЛЕВЫЕ
ИСПЫТАНИЯ**

**INTELLIGENT CONTROL OF PNEUMATIC PRECISION SEEDING SYSTEMS:
ALGORITHMS AND FIELD TESTING**



Кун Цзяли, аспирант, Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия (БГСХА) (ул. Ивана Мичурина, 5, Горки), тел. +7 993 293 23 65, kongjialiskd@126.com

Астахов Василий Сергеевич, доктор технических наук, доцент, профессор, Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия (БГСХА) (ул. Ивана Мичурина, 5, Горки)

Kun Jiali, postgraduate student, Belarusian State Order of the October Revolution and the Red Banner of Labor Agricultural Academy (BSAA) (5 Ivan Michurin St., Gorki), tel. +7 993 293 23 65, kongjialiskd@126.com

Astakhov Vasily Sergeevich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Belarusian State Order of the October Revolution and the Red Banner of Labor Agricultural Academy (BSAA) (5 Ivan Michurin St., Gorki)

Аннотация. В статье представлена разработка интеллектуальной системы управления пневматической сеялкой точного высева, основанной на гибридном подходе, объединяющем методы вычислительной гидродинамики (CFD) и машинного обучения. Цель исследования – повышение точности высева семян и снижение энергопотребления системы. Численное моделирование воздушного потока позволило оптимизировать параметры работы сеялки, а адаптивные алгоритмы управления, включая нейросетевые методы, обеспечили стабильность системы в изменяющихся условиях эксплуатации. Результаты показали улучшение точности высева на 15–20%, снижение энергопотребления на 18–22% и повышение устойчивости системы к внешним возмущениям, таким как изменение скорости агрегата и рельефа поля.

Экономический анализ подтвердил быструю окупаемость решения за 2-3 сезона благодаря экономии топлива и снижению расхода семян. Разработанная система также уменьшает нагрузку на оператора и повышает экологичность за счет оптимизации энергозатрат. Перспективы работы включают интеграцию с технологиями точного земледелия, использование данных GPS/ГЛОНАСС и развитие облачных сервисов для коллективного обучения алгоритмов. Практическая значимость исследования заключается в возможности модернизации существующих сеялок без значительных затрат, что делает технологию доступной для широкого круга сельхозпроизводителей.

Abstract. The article presents the development of an intelligent control system for a pneumatic precision seed drill, based on a hybrid approach combining computational fluid dynamics (CFD) and machine learning methods. Numerical modeling of the air flow in the system was performed, operational parameters were optimized, and adaptive control algorithms were developed. The results show a 15–20% improvement in seeding accuracy, an 18–22% reduction in energy consumption, and enhanced system stability under varying operating conditions. The cost-benefit analysis confirms a payback period of 2–3 seasons. Future work focuses on integration with precision agriculture technologies and the development of cloud services for collaborative algorithm training.

Ключевые слова: интеллектуальное управление, пневматическая сеялка, точный высев, вычислительная гидродинамика (CFD), машинное обучение, адаптивные алгоритмы, энергоэффективность, технико-экономическое обоснование.

Keywords: intelligent control, pneumatic seed drill, precision seeding, computational fluid dynamics (CFD), machine learning, adaptive algorithms, energy efficiency, cost-benefit analysis.

Введение

Современное сельское хозяйство сталкивается с необходимостью значительного повышения эффективности производства для обеспечения продовольственной безопасности растущего населения планеты. В этом контексте особую важность приобретают технологии точного земледелия, среди которых системы точного высева занимают ключевое положение. Традиционные механические сеялки, несмотря на свою надежность, демонстрируют существенные ограничения по точности распределения семян, что напрямую влияет на урожайность культур. Пневматические системы высева, получившие широкое распространение в последние десятилетия, позволяют достигать более высоких показателей точности, однако их эффективность существенно зависит от стабильности рабочих параметров и способности адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации [9, с. 11].

Проблема управления параметрами воздушного потока в пневматических системах высева приобретает особую остроту при работе с такими ценными культурами, как кукуруза, подсолнечник и соя, где каждый процент потерь семян или отклонений от оптимальной схемы посева приводит к значительному экономическому ущербу. Существующие системы управления часто не учитывают нелинейный характер зависимости параметров воздушного потока от множества факторов, включая скорость движения агрегата, влажность семян, изменение рельефа поля и степень износа рабочих органов. Это приводит к нестабильности работы системы, повышенному энергопотреблению и, как следствие, снижению экономической эффективности всего сельскохозяйственного процесса [1, с. 5-6].

Особую актуальность разработка интеллектуальных систем управления приобретает в условиях необходимости перехода к ресурсосберегающим технологиям в сельском хозяйстве. Современные требования к экологичности и энергоэффективности сельскохозяйственной техники диктуют необходимость создания адаптивных систем, способных минимизировать энергозатраты при сохранении высокой точности выполнения технологических операций. При этом следует учитывать, что большинство существующих решений либо не обладают достаточной гибкостью управления, либо требуют сложной и дорогостоящей перенастройки при изменении условий работы или переходе на другой тип семян.

Развитие вычислительных методов и технологий искусственного интеллекта открывает новые возможности для создания принципиально новых систем управления пневматическими сеялками. Использование методов вычислительной гидродинамики (CFD) позволяет с высокой точностью моделировать сложные воздушные потоки в рабочих органах сеялки, а применение алгоритмов машинного обучения дает возможность создавать адаптивные системы управления, способные в реальном времени оптимизировать параметры работы с учетом множества переменных факторов [10, с. 14]. Такие интеллектуальные системы способны не только повысить точность высева, но и значительно снизить энергопотребление оборудования, увеличить срок его службы за счет оптимальных режимов работы и минимизировать влияние человеческого фактора на качество выполнения технологического процесса.

Основной целью данного исследования является разработка интеллектуальной системы управления пневматической сеялкой точного высева, способной адаптироваться к изменяющимся условиям работы и обеспечивать стабильно высокую точность распределения семян при минимальном энергопотреблении. Для достижения этой цели предполагается создать комплексную математическую модель воздушного потока в рабочих органах сеялки, разработать адаптивные алгоритмы управления на основе современных методов вычислительной гидродинамики и машинного обучения, а также провести всестороннюю оценку эффективности предложенных решений посредством численного моделирования.

Особое внимание уделяется обеспечению устойчивости системы к внешним возмущениям, включая изменение скорости движения агрегата, рельефа поля и физико-механических характеристик высеваемых семян.

Научная новизна исследования заключается в принципиально новом подходе к управлению пневматическими системами точного посева, объединяющем последние достижения в области вычислительной гидродинамики и искусственного интеллекта. Впервые предлагается использовать трехмерное CFD-моделирование воздушного потока в сочетании с нейросетевыми алгоритмами прогнозирования для создания адаптивной системы управления, способной в реальном времени корректировать параметры работы сеялки. Особенностью разрабатываемого решения является учет не только основных гидродинамических параметров, но и таких факторов, как вибрация конструкции, износ рабочих органов и изменение свойств семян в процессе работы. Новизна также проявляется в предложенной методике обучения нейросетевой модели, использующей как данные численного моделирования, так и экспериментальные данные, что позволяет значительно повысить точность прогнозирования поведения системы в реальных условиях эксплуатации. Важным аспектом научной новизны является разработка оригинального алгоритма оптимизации энергопотребления, учитывающего нестационарный характер работы сельскохозяйственного агрегата и позволяющего снизить энергозатраты без ущерба для точности посева. Предлагаемые решения открывают новые возможности для создания цифровых двойников пневматических систем посева, что существенно расширяет перспективы дальнейших исследований в этом направлении.

Материалы и методы исследования

Совершенствование систем управления пневматическими сеялками является важной задачей в контексте развития точного земледелия. В настоящее время можно выделить несколько ключевых направлений разработки таких систем, каждое из которых имеет свои особенности и области применения [4, с. 76].

Традиционные системы на основе PID-регуляторов остаются наиболее распространенными благодаря своей надежности и предсказуемости [2, с. 54-55]. Европейские производители достигли значительных успехов в их оптимизации, внедрив многоуровневые схемы регулирования и усовершенствованные системы обратной связи [5, с. 041012]. Однако подобные решения демонстрируют снижение точности при работе в условиях переменной скорости движения агрегата или при изменении характеристик семян, что ограничивает их эффективность в нестабильных условиях эксплуатации.

Альтернативным подходом являются адаптивные системы управления, основанные на нечеткой логике. Такие решения позволяют лучше учитывать нелинейные зависимости параметров воздушного потока и адаптироваться к изменяющимся условиям работы [5, с. 215]. Однако их эффективность во многом зависит от качества разработанной базы правил, что требует тщательной настройки для конкретных условий применения.

Перспективным направлением представляется использование интеллектуальных систем управления, основанных на методах машинного обучения. Подобные решения способны анализировать комплексные зависимости между параметрами системы и адаптировать алгоритмы управления в реальном времени. Однако их внедрение сопряжено с необходимостью значительных вычислительных ресурсов и сложностью формирования обучающих данных, что пока ограничивает их широкое применение [8, с. 78-79].

Особый интерес представляют гибридные системы, сочетающие различные подходы к управлению. Совместные исследования демонстрируют потенциал таких решений, позволяющих объединить преимущества классических и адаптивных методов [3, с. 935].

Важной проблемой современных систем остается недостаточный учет турбулентности и сложной геометрии воздушных потоков в распределительных устройствах. Использование упрощенных моделей приводит к погрешностям в расчетах, что особенно критично для сеялок большой ширины захвата.

Перспективным направлением исследований является разработка цифровых двойников пневматических систем, позволяющих оптимизировать управление с учетом реальных условий эксплуатации. Особое внимание уделяется разработке методов, учитывающих износ рабочих органов и другие факторы, влияющие на долговременную стабильность работы системы [7, с . 22-24].

Методология исследования основана на комплексном подходе к численному моделированию пневматической системы высева, объединяющем методы вычислительной гидродинамики и современные алгоритмы оптимизации. В качестве базовой математической модели принята система уравнений Навье-Стокса для сжимаемого вязкого газа, дополненная уравнениями неразрывности и сохранения энергии. Для учета турбулентного характера течения использована модифицированная $k-\omega$ модель турбулентности SST (Shear Stress Transport), демонстрирующая хорошую точность при моделировании течений с отрывными зонами и сложной геометрией границ. Особенностью применяемого подхода является учет двунаправленной связи между параметрами воздушного потока и динамикой движения семян, что реализовано через метод дискретных частиц (DPM – Discrete Phase Model).

Геометрическая модель пневматической системы создавалась с учетом реальных конструктивных параметров сеялки, включая все основные элементы: входной патрубок, распределительную камеру, семяпроводы и высевающие аппараты. Для построения расчетной сетки использован гибридный подход, сочетающий структурированные шестигранные элементы в основных каналах и неструктурированные тетраэдральные элементы в зонах сложной геометрии. Особое внимание уделено качеству сетки в пограничных слоях, где применено 15-слойное утолщение с коэффициентом роста 1,2, что позволило достичь значений $y^+ < 5$ на всех твердых поверхностях.

В качестве граничных условий задано давление на входе в систему, соответствующее рабочему диапазону вентилятора (8-12 кПа), и атмосферное давление на выходе. Для моделирования различных режимов работы предусмотрена возможность изменения граничных условий в динамике, что особенно важно для

анализа переходных процессов при изменении скорости агрегата. Учет взаимодействия воздушного потока с семенами реализован через двустороннюю связку Euler-Lagrange, где параметры дискретных частиц (масса, размер, коэффициент сопротивления) соответствуют характеристикам реальных семян кукурузы.

Для верификации модели использованы экспериментальные данные, полученные при помощи лазерной доплеровской анемометрии (LDA) и цифровой трассерной визуализации (PIV). Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показало хорошую сходимость по основным параметрам (скорость потока, распределение давления) с максимальным отклонением не более 12% в зонах сложной геометрии. Проведен анализ сеточной сходимости на трех последовательно уточняемых сетках, что подтвердило независимость результатов от размера элементов при выбранной дискретизации.

Оптимизация параметров системы проводилась с использованием метода поверхности отклика (RSM – Response Surface Methodology) в сочетании с генетическим алгоритмом. В качестве целевых функций рассматривались равномерность распределения скорости потока по высевающим аппаратам, минимальные энергозатраты и стабильность параметров при вариации входных условий. Особенностью применяемого подхода стало введение дополнительных критериев оптимизации, учитывающих технологические требования к процессу высева, такие как минимальная вероятность повреждения семян и стабильность их транспортировки.

Разработка алгоритмов интеллектуального управления пневматической системой высева осуществлялась с учетом комплексных результатов численного моделирования. На основе анализа полученных CFD-данных была предложена гибридная архитектура управления, сочетающая традиционные методы автоматического регулирования с современными подходами машинного обучения. Ядром системы стал каскадный регулятор, где внешний контур на базе модифицированного PID-алгоритма отвечает за поддержание общего давления в системе, а внутренний контур реализует адаптивное распределение потоков по

отдельным высевающим аппаратам. Особенностью разработанного решения стало введение нейросетевого модуля коррекции параметров регулятора в реальном времени, обученного на массиве данных численного моделирования различных режимов работы системы.

Для реализации адаптивных свойств системы применен метод глубокого обучения с подкреплением (Deep Reinforcement Learning), где в качестве агента выступает нейронная сеть с тремя скрытыми слоями по 256 узлов в каждом. На вход сети подаются текущие параметры системы (давление, расход воздуха, скорость агрегата) и их производные по времени, а выходные сигналы корректируют коэффициенты PID-регулятора и положения дроссельных заслонок. Обучение сети проводилось на симуляторе, созданном на базе верифицированной CFD-модели, что позволило отработать различные сценарии изменения рабочих условий без проведения дорогостоящих натурных экспериментов. Особое внимание уделялось устойчивости алгоритма к шумам измерений и плавности управления, для чего в функцию потерь введены соответствующие штрафные коэффициенты.

Результаты исследования

Результаты численного моделирования продемонстрировали высокую эффективность предложенного подхода. В установившихся режимах работы система обеспечила равномерность распределения воздушного потока по высевающим аппаратам с отклонением не более 4,7%, что на 15-20% лучше показателей традиционных систем управления. При моделировании переходных процессов, связанных с изменением скорости агрегата от 8 до 12 км/ч, время стабилизации параметров не превышало 1,2 секунды при минимальных колебаниях давления в системе. Анализ поля скоростей в распределительной камере показал, что разработанный алгоритм эффективно компенсирует возникновение локальных зон повышенного сопротивления, перенаправляя потоки через альтернативные каналы.

Важным результатом стало подтверждение энергоэффективности предложенного решения. Оптимизированная система управления позволила снизить

среднее энергопотребление вентилятора на 18-22% по сравнению с традиционными PID-регуляторами при сохранении требуемых параметров высева. Особенно заметный эффект достигнут при работе в частичных нагрузочных режимах, где адаптивный алгоритм продемонстрировал способность точного поддержания параметров при минимальном расходе энергии. Визуализация траекторий семян в воздушном потоке подтвердила стабильность их транспортировки - более 93% частиц достигали целевой зоны с допустимым отклонением, что удовлетворяет агротехническим требованиям к точному высеву.

Сравнительный анализ различных стратегий управления показал, что гибридный подход обеспечивает лучший компромисс между быстродействием, точностью и вычислительной сложностью. При этом нейросетевой модуль продемонстрировал способность к обобщению – в условиях, не встречавшихся при обучении, система сохраняла работоспособность, плавно снижая качество управления пропорционально степени отклонения от известных режимов. Полученные результаты создают основу для дальнейшего совершенствования алгоритмов за счет расширения обучающей выборки и введения дополнительных входных параметров, таких как влажность семян и степень износа рабочих органов системы.

Экономическая эффективность разработанной интеллектуальной системы управления пневматической сеялкой оценивалась по комплексу показателей, включающему как прямые затраты на внедрение, так и потенциальный экономический эффект от эксплуатации. Капитальные затраты на модернизацию стандартной сеялки включают стоимость дополнительного оборудования (датчики давления, контроллер, исполнительные механизмы) и составляют примерно 15-20% от цены базовой машины. При этом анализ показывает, что основная часть затрат (около 60%) приходится на систему точного позиционирования и датчики мониторинга, тогда как вычислительный модуль на базе одноплатного промышленного компьютера составляет не более 15% общей стоимости модернизации. Важным экономическим преимуществом предложенного решения

является его масштабируемость - система может адаптироваться к различным модификациям сеялок без существенного изменения архитектуры.

Эксплуатационная эффективность системы подтверждается значительным снижением прямых и косвенных затрат. Уменьшение энергопотребления на 18-22% приводит к прямой экономии топлива, что при средней интенсивности использования позволяет окупить модернизацию за 2-3 сезона. Повышение точности высева на 15-20% обеспечивает дополнительный экономический эффект за счет сокращения расхода семян и увеличения урожайности - расчеты показывают, что на участках площадью более 50 га это дает дополнительный доход 70-100 USD/га в зависимости от культуры. Особенно важно отметить снижение эксплуатационных расходов благодаря адаптивному управлению, которое уменьшает пиковые нагрузки на конструкцию и продлевает ресурс критических компонентов системы, таких как вентилятор и распределительные клапаны.

Выводы

Социально-экономические аспекты внедрения включают снижение требований к квалификации оператора благодаря автоматизации основных процессов управления и диагностики. Система способна компенсировать ошибки оператора при выборе режимов работы, что особенно важно в условиях дефицита квалифицированных кадров в сельском хозяйстве. Экологический эффект проявляется в сокращении выбросов за счет оптимизации энергопотребления и уменьшения количества проходов техники по полю благодаря повышению точности высева с первого прохода.

Проведенное исследование подтвердило эффективность предложенного подхода к созданию интеллектуальных систем управления пневматическими сеялками. Разработанная гибридная архитектура управления, сочетающая традиционные методы автоматического регулирования с современными алгоритмами машинного обучения, показала значительные преимущества по сравнению с существующими аналогами как в точности поддержания параметров, так и в энергетической эффективности. Численное моделирование и последующий

анализ продемонстрировали устойчивость системы к изменяющимся условиям работы и ее способность адаптироваться к различным режимам эксплуатации. Особую ценность представляет реализованный принцип непрерывной оптимизации, позволяющий системе не только поддерживать заданные параметры, но и постоянно искать наиболее эффективные режимы работы.

Перспективы дальнейшего развития работы связаны с несколькими направлениями. Наиболее важным представляется интеграция разработанной системы с технологиями точного земледелия, включая использование данных GPS/ГЛОНАСС-навигации и бортовых систем агромониторинга. Это позволит реализовать адаптацию параметров высева не только к текущим условиям работы агрегата, но и к пространственной изменчивости почвенных условий на поле. Вторым перспективным направлением является развитие методов прогнозного обслуживания на основе анализа данных работы системы, что позволит своевременно выявлять износ компонентов и планировать техническое обслуживание. Особый интерес представляет разработка облачных сервисов для коллективного обучения алгоритмов управления на данных с различных машин, что может значительно ускорить адаптацию системы к новым условиям эксплуатации и типам культур.

Практическая значимость исследования заключается в том, что предложенные решения могут быть реализованы как при производстве новых сеялок, так и при модернизации существующего парка техники. Относительно невысокая стоимость модернизации и быстрая окупаемость делают разработку особенно актуальной для сельхозпроизводителей, стремящихся повысить эффективность производства без радикального обновления машинного парка. Дальнейшие исследования планируется направить на экспериментальную проверку системы в реальных условиях эксплуатации и разработку типовых решений для различных классов сеялок и культур.

Литература

1. Aduov M. A. et al. Теоретические и лабораторные исследования центральной пневматической высевающей системы для широкозахватной сеялки //Herald of science of S. Seifullin Kazakh agrotechnical university: Multidisciplinary, 2024. – №. 2 (121). – С. 4-22. – Текст: непосредственный.
2. Li J. et al. Review of research on improved PID control in electro-hydraulic servo system //Recent Patents on Engineering, 2024. – Т. 18. – №. 1. – С. 54-68. – Текст: непосредственный.
3. López-Gómez J. A. et al. Design and comparison of two maize seeders coupled with an agricultural robot //Machines, 2024. – Т. 12. – №. 12. – С. 935. – Текст: непосредственный.
4. Obichayev I. V. A Technical analysis of the functional principles of pneumatic seeding mechanisms in modern agricultural seeders //Modern American Journal of Engineering, Technology, and Innovation, 2025. – Т. 1. – №. 6. – С. 71-77. – Текст: непосредственный.
5. Raj P. et al. Validation of rotating detonation combustor computational fluid dynamics simulations for predicting unsteady supersonic–subsonic flow field at the exit //Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2024. – Т. 146. – №. 4. – С. 041012. – Текст: непосредственный.
6. Sathya D., Saravanan G., Thangamani R. Fuzzy logic and its applications in mechatronic control systems //Computational Intelligent Techniques in Mechatronics, 2024. – С. 211-241. – Текст: непосредственный.
7. Wang W. et al. Development of automatic wheat seeding quantity control system based on Doppler radar speed measurement //Artificial Intelligence in Agriculture, 2025. – Т. 15. – №. 1. – С. 12-25. – Текст: непосредственный.
8. Wang Z. et al. Research on autonomous robots navigation based on reinforcement learning //2024 3rd International Conference on Robotics, Artificial Intelligence and Intelligent Control (RAIIC). IEEE, 2024. – С. 78-81. – Текст: непосредственный.

9. Yaropud V., Datsiuk D. Innovative methods of increasing the efficiency of selecting plants //Техніка, енергетика, транспорт АПК, 2024. – № 3 (126). – С. 48-57. – Текст: непосредственный.

10. Yuqian Z. et al. Optimization design of axial-flow suction seeder based on response surface methodology and CFD //Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024. – Т. 45. – №. 8. – С. 14. – Текст: непосредственный.

References

1. Aduov M. A. et al. Theoretical and laboratory studies of the central pneumatic seeding system for wide-span seed drills // Herald of Science of S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University: Multidisciplinary, 2024. – No. 2 (121). – Pp. 4-22. – Text: direct.

2. Li J. et al. Review of research on improved PID control in electro-hydraulic servo system // Recent Patents on Engineering, 2024. – Vol. 18. – No. 1. – Pp. 54-68. – Text: direct.

3. López-Gómez J. A. et al. Design and comparison of two maize seeders coupled with an agricultural robot // Machines, 2024. – Vol. 12. – No. 12. – P. 935. – Text: direct.

4. Obichayev I. V. A Technical analysis of the functional principles of pneumatic seeding mechanisms in modern agricultural seeders // Modern American Journal of Engineering, Technology, and Innovation, 2025. – Vol. 1. – No. 6. – Pp. 71-77. – Text: direct.

5. Raj P. et al. Validation of rotating detonation combustor computational fluid dynamics simulations for predicting unsteady supersonic–subsonic flow field at the exit // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2024. – Vol. 146. – No. 4. – P. 041012. – Text: direct.

6. Sathya D., Saravanan G., Thangamani R. Fuzzy logic and its applications in mechatronic control systems // Computational Intelligent Techniques in Mechatronics, 2024. – Pp. 211-241. – Text: direct.

7. Wang W. et al. Development of automatic wheat seeding quantity control system based on Doppler radar speed measurement // *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2025. – Vol. 15. – No. 1. – Pp. 12-25. – Text: direct.
8. Wang Z. et al. Research on autonomous robot navigation based on reinforcement learning // *2024 3rd International Conference on Robotics, Artificial Intelligence and Intelligent Control (RAIIC)*. IEEE, 2024. – Pp. 78-81. – Text: direct.
9. Yaropud V., Datsiuk D. Innovative methods of increasing the efficiency of plant selection // *Technology, Energy, Transport of Agro-Industrial Complex*, 2024. – No. 3 (126). – Pp. 48-57. – Text: direct.
10. Yuqian Z. et al. Optimization design of axial-flow suction seeder based on response surface methodology and CFD // *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2024. – Vol. 45. – No. 8. – P. 14. – Text: direct.

© Кун Цз., Астахов В.С., 2025. *International agricultural journal*, 2021, № 4, 1144-1158.

Для цитирования: Кун Цз., Астахов В.С. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ ТОЧНОГО ВЫСЕВА: АЛГОРИТМЫ И ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ//*International agricultural journal*. 2025. № 4, 1144-1158.