

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»,
кандидат технических наук



А.В. Соколов

2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» на диссертационную работу Пополднева Родиона Сергеевича на тему «Разработка конструкции и обоснование параметров измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса.

Актуальность темы диссертационного исследования

Современное состояние агропромышленного комплекса Российской Федерации характеризуется устойчивым ростом животноводческой отрасли, что требует постоянного совершенствования технологических процессов кормоприготовления. Анализ структуры себестоимости животноводческой продукции показывает, что затраты на подготовку кормов достигают 35-45% от общих эксплуатационных расходов, при этом наиболее энергоемкой операцией является измельчение корнеклубнеплодов, потребляющее до 60% энергии от общего объема на кормоприготовление.

Особую значимость проблема приобретает в условиях импортозамещения и необходимости обеспечения продовольственной безопасности страны. В Республике Татарстан, где поголовье крупного рогатого скота превышает 360 тысяч голов, а производство молока достигает 2 млн тонн в год, эффективность кормоприготовления напрямую влияет на рентабельность всего животноводческого комплекса.

Существующее парк измельчительного оборудования, представленное машинами типа ИГК-30Б, ИСК-3А, К-300 и их модификациями, характеризуется рядом существенных недостатков: высокие удельные энергозатраты (до 6-12 кВт·ч/т), несоответствие качества измельчения зоотехническим требованиям (значительное содержание фракций менее 5 мм

и более 30 мм), отсутствие функции смешивания компонентов, что требует применения дополнительного оборудования и увеличивает капитальные затраты.

В связи с вышеизложенным, диссертационная работа Пополднева Р.С., направленная на создание энергоэффективного измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов с научно-обоснованными конструктивными и режимными параметрами, обеспечивающего получение корма требуемого качества при снижении энергозатрат и сохранении питательной ценности, является актуальной и имеет важное народно-хозяйственное значение.

Научная новизна положений, выводов и рекомендаций

Научные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертационной работе Пополднева Р.С., обладают научной новизной. Наиболее значимыми являются следующие результаты:

Разработана новая конструктивно-технологическая схема измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов, отличительной особенностью которой является коническая форма рабочей камеры с многорядным расположением ножей на вертикальном валу с последовательным уменьшением межножевого пространства на 10-20% от верхнего ряда к нижнему. Данное техническое решение обеспечивает многоступенчатое измельчение материала с постепенным доведением размера частиц до требуемых зоотехнических параметров без переизмельчения. Новизна технических решений подтверждена патентами РФ на изобретения № 2760435, № 2788535 и полезную модель № 230912.

Предложена математическая модель процесса измельчения, учитывающая работу резания на каждом ряду ножей, явление скользящего резания и суммарную мощность привода. В отличие от известных моделей, разработанная автором модель позволяет прогнозировать энергозатраты с учетом не только геометрических параметров режущего аппарата, но и физико-механических свойств обрабатываемого материала, что существенно повышает точность инженерных расчетов.

Впервые получены графоаналитические зависимости для определения рациональных параметров лопасти швырялки выгрузной камеры. Автором составлены и численно решены дифференциальные уравнения движения материала по лопасти, учитывающие центробежные и кориолисовы силы инерции, силы трения и геометрию лопасти. Установлено, что для обеспечения минимального времени пребывания материала в выгрузной камере лопасть должна быть загнута против направления вращения с

радиусом кривизны $R = 0,15$ м, что обеспечивает максимальную скорость выгрузки (до 36,56 м/с) и предотвращает залипание рабочей поверхности.

Экспериментально установлены зависимости удельной энергоемкости, пропускной способности и процентного содержания частиц целевой фракции (5-20 мм) от частоты вращения ротора при различных комбинациях рабочих органов. Получены регрессионные уравнения, позволяющие прогнозировать показатели процесса при варьировании режимных параметров.

Выявлена количественная зависимость потерь сока от частоты вращения ротора, что имеет важное значение для сохранения питательной ценности корма. Установлено, что при частотах вращения 1000-1200 мин⁻¹ потери сока находятся в пределах допустимых значений (1,9-2,7%), а увеличение частоты до 1400 мин⁻¹ приводит к росту потерь до 3,94%, приближаясь к критическому уровню.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в развитии научных основ процесса измельчения корнеклубнеплодов в аппаратах с многорядным расположением ножей на вертикальном валу. Разработанные автором аналитические зависимости и математические модели создают теоретическую базу для проектирования нового поколения комбинированных кормоприготовительных машин. Предложенный подход к моделированию движения материала по криволинейной лопасти с учетом кориолисовых сил инерции может быть использован при расчете выгрузных устройств различных центробежных аппаратов в пищевой и перерабатывающей промышленности.

Практическая значимость работы подтверждается созданием лабораторно-производственной установки измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов (Э-ИСК-05), прошедшей успешные производственные испытания в КФХ ИП Имамеевой Ф.М. (Рыбно-Слободский район Республики Татарстан). Внедрение разработанного устройства позволяет:

- повысить производительность труда на 10-15% при подготовке кормосмесей;
- снизить энергоемкость процесса на 5-10%;
- обеспечить содержание целевой фракции корма (5-20 мм) до 88-90%, что соответствует зоотехническим требованиям;
- сократить потери сока до 2,1-2,3%, что способствует сохранению питательной ценности корма и повышению продуктивности животных.

Расчетный годовой экономический эффект от применения разработанного измельчителя-смесителя в сравнении с серийным измельчителем К-300 составляет 199563 рубля при сроке окупаемости капитальных вложений 0,16 лет. Результаты исследований внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет» при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Агроинженерия».

Степень достоверности и обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность научных положений, выводов и практических рекомендаций диссертации Пополднева Р.С. не вызывает сомнений и подтверждается следующими факторами:

Теоретические исследования базируются на фундаментальных законах механики, теории резания, тепломассообмена и диффузионных процессов, что обеспечивает методологическую корректность полученных результатов.

Экспериментальные исследования выполнены с использованием современных аттестованных приборов и оборудования (измерительный комплект К-50, частотный преобразователь, тензометрическая установка, тахометр МЕГЕОН, весы лабораторные ВК-600.1) в соответствии с требованиями действующих ГОСТ (ГОСТ Р 54951-2012, ГОСТ Р 52812-2007, ГОСТ Р 54783-2011, ГОСТ ISO 6498-2014, ГОСТ 7194-81).

Достаточный объем экспериментальных данных и их статистическая обработка с использованием методов математической статистики и дисперсионного анализа обеспечивают высокую достоверность полученных результатов.

Хорошая сходимость теоретических и экспериментальных данных (расхождение не превышает 15%) подтверждает адекватность разработанных математических моделей реальному процессу измельчения.

Положительные результаты производственных испытаний, подтвержденные соответствующими актами внедрения, свидетельствуют о практической реализуемости разработанных технических решений.

Основные положения диссертации опубликованы в 16 научных работах, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, включенных в Перечень ВАК, 1 статья в издании, входящем в реферативную базу Scopus, и 3 патента РФ на изобретения и полезную модель. По своему содержанию публикации автора полностью соответствуют теме диссертационной работы.

Рекомендации по использованию результатов

Результаты диссертационной работы Пополднева Р.С. рекомендуется использовать:

На предприятиях агропромышленного комплекса: при оснащении кормоприготовительных цехов животноводческих ферм и комплексов, особенно в условиях малых фермерских хозяйств. Разработанный измельчитель-смеситель Э-ИСК-05 может найти применение для подготовки корнеклубнеплодов к скармливанию крупному рогатому скоту, а также для приготовления комбинированных кормосмесей.

В проектных и конструкторских организациях: при разработке новых и модернизации существующих конструкций измельчителей кормового сырья. Предложенные математические зависимости и методики расчета могут быть использованы для обоснования параметров подобного оборудования, а разработанный алгоритм численного расчета – для оптимизации конструктивных параметров на стадии проектирования.

В научно-исследовательских учреждениях: при проведении исследований в области механизации процессов кормоприготовления и создания энергоэффективного оборудования для АПК.

В учебном процессе аграрных вузов: при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Агроинженерия» в курсах «Технологическое оборудование для переработки продукции растениеводства и животноводства», «Техника и технологии для животноводства», «Механизация и автоматизация технологических процессов в животноводстве», а также при выполнении курсовых и дипломных проектов.

Оценка структуры и содержания работы

Диссертационная работа Пополднева Родиона Сергеевича на тему «Разработка конструкции и обоснование параметров измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов» состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 174 страницах, включающих 46 рисунков и 18 таблиц. В приложениях представлены программа численного расчета, показания измерительных приборов, результаты фракционного анализа, акты внедрения и производственных испытаний, патенты. Структура работы логична и полностью соответствует поставленным цели и задачам исследования.

Во введении автором обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология исследования и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса» представлен глубокий и всесторонний анализ современного состояния проблемы. Автором подробно рассмотрено значение корнеклубнеплодов в кормлении сельскохозяйственных животных, проанализированы их химический состав и питательная ценность. Представлена классификация способов обработки кормов, проведен обзор существующих конструкций измельчителей (ИГК-30Б, ИСК-3А, ИРМ-50, МУИК-10, К-300 и др.) с подробным анализом их достоинств и недостатков. Проанализированы теоретические исследования процесса измельчения, выполненные ведущими учеными в этой области (В.П. Горячкин, В.А. Желиговский, Н.Е. Резник, С.В. Мельников, В.И. Курдюмов и др.). Рассмотрены классические теории измельчения (Риттингера, Кирпичева-Кика, Бонда) и их применимость к расчету энергозатрат при измельчении кормового сырья. На основе проведенного анализа автором четко сформулированы направления собственных исследований.

Во второй главе «Теоретические исследования процесса измельчения кормов и обоснование параметров измельчителя-смесителя» представлена разработанная автором конструктивно-технологическая схема измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов (рисунок 2.1). Подробно описаны все основные элементы конструкции: коническая рабочая камера (1), приемный бункер (2), измельчающие ножи (3) на вертикальном валу (4), поворотные направляющие пластины (5), противорезы (6) на внутренней поверхности рабочей камеры, выгрузная камера (7) с лопастной швырлялкой (8). Обоснованы основные конструктивные параметры: коническая форма камеры обеспечивает свободное перемещение материала к выгрузному устройству без переизмельчения; уменьшающийся шаг между ножами (10-20%) обеспечивает последовательное уменьшение размера частиц; поворотные направляющие пластины с углом установки 0-90° позволяют регулировать интенсивность процесса и время пребывания материала в рабочей зоне.

Теоретическая часть включает:

Определение пропускной способности (формулы 2.1-2.5). Установлено, что пропускная способность разработанного измельчителя-смесителя составляет 1,1-2,4 т/ч при угловой скорости ротора $\omega = 16,5-50 \text{ с}^{-1}$.

Анализ энергоемкости процесса (формулы 2.6-2.29): получены выражения для определения работы резания на каждом ряду ножей (A_i), суммарной работы всех ножей за один оборот ($A_{\text{сум}}$), мощности сил резания ($W_{\text{рез.сум}}$) и мощности на разгон материала (W_m). Установлено, что мощность на привод измельчителя-смесителя изменяется в диапазоне 1,15-6,9 кВт·с/кг.

Разработку алгоритма и программы численного расчета параметров на языке C# в среде Microsoft Visual Studio (приложение А). Программа позволяет проводить численное моделирование и оценку влияния широкого спектра конструктивных и режимных параметров на итоговые показатели производительности и энергозатрат.

Теоретическое обоснование формы лопасти швырялки выгрузной камеры (раздел 2.5). Автором составлены дифференциальные уравнения движения материала по лопасти (2.30-2.47) для двух вариантов исполнения: лопасти, загнутой по направлению вращения (вогнутые), и лопасти, загнутой против направления вращения (выпуклые). Уравнения учитывают центробежные и кориолисовы силы инерции, силы трения, нормальные реакции и геометрию лопасти. Численное решение уравнений позволило получить графические зависимости (рисунки 2.6-2.7), на основе которых определены рациональные параметры: для обеспечения максимальной скорости выгрузки (36,56 м/с) лопасть должна быть загнута против направления вращения с $R = 0,15$ м.

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований» представлена подробная программа исследований, включающая 6 основных этапов (рисунок 3.1). Подробно описаны измерительные приборы и оборудование (таблица 3.1): весы лабораторные ВК-600.1, весы электронные Universal Mart, штангенциркуль ШЦ-1, сушильный шкаф 2В-151, секундомер TORRES, установка для определения усилия резания, тахометр МЕГЕОН 18003, измерительный комплект К-50, частотный преобразователь, угломер электронный ELITECH и др.

Разработаны и подробно описаны частные методики:

Методика определения коэффициента трения (раздел 3.3.2) с использованием прибора «наклонная плоскость»;

Методика исследования параметров резания (раздел 3.3.3) на специально сконструированной тензометрической установке;

Методика исследования влияния режимов работы (раздел 3.4) с использованием планирования многофакторного эксперимента;

Методика определения потери сока (раздел 3.7) гравиметрическим методом.

Для проведения экспериментов изготовлены сменные рабочие органы: роторы с различным количеством рядов ножей, измельчающие ножи, противорежущие ножи, направляющие пластины, швырялки с различным направлением изгиба лопастей (рисунки 3.8-3.11).

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований и их анализ» представлены основные экспериментальные данные.

Физико-механические свойства картофеля (раздел 4.1): установлен диапазон влажности 74,21-80,69%, геометрические размеры: диаметр 35-65 мм, длина 55-100 мм.

Удельная работа резания (раздел 4.2, таблица 4.3, рисунок 4.1): выявлена прямая зависимость удельной работы резания от толщины ножа. Увеличение толщины ножа с 1 до 5 мм приводит к росту удельной работы резания с 551,67 до 12221,64 Дж/м², т.е. более чем в 22 раза. Получена эмпирическая зависимость: увеличение толщины лезвия на 1 мм приводит к 4,4-кратному росту удельной работы резания.

Коэффициенты трения (раздел 4.3, таблицы 4.4-4.5): определены углы и коэффициенты трения скольжения, качения и опрокидывания для клубней разного размера. Коэффициент трения скольжения варьируется от 0,86 до 1,11, коэффициент трения качения – от 0,14 до 0,18, коэффициент трения опрокидывания – от 0,36 до 0,43.

Удельная энергоёмкость и производительность (раздел 4.4, таблица 4.6, рисунки 4.2-4.5): исследованы четыре комбинации рабочих органов при частотах вращения 800, 1000, 1200 и 1400 мин⁻¹.

Установлено, что увеличение частоты вращения выше 1200 мин⁻¹ приводит к экспоненциальному росту удельной энергоёмкости и снижению производительности, что свидетельствует о наличии оптимального диапазона 1000-1200 мин⁻¹.

Фракционный состав (раздел 4.5): исследовано распределение частиц по фракциям (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-30 мм). Установлено, что с ростом частоты вращения увеличивается степень измельчения и доля мелких фракций (0-5 мм), при этом снижается доля крупных фракций (20-30 мм).

Содержание целевой фракции 5-20 мм (рисунки 4.10-4.13): наилучшие показатели достигаются при частоте вращения 1200 мин⁻¹. Максимальное значение (88,87%) получено при комбинации «8 рядов ножей + лопасть швырялки, загнута против направления вращения».

Потери сока (раздел 4.6, таблица 4.9, рисунок 4.14): выявлена тенденция к увеличению потерь сока с ростом частоты вращения. При 800 мин⁻¹ потери составляют 1,0%, при 1000 мин⁻¹ – 1,99%, при 1200 мин⁻¹ – 2,27%, при 1400 мин⁻¹ – 3,94%. Сравнение с литературными данными

показывает, что при частотах вращения 1000-1200 мин⁻¹ потери сока находятся в пределах допустимых значений (1,9-2,7%), а при 1400 мин⁻¹ приближаются к критическому уровню.

В пятой главе «Оценка эффективности работы измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов» представлены результаты производственных испытаний и технико-экономического обоснования.

Производственные испытания (раздел 5.1) проведены в КФХ ИП Имамеевой Ф.М. (Рыбно-Слободский район Республики Татарстан) в период с 12.04.2025 по 07.05.2025. Испытания подтвердили работоспособность и эффективность разработанного измельчителя-смесителя:

- производительность: 0,42-0,58 т/ч;
- степень измельчения: 4,5;
- однородность продукта: до 90%;
- потери сока: не более 2,1%.

Замечания по диссертационной работе

1. В работе экспериментально определена влажность картофеля (74,21-80,69%), однако не исследовано влияние данного фактора на эффективность процесса измельчения при различных комбинациях рабочих органов. Учитывая, что влажность корнеклубнеплодов может существенно варьироваться в зависимости от сорта, условий хранения и сезона, целесообразно было бы провести дополнительные исследования для установления корректировочных коэффициентов к энергозатратам и качественным показателям.

2. В диссертации подробно исследованы технологические аспекты процесса измельчения, однако не рассмотрены вопросы долговечности и износостойкости режущих элементов. Для практического внедрения разработки важно оценить ресурс ножей при рекомендуемых режимах работы, определить периодичность их заточки или замены, а также предложить мероприятия по повышению износостойкости (выбор материалов, покрытия, термообработка).

3. Экспериментальные исследования проведены на лабораторно-производственной установке с ограниченными размерами рабочей камеры. Для обоснования возможности масштабирования полученных результатов на промышленные образцы большей производительности следовало бы привести критерии подобия или дополнительные расчеты, подтверждающие сохранение эффективности при увеличении геометрических размеров.

4. В работе исследовано влияние толщины ножа на удельную работу резания, однако не рассматривалось влияние формы режущей кромки и угла заточки на эффективность процесса. Эти факторы могут существенно влиять как на энергоемкость, так и на качество измельчения, и их оптимизация представляет самостоятельный научный и практический интерес.

5. При определении потерь сока (раздел 3.7) использован гравиметрический метод с выдержкой измельченной массы в марлевых мешках в течение 120 минут. Однако не указано, учитывалось ли влияние температуры и влажности окружающей среды на скорость выделения сока, а также не приведены данные о воспроизводимости результатов при повторных измерениях.

6. В математической модели процесса измельчения (формулы 2.6-2.29) используются усредненные физико-механические характеристики материала (предел прочности σ_p , модуль упругости E , коэффициент трения f), принимаемые постоянными. Однако корнеклубнеплоды обладают неоднородной внутренней структурой, и их свойства могут существенно различаться в зависимости от направления резания (вдоль или поперек волокон). Учет этой неоднородности мог бы повысить точность прогнозирования энергозатрат и объяснить наблюдаемый в экспериментах разброс значений удельной энергоемкости (таблица 4.6).

7. При проведении производственных испытаний (раздел 5.1) не указана продолжительность непрерывной работы оборудования, а также не зафиксированы возможные отказы или сбои в работе. Для оценки эксплуатационной надежности разработанной машины целесообразно было бы провести более длительные испытания с фиксацией наработки на отказ и коэффициента технического использования.

8. В работе не представлены результаты исследования шумовых и вибрационных характеристик разработанного измельчителя-смесителя. Для оборудования, предназначенного для работы в условиях животноводческих ферм, эти показатели важны с точки зрения безопасности и комфорта обслуживающего персонала, а также соответствия санитарным нормам.

9. При определении рациональных режимных параметров автор ограничился частотой вращения ротора до 1400 мин^{-1} . Однако из представленных графиков (рисунки 4.2-4.5) видно, что при 1400 мин^{-1} энергоемкость резко возрастает, но не ясно, сохраняется ли эта тенденция при дальнейшем увеличении частоты вращения. Исследование более широкого диапазона частот позволило бы выявить дополнительные резервные режимы работы.

10. В диссертации отсутствует сравнительный анализ разработанного измельчителя-смесителя с аналогичными по функционалу зарубежными образцами. Такой анализ позволил бы объективно оценить конкурентоспособность разработки и определить ее место на рынке кормоприготовительной техники.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы, не влияют на ее научную и практическую значимость и носят рекомендательный характер для дальнейших исследований.

Заключение

Диссертационная работа Пополднева Родиона Сергеевича на соискание ученой степени кандидата технических наук является самостоятельным завершенным научным трудом, в котором решена актуальная научно-техническая задача – повышение эффективности процесса измельчения корнеклубнеплодов путем создания и обоснования параметров энергосберегающего измельчителя-смесителя, обеспечивающего требуемое зоотехническими нормами качество корма при снижении энергозатрат и сохранении питательной ценности.

По объему, новизне и значимости результатов диссертационная работа соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук. Содержание диссертации сформулировано на основе опубликованных автором научных трудов, что подтверждает достоверность выдвинутых на защиту теоретических и практических рекомендаций. Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям представленной диссертации.

Диссертационная работа и автореферат соответствуют паспорту научной специальности 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса, а именно:

п. 2 «Теория и методы технологического воздействия на объекты сельскохозяйственного производства (почву, растения, животных, зерно, молоко и др.)» (пункты 2, 3 научной новизны);

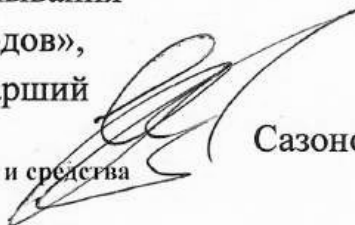
п. 4 «Механизированные, автоматизированные и роботизированные технологии и технические средства для агропромышленного комплекса» (пункт 1 научной новизны);

п. 6 «Методы и средства оптимизации технологий, параметров и режимов работы машин и оборудования» (пункт 4 научной новизны).

Таким образом, по актуальности и объему выполненных исследований, научной новизне, достоверности, теоретической и практической значимости полученных результатов и выводов диссертационная работа Пополднева Р.С. на тему: «Разработка конструкции и обоснование параметров измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов» соответствует критериям, которым должна отвечать диссертация на соискание ученой степени кандидата наук, изложенным в п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (в текущей редакции), предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса.

Диссертационная работа и автореферат были рассмотрены на заседании лаборатории «Машинные технологии для возделывания и уборки картофеля и корнеплодов» федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», протокол № 3 от «17» марта 2026 г.

Заведующий лабораторией
«Машинных технологий возделывания
и уборки картофеля и корнеплодов»,
кандидат технических наук, старший
научный сотрудник
(по специальности 05.20.01 – Технологии и средства
механизации сельского хозяйства)



Сазонов Николай Викторович

Подпись Н.В. Сазонова заверяю:

Ученый секретарь
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ,
кандидат технических наук



Ещин Александр Вадимович

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
"Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ" (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ)
109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, дом 5
Телефоны: 8 (499) 171-43-49; 171-19-33; факс 8 (499)-171-43-49
E-mail: vim@vim.ru
Официальный сайт: <http://vim.ru>

Вход. № 05-8863
« 31 » 03 2026 г.
подпись *Яс*