ВСЕРОССИЙСКИЙ ТИМИРЯЗЕВСКИЙ КОНКУРС НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ, ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ МОЛОДЕЖИ В СФЕРЕ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

«АПК – МОЛОДЕЖЬ, НАУКА, ИННОВАЦИИ»

Направление: ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Тема: Средообразующая и газозащитная роль лесных насаждений в экосистемах агропромышленного комплекса

Соискатель: студенты 2 курса очного отделения 252, 254 групп
Пыленок Даниил, Трефилов Денис

Научный руководитель: Ашанова Наталья Михайловна

Место выполнения работы: Государственное бюджетное профессиональное образовательное учреждение Московской области «Орехово-Зуевский железнодорожный техникум имени В.И. Бондаренко»

г. Орехово-Зуево

2026 г.

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена исследованию средообразующих, газопоглотительных и кислородопродуцирующих функций лесных насаждений в условиях техногенной и антропогенной нагрузки на территориях агропромышленного комплекса (АПК).

В исследовании проведён детальный анализ основных источников загрязнения воздушной среды в аграрном секторе (машинно-тракторный парк, крупные животноводческие комплексы, элеваторы и предприятия первичной переработки сельхозсырья). Рассмотрены физиологические механизмы поглощения токсичных газов (оксидов углерода, азота, серы, аммиака) и осаждения мелкодисперсной пыли листовым аппаратом различных древесных пород.

Дана сравнительная эколого-биологическая оценка газоустойчивости и санитарно-гигиенической эффективности лиственных и хвойных пород деревьев. Особое внимание уделено практическим аспектам агролесомелиорации: оптимизации конструкций полезащитных лесополос и созданию зелёных санитарно-защитных зон вокруг объектов животноводства для дезодорации и биологической фильтрации воздуха. Сформулированы научно обоснованные рекомендации по подбору ассортимента пород для устойчивого эколого-мелиоративного обустройства агроландшафтов.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ....3
Глава 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СРЕДООБРАЗУЮЩЕЙ РОЛИ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ В АГРОЛАНДШАФТАХ....6
Глава 2. ГАЗОПОГЛОТИТЕЛЬНАЯ И КИСЛОРОДОПРОДУЦИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ДРЕВЕСНЫХ ПОРОД. 11
Глава 3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ И РАЗМЕЩЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ НАСАЖДЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИЯХ АПК 18
ВЫВОДЫ....24
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 26
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ....27

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Современное развитие агропромышленного комплекса (АПК) неразрывно связано с интенсификацией производственных процессов, концентрацией поголовья на крупных животноводческих и птицеводческих комплексах, масштабной химизацией земледелия и эксплуатацией тяжелого машинно-тракторного парка. Данные факторы неизбежно влекут за собой усиление техногенного давления на компоненты природной среды, и в первую очередь — на приземный слой атмосферного воздуха. Специфические выбросы аграрного сектора, включающие аммиак, сероводород, метан, оксиды углерода и азота, пестицидные аэрозоли и минеральную пыль, не только ухудшают экологическую обстановку сельских территорий и условия труда работников, но и оказывают деструктивное воздействие на биологическую продуктивность самих агроэкосистем.

В решении задач экологической стабилизации агроландшафтов решающая роль принадлежит защитным лесным насаждениям. Являясь мощными природными биофильтрами, деревья и кустарники выполняют ключевые средообразующие функции: они аккумулируют токсичные газы, механически задерживают пылевые частицы, продуцируют кислород, ионизируют воздушную среду и оптимизируют локальный микроклимат полей.

В условиях современных климатических изменений и ужесточения экологических стандартов актуализируется необходимость научного обоснования подбора устойчивых древесных пород-фиторемедиантов и оптимизации конструкций защитных лесных полос и санитарно-защитных зон объектов АПК.

Степень разработанности темы. Фундаментальные основы учения о защитном лесоразведении и агролесомелиорации были заложены в классических трудах В. В. Докучаева, Г. Н. Высоцкого, А. С. Козменко и развиты современными исследователями Всероссийского научно-исследовательского агролесомелиоративного института (ВНИАЛМИ). Вопросы физиологии газоустойчивости, поглотительной способности и фотосинтетической активности древесных растений подробно исследовались в работах В. С. Николаевского, Ю. З. Кулагина, Х. Г. Даутова и других ученых.

Тем не менее, в подавляющем большинстве существующих исследований средозащитные свойства древесных пород рассматривались применительно к урбанизированным территориям и зонам влияния тяжелой промышленности. Проблематика дифференцированного подбора древесных пород с высокой поглотительной способностью по отношению к специфическим поллютантам аграрного сектора (в частности, аммиаку и органическим дурнопахнущим газам), а также количественной оценки их кислородопродуцирующей роли в структуре агроэкосистем требует комплексного обобщения и углубленного анализа.

Проблема исследования заключается в объективном противоречии между возрастающей техногенной и газовой нагрузкой на воздушный бассейн в зонах концентрации объектов агропромышленного производства и недостаточной эффективностью существующих защитных насаждений, ассортимент которых нередко формировался без учета физиологических механизмов детоксикации воздуха и газопоглотительного потенциала конкретных древесных пород.

Объектом исследования являются защитные лесные насаждения различного функционального назначения (полезащитные полосы, санитарно-защитные зоны ферм и перерабатывающих производств) в структуре экосистем агропромышленного комплекса.

Предметом исследования выступают средообразующие, газозащитные, пылеосаждающие и кислородопродуцирующие функции древесных пород, определяющие эффективность биологической очистки воздуха в агроэкосистемах.

Цель работы - исследовать средообразующую и газозащитную роль лесных насаждений в экосистемах АПК и обосновать принципы формирования устойчивого породного ассортимента для детоксикации воздушной среды и оптимизации микроклимата сельских территорий.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие взаимосвязанные задачи:

1. Изучить теоретические основы средообразующего значения лесных полос и массивов в структуре антропогенно преобразованных агроландшафтов.

2. Охарактеризовать основные источники и спектр загрязняющих веществ, поступающих в атмосферный воздух от объектов растениеводства, животноводства и перерабатывающей промышленности АПК.

3. Исследовать эколого-физиологические механизмы поглощения токсичных газов (CO_2, SO_2, NO_x, NH_2) и механического осаждения пылевых аэрозолей ассимиляционным аппаратом древесных растений.

4. Провести сравнительную оценку газоустойчивости, биохимической активности и интенсивности продуцирования кислорода основными лесообразующими породами.

5. Оценить санитарно-гигиеническую и микроклиматическую эффективность полезащитных лесополос и зеленых барьеров вокруг животноводческих комплексов.

6. Разработать научно-прикладные рекомендации по подбору ассортимента древесных пород и пространственному размещению насаждений для экологической реабилитации агропромышленных зон.

Гипотеза исследования базируется на предположении о том, что создание многоярусных, биологически устойчивых лесных насаждений из комбинации быстрорастущих пород с развитой листовой поверхностью и видов с высокой метаболической толерантностью к аграрным токсикантам позволяет существенно повысить газофильтрационную емкость насаждений, нейтрализовать специфические запахи и выбросы аммиака, а также обеспечить максимальную генерацию кислорода на прилегающих территориях АПК.

Методы исследования. В работе использован комплекс общенаучных и специальных эколого-биологических методов:

1. Теоретический и сравнительно-аналитический метод — при изучении фундаментальной литературы, нормативных баз и результатов натурных наблюдений;
2. Системно-экологический подход — для рассмотрения защитных лесных полос как неотъемлемого функционального элемента агроэкосистемы;
3. Метод эколого-физиологической классификации — при распределении древесных пород по группам газоустойчивости и поглотительной емкости;
4. Метод сравнительного анализа баланса фотосинтеза, эмиссии кислорода и деструкции поллютантов.

Практическая значимость работы заключается в возможности непосредственного применения ее результатов при разработке проектов агролесомелиоративного обустройства сельскохозяйственных угодий, проектировании санитарно-защитных зон вокруг животноводческих комплексов, птицефабрик, навозохранилищ и элеваторов, а также при подготовке региональных нормативов и рекомендаций по озеленению сельских поселений и объектов АПК.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СРЕДООБРАЗУЮЩЕЙ РОЛИ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ В АГРОЛАНДШАФТАХ

1.1. Понятие и структура экосистем агропромышленного комплекса (АПК)

Современное сельскохозяйственное производство функционирует в рамках специфических природно-антропогенных комплексов — агроэкосистем (агроландшафтов). В отличие от климаксных естественных биогеоценозов (лесов, степей, естественных лугов), характеризующихся замкнутыми биогеохимическими циклами и высокой способностью к саморегуляции, агроэкосистемы представляют собой искусственно созданные, незамкнутые и метаболически нестабильные экологические системы. Их морфологическая структура, энергетический баланс и видовое разнообразие жестко подчинены главной цели сельскохозяйственного производства — максимизации выхода целевой биомассы (зерна, технических культур, кормов, продукции животноводства).

Структурная организация экосистем агропромышленного комплекса носит гетерогенный и пространственно дифференцированный характер. В ее составе принято выделять три ключевых функциональных блока, тесно связанных потоками вещества, энергии и антропогенного воздействия:

1. Агробиоценозы (полевой сектор). Пахотные земли, сенокосы, пастбища и многолетние насаждения. Они занимают наибольшую площадь агроландшафта и характеризуются предельно обедненным флористическим и фаунистическим составом (монокультуры), периодическим сведением естественного растительного покрова в процессе обработки почвы и регулярным изъятием биогенных элементов вместе с отчуждаемым урожаем.

2. Промышленно-урбанизированные и технологические узлы АПК. Объекты концентрированного антропогенного воздействия: животноводческие и птицеводческие комплексы промышленного типа, комбикормовые заводы, элеваторы, механизированные зернотока, тепличные хозяйства, автотракторные парки, склады минеральных удобрений и ядохимикатов, площадки навозохранилищ (лагуны), а также предприятия первичной переработки сельскохозяйственного сырья (сахарные, спиртовые, молочные и консервные заводы). Этот сектор выступает мощным эпицентром эмиссии загрязняющих веществ в биосферу.

3. Экологический каркас агроландшафта (средостабилизирующий сектор). Включает естественные лесные массивы, гидрографическую сеть, овражно-балочные комплексы, луговые неудобья и искусственные защитные лесные насаждения различного назначения.

Главное фундаментальное противоречие современной агроэкосистемы заключается в нарушении энергетического и вещественного равновесия. Чтобы поддерживать гомеостаз и высокую продуктивность пашни при непрерывном выносе биомассы, человек вынужден непрерывно закачивать в агроэкосистему колоссальные объемы антропогенной субсидиарной энергии: минеральные удобрения, пестициды, тяжелую дизельную технику, поливную воду.

Однако низкое внутреннее биологическое разнообразие агробиоценозов делает их предельно уязвимыми перед абиотическими стрессами (засухи, суховеи, дефляция, водная эрозия) и резко снижает их естественную буферную емкость по отношению к газопылевому загрязнению. В связи с этим возникает острая необходимость включения в структуру АПК искусственных биогенных компенсаторов, способных перехватывать, связывать и утилизировать экотоксиканты, а также формировать благоприятный локальный микроклимат.

Именно защитные лесные насаждения являются структурным ядром экологического каркаса, переводящим нестабильный агробиоценоз в устойчивую, экологически сбалансированную и высокопродуктивную адаптивно-ландшафтную систему.

1.2. Источники антропогенного воздействия на атмосферный воздух в АПК

Сельскохозяйственное производство исторически воспринималось как экологически чистая отрасль. Однако переход агропромышленного комплекса на индустриальные рельсы привел к тому, что сегодня аграрный сектор выступает одним из крупнейших источников загрязнения приземного слоя атмосферы специфическими токсикантами, парниковыми газами и дисперсными аэрозолями. Анализ техногенного давления на воздушный бассейн в АПК позволяет систематизировать основные источники эмиссии по характеру технологических процессов и спектру выделяемых поллютантов.

Машинно-тракторный парк и технологические операции в полеводстве. Эксплуатация тяжелой дизельной техники (тракторы тяговых классов от 1,4 до 8, зерноуборочные и кормоуборочные комбайны, самоходные опрыскиватели, грузовой автотранспорт) формирует постоянный факел выбросов продуктов неполного сгорания моторного топлива. В состав выхлопных газов входят:

1. Оксид углерода (CO);
2. Диоксид и оксиды азота (NO_2);
3. Оксиды серы (SO_2);
4. Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ, включая бензапирен);
5. Мелкодисперсная сажа (размером $PM_{2,5}$ и PM_{10}), обладающая высокой адсорбционной активностью по отношению к токсичным радикалам.

Помимо моторных выхлопов, масштабные агротехнические работы (глубокая вспашка отвальными плугами, культивация, дискование, боронование, сев) в засушливые периоды года вызывают интенсивную ветровую эрозию и дефляцию верхнего гумусированного горизонта почв. В атмосферу поднимаются гигантские объемы минеральной почвенной пыли, которая не только ухудшает прозрачность атмосферы, но и служит переносчиком остаточных количеств гербицидов и инсектицидов на десятки километров.

Химическая защита растений сопровождается мелкокапельным распылением пестицидов. Из-за турбулентности воздуха и высокой температуры до 15–30% активного действующего вещества препаратов (фосфорорганические соединения, пиретроиды, неоникотиноиды) подвергается ветровому сносу и испарению, образуя стойкие токсичные аэрозольные шлейфы в приземном слое воздуха.

Крупные комплексы промышленного животноводства и птицеводства. Крупные свинокомплексы (на 54–108 тыс. голов и более), комплексы по откорму крупного рогатого скота и бройлерные птицефабрики являются мощными точечно-площадными источниками концентрированного газового и микробиологического загрязнения.

Воздухообмен животноводческих помещений обеспечивается мощными приточно-вытяжными вентиляционными системами, выбрасывающими в атмосферу отработанный воздух, насыщенный продуктами метаболизма животных и анаэробного разложения навоза и помета:

1. Аммиак (NH_3) — ключевой аграрный газовый поллютант. Концентрация аммиака в факеле вентиляционных шахт и над открытыми навозохранилищами (лагунами) способна в десятки раз превышать предельно допустимые концентрации ($ПДК_{м.р}$). Аммиак вызывает закисление осадков, ожоги ассимиляционных органов растений и угнетение почвенной биоты.

2. Сероводород (H_2S) и меркаптаны — высокотоксичные сернистые соединения с резким неприятным запахом, образующиеся при бактериальном распаде серосодержащих аминокислот навозных стоков в анаэробных условиях.

3. Метан (CH_4) и закись азота (N_2O) — мощнейшие парниковые газы, чей потенциал глобального потепления в 28 и 265 раз соответственно превышает аналогичный показатель диоксида углерода (CO_2). Выделяются в процессах энтеральной ферментации у жвачных животных и ферментации жидкого навоза.

4. Летучие органические соединения (ЛОС) — летучие жирные кислоты (масляная, пропионовая, валериановая), фенолы, крезолы, скатол и индол. Данный комплекс веществ формирует стойкую зону дурнопахнущих газов (одорантов), распространяющуюся от животноводческих комплексов по розе ветров на расстояние до 3–5 км, вызывая острый санитарно-гигиенический дискомфорт у населения прилегающих поселков.

5. Биологические аэрозоли — споры плесневых грибов, бактерии, эндотоксины и частицы шерсти, пера и комбикорма, способные вызывать аллергизацию и токсикозы у живых организмов.

Перерабатывающие и складские предприятия АПК. Хранение и первичная переработка урожая сопряжены со специфическими выбросами:

1. Элеваторы, мельничные комбинаты и крупяные заводы выбрасывают огромные объемы взрывоопасной и фиброгенной органической пыли (зерновой, мучной, шелухи), которая забивает устьичный аппарат близлежащих дикорастущих растений.

2. Сахарные заводы (особенно в сезон переработки свеклы — «сезон сахароварения») выделяют в атмосферу миллионы кубических метров дурнопахнущих газов с полей фильтрации (жом, барда), насыщенных диоксидом серы, сероводородом и аммиаком.

Масштаб и токсикологическая специфика аграрных выбросов делают атмосферу сельских территорий зоной повышенного экологического риска, требующей формирования долговременных барьеров биофильтрации.

1.3. Средозащитные функции лесных насаждений: классификация и экосистемное значение

Лесные насаждения в структуре агропромышленного комплекса представляют собой специализированную категорию защитных лесов. Они создаются искусственным путем или сохраняются в виде естественных фрагментов с целью целенаправленного преобразования неблагоприятных природных и техногенных факторов среды.

В прикладной экологии и агролесомелиорации совокупность средообразующих функций древесных насаждений классифицируется по ведущему вектору их биогеоценотического воздействия:

1. Газопоглотительная и детоксикационная функция

Древесные растения выступают в роли гигантских «живых фильтров» непрерывного действия. В отличие от технических пылегазоочистных сооружений, обладающих ограниченным ресурсом и требующих энергетических затрат, лесные фитоценозы функционируют за счет солнечной энергии. Листовой и хвойный полог осуществляет:

• поглощение молекул токсичных газов через устьичный аппарат с последующим включением их компонентов в метаболические циклы клетки (ассимиляция серы и азота);

• химическую нейтрализацию токсикантов в клеточном соке за счет буферных свойств цитоплазмы и ферментных антиоксидантных систем;

• связывание и консервацию тяжелых металлов в тканях коры, древесины и листового опада.

2. Пылеосаждающая и механическая фильтрующая функция. Крона деревьев и кустарников обладает развитой площадью поверхности. Суммарная площадь листьев сомкнутого древостоя в 5–12 раз превышает площадь проекции кроны на землю (индекс листовой поверхности LAI = 5–12). За счет резкого снижения скорости ветрового потока при прохождении через кроны создаются гидродинамические условия для гравитационного осаждения взвешенных частиц. Кроме того, микрорельеф кутикулы листа (опушение, восковой налет, смолистые выделения) способствует захвату пыли, которая удерживается на кроне до момента смыва ливневыми осадками в подкроновое пространство, где связывается лесной подстилкой.

3. Кислородопродуцирующая и климаторегулирующая функция. В процессе фотосинтеза древесные насаждения депонируют углерод атмосферного углекислого газа (CO_2), консервируя его в стабильной форме лигноцеллюлозного комплекса древесины на десятилетия, и взамен выделяют эквивалентное количество свободного молекулярного кислорода (O_2). Один гектар средневозрастного защитного леса поглощает за вегетационный период до 8–10 т углекислоты и эмитирует до 6–8 т кислорода, обогащая обедненный воздух агроландшафтов.

4. Ветрозащитная и микроклиматическая функция. Лесные полосы трансформируют ветровой режим полей. Снижая скорость ветра в приземном слое на 30–50% на защищаемом расстоянии (до 25–30 высот древостоя, 25–30H), полосы предотвращают иссушение почвы, снижают транспирацию сельхозкультур, устраняют пыльные бури и способствуют равномерному распределению снежного покрова в зимний период. Это повышает запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы на 25–40 мм и обеспечивает прибавку урожайности зерновых культур на 15–25%.

5. Фитонцидная и бактерицидная функция. Многие лесообразующие породы (особенно хвойные — сосна, можжевельник, лиственница, а также береза, черемуха, тополь) выделяют летучие биологически активные вещества — фитонциды (терпены, эфирные масла, альдегиды). Фитонциды обладают ярко выраженным бактериостатическим и бактерицидным действием, подавляя развитие патогенной микрофлоры, спор грибов и бактерий, переносимых воздушными массами от животноводческих помещений.

6. Ионизационная функция. Воздух естественных лесных экосистем характеризуется высокой концентрацией легких отрицательно заряженных аэроионов (аэроионы кислорода), благотворно влияющих на биологические структуры. Лесные насаждения вокруг объектов АПК восстанавливают нормальный ионный состав атмосферы, снижая уровень электростатического напряжения и связывая тяжелые аэрозольные ионы технологической пыли.

Таким образом, лесные насаждения в структуре АПК представляют собой многофункциональный биоинженерный комплекс. Интеграция защитных полос, санитарных зон и лесных колков в агроландшафт позволяет сформировать сбалансированную экосистему, в которой негативные технологические выбросы перехватываются и нейтрализуются непосредственно вблизи источников их образования.

Агроэкосистемы представляют собой искусственные, метаболически незамкнутые природно-антропогенные комплексы с низкой естественной устойчивостью к внешним стрессам.

Для поддержания экологического равновесия и биосферных функций пашни необходимо обязательное формирование сбалансированного экологического каркаса на основе защитных лесных насаждений.

Интенсификация агропромышленного комплекса превратила сельские территории в зоны высокого техногенного загрязнения. Основными факторами деградации воздушного бассейна выступают выбросы дизельного машинно-тракторного парка (CO, NO_x, SO_2, сажа, ПАУ), дефляционная почвенная пыль и остатки пестицидов в полеводстве, а также концентрированные

эмиссии аммиака (NH_3), сероводорода (H_2S), метана (CH_4) и дурнопахнущих летучих органических соединений в промышленном животноводстве.

Средообразующая роль лесных насаждений в АПК носит полифункциональный характер и реализуется через взаимосвязанный комплекс биогеоценотических процессов: газопоглощение, механическую фильтрацию пылевых шлейфов, генерацию молекулярного кислорода, депонирование углерода, бактерицидную санацию воздуха фитонцидами и оптимизацию приземного микроклимата агроценозов.

Создание дифференцированной системы защитных лесов (полезащитные полосы, буферные зоны вокруг ферм, прифермские насаждения) является безальтернативным экологическим методом нейтрализации техногенного давления сельскохозяйственного производства на окружающую среду.

ГЛАВА 2. ГАЗОПОГЛОТИТЕЛЬНАЯ И КИСЛОРОДОПРОДУЦИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ДРЕВЕСНЫХ ПОРОД

2.1. Физиологические механизмы газообмена и фотосинтеза древесных растений

Поглощение атмосферных газов и продуцирование молекулярного кислорода высшими древесными растениями базируются на сопряженных процессах фотосинтеза, транспирации и темнового дыхания. Взаимодействие древесного организма с газообразными компонентами приземного слоя атмосферы представляет собой многоступенчатый биофизический и биохимический процесс, интенсивность которого определяется анатомо-морфологическим строением ассимиляционных органов, микроклиматическими факторами и метаболической активностью клеток мезофилла.

Главными воротами газообмена у древесных растений выступает устьичный аппарат. Устьичная проводимость (g_s) определяет скорость диффузии паров воды наружу и встречный поток экзогенных газов (как физиологически необходимых CO_2 и O_2, так и токсичных поллютантов — SO_2, NO_x, NH_3) внутрь межклетников мезофилла.

Движущей силой трансмембранного газового потока является градиент концентраций между открытой атмосферой и субстоматической полостью листа. Общее диффузионное сопротивление листовой пластинки ($R_{лист}$) складывается из трех основных последовательных сопротивлений:

$$R_{лист} = r_a + r_s + r_m,$$

где:

• r_a — сопротивление пограничного ламинарного слоя воздуха, прилегающего к поверхности листовой пластинки (зависит от геометрии листа, его шероховатости, наличия трихом и скорости обдувающего ветра);

• r_s — устьичное сопротивление, контролируемое тургорным давлением замыкающих клеток и зависящее от освещенности, водного потенциала тканей и концентрации CO_2;

• r_m — мезофильное (внутритканевое) сопротивление, характеризующее скорость растворения газов в водной пленке клеточных стенок и их транспорт к хлоропластам и цитоплазме.

Через кутикулу (кутикулярная диффузия) проникает не более $1–5\%$ газов, поскольку кутикулярный воск и полимерный матрикс кутина обладают гидрофобными свойствами и высоким диффузионным сопротивлением. Однако при длительном воздействии кислых газов (SO_2, NO_2) и аммиака происходит постепенная деградация эпикутикулярных восков, что приводит к резкому росту нерегулируемой кутикулярной проницаемости и обезвоживанию тканей.

Проникнув через устьичные щели в межклетники листа, экзогенные молекулы газов вступают в контакт с гидрофильной поверхностью клеточных оболочек мезофилла. Здесь происходит их растворение в апопластной влаге с переходом в гидратированные и ионные формы.

Физиологический механизм кислородообразования неразрывно связан со световой фазой фотосинтеза. В реакционных центрах фотосистемы II (ФС II) мембран тилакоидов хлоропластов под действием квантов света осуществляется фотолиз воды:

$$2H_2O + 4h\nu = O_2\uparrow + 4H^+ + 4e^-$$

Образующийся молекулярный кислород (O_2) диффундирует по градиенту парциального давления из стромы хлоропласта через цитоплазму, субстоматические полости и открытые устьица

наружу — в окружающую воздушную среду. Одновременно протоны (H^+) и электроны (e^-) вовлекаются в цепь фотофосфорилирования с генерацией восстановительных эквивалентов (NADPH) и энергии (ATP), необходимых для темновой фиксации углекислого газа ферментом рибулозобисфосфаткарбоксилазой/оксигеназой (РуБисКО) в цикле Кальвина.

Скорость выделения кислорода и поглощения углекислоты прямо пропорциональна фотосинтетической активности листа. На нее оказывают сильное влияние факторы внешней среды: плотность фотосинтетически активной радиации (ФАР), температура воздуха, влагообеспеченность корнеобитаемого слоя почвы, а также степень загрязнения листовой пластинки агропромышленными аэрозолями и токсичными газами.

2.2. Способность различных пород деревьев поглощать токсичные газы и аэрозоли

Экосистемная ценность защитных лесных насаждений в аграрном секторе во многом определяется их способностью выполнять роль биохимических детоксикаторов. Попадая во внутренние ткани листа, токсичные газы подвергаются метаболической переработке, нейтрализуются антиоксидантными системами растительной клетки либо депонируются в виде нетоксичных солей.

Поглощение и депонирование диоксида углерода (CO_2). Диоксид углерода выступает базовым субстратом углеродного питания автотрофных растений. В экосистемах АПК, где концентрация CO_2 локально повышена в зонах работы машинно-тракторного парка и над навозохранилищами, древесные насаждения выполняют функцию углеродного стока.

Поглощенный углерод консервируется в виде полисахаридов (целлюлозы, гемицеллюлозы) и лигнина, формируя постоянный пул биомассы древесных стволов, корней и ветвей на десятилетия. Наивысшей нетто-ассимиляцией углерода среди древесных пород умеренного пояса обладают быстрорастущие лиственные виды с высокой энергией побегообразования и длительным периодом активности камбия — тополя (Populus), ивы (Salix), береза повислая (Betula pendula), а среди хвойных — лиственница сибирская (Larix sibirica).

Поглощение диоксида серы (SO_2). Диоксид серы растворяется в водной фазе клеточных стенок с образованием сернистой и серной кислот, диссоциирующих на ионы HSO_3^- , и SO_4^{2-}. В низких концентрациях сульфат-ионы включаются в нормальный серосодержащий метаболизм растения: восстанавливаются ферментными комплексами хлоропластов и используются для синтеза незаменимых аминокислот — цистеина и метионина.

Однако при высоких концентрациях сульфит-ионы (SO_3^{2-}) вызывают окислительный стресс, ингибируют ферменты темновой фиксации CO_2 и разрушают хлорофилл (вызывают феофитинизацию).

Высокой поглотительной способностью по отношению к SO_2 без признаков некроза обладают вяз мелколистный (Ulmus pumila), тополь бальзамический (Populus balsamifera), ясень зеленый (Fraxinus pennsylvanica), дуб черешчатый (Quercus robur) и клен ясенелистный (Acer negundo). Хвойные породы (сосна обыкновенная, ель европейская) поглощают сернистый газ медленнее и крайне чувствительны к его токсическому воздействию из-за длительного срока жизни хвои (2–5 лет) и кумулятивного эффекта серы.

Поглощение оксидов азота (NO_x). Оксид (NO) и диоксид (NO_2) азота, поступающие с выхлопными газами тракторов и зерносушилок, при растворении в мезофилле образуют нитрит- (NSO_2^-) и нитрат-ионы (NSO_3^-). Растения утилизируют эти ионы через ферментную систему нитрат- и

нитритредуктаз, восстанавливая их до аммиака с последующим включением в синтез аминокислот через глутаминсинтетазный путь.

Древесные насаждения служат эффективным барьером для связывания оксидов азота: один гектар сомкнутого широколиственного леса способен ежегодно утилизировать из воздуха от 25 до 60 кг соединений азота. Наиболее интенсивно NO_x ассимилируют робиния псевдоакация (Robinia pseudoacacia), береза повислая и липа мелколистная (Tilia cordata).

Ассимиляция аммиака (NH_3). Аммиак является главным специфическим поллютантом животноводческих комплексов АПК. Будучи щелочным газом, аммиак при проникновении через устьица растворяется с образованием ионов аммония (NH_4^+). Древесные растения обладают эволюционно закрепленными путями утилизации эндогенного и экзогенного аммония, предотвращающими сдвиг pH цитоплазмы в щелочную сторону:

2-Оксоглутарат + NH_4^+ + NADPH L-Глутамат + $NADP^+$ + H_2O

или через сопряженную систему ферментов глутаминсинтетазы (ГС) и глутаматсинтазы (ГОГАТ).

При умеренном поступлении аммиака из атмосферы деревья используют его как дополнительный источник некорневого азотного питания, что сопровождается интенсификацией роста побегов и потемнением листовой пластинки. По способности улавливать и метаболизировать газообразный аммиак без повреждения мембран хлоропластов лидируют тополь черный (Populus nigra), ива белая (Salix alba), ольха черная (Alnus glutinosa), клен остролистный (Acer platanoides) и бузина черная (Sambucus nigra).

Осаждение пыли и аэрозолей (PM_{10} и $PM_{2.5}$). Улавливание пыли древесным пологом представляет собой комплексный аэродинамический и механический процесс. При приближении запыленного воздушного потока к лесной полосе происходит снижение его скорости и турбулизация, что стимулирует выпадение тяжелых фракций минеральной пыли. Мелкодисперсные взвешенные частицы осаждаются непосредственно на поверхности ассимиляционных органов.

Эффективность пылезадержания определяется микроморфологией эпидермиса листа:

1. Шероховатые и морщинистые листья, покрытые жесткими трихомами (вяза шершавого, вяза мелколистного, лещины обыкновенной), задерживают до 3–5 раз больше минеральных частиц на единицу площади листа, чем гладкие глянцевые поверхности.

2. Листья с густым войлочным опушением (тополь белый, лох узколистный) обладают исключительной пылеулавливающей емкостью за счет развитой микроструктуры трихом, захватывающих субмикронные частицы.

3. Смолистые и клейкие выделения на почках и молодых листьях (тополь бальзамический, береза повислая) прочно фиксируют частицы пыли на поверхности, препятствуя их повторному сдуванию ветром.

4. Хвойные породы (сосна, ель, можжевельник), благодаря сложной объемной геометрии хвои и наличию липких терпеновых смол, работают как круглосуточные фильтры в течение всего года, в том числе в ранневесенний и позднеосенний периоды дефляции почв.

Ливневые осадки периодически смывают накопившуюся пыль с крон в подкроновое пространство, где она поглощается лесной подстилкой и выводится из активного атмосферного круговорота.

2.3. Интенсивность продуцирования кислорода лесными насаждениями

Генерация свободного молекулярного кислорода является важнейшим средообразующим показателем лесных насаждений, определяющим их биосферную значимость.

В экологической оценке различают валовую продукцию кислорода (суммарный объем O_2, выделившийся в процессе световой фазы фотосинтеза) и чистую (нетто) продукцию кислорода, представляющую собой разницу между валовым выделением и расходом кислорода на процессы автотрофного дыхания растительных тканей в течение суток:

$$P_{\text{netto}} = P_{\text{валовая}} - R_{\text{дыхание}}$$

Интенсивность продуцирования кислорода тесно коррелирует с чистой первичной продуктивностью (NPP) фитоценоза и суммарной площадью листовой поверхности древостоя. На основании стехиометрического уравнения фотосинтеза синтез одного моля глюкозы (180 г) сопровождается выделением шести молей молекулярного кислорода (192 г). Соответственно, на образование 1 т сухой абсолютно сухой органической массы древесное насаждение выделяет в среднем около 1,07–1,20 т чистого кислорода (O_2) и поглощает около 1,47–1,60 т диоксида углерода (CO_2).

Количественные показатели кислородопроизводительности существенно различаются в зависимости от таксономической принадлежности древесной породы, биологического возраста насаждения, сомкнутости крон и бонитета условий местопроизрастания (Таблица 2.1).

Таблица 2.1 — Сравнительная характеристика кислородопродуцирующей и пылеосаждающей способности основных древесных пород в возрасте 25–40 лет

Древесная порода	Выделение кислорода одним деревом (кг/вег. период)	Чистая продукция кислорода насаждением, (Т/Га*год)	Масса задерживаемой пыли за сезон (кг/дерево)	Характер поверхности листового/хвойного аппарата
Тополь бальзамический	42-48	12,5-15	30-35	Крупная пластинка, келейный налет, высокая площадь кроны
Береза повислая	28-32	8,5-10	18-22	Высокая плотность листьев, смолистые железяки
Дуб черешчатый	35-40	9-11,5	25-28	Плотная кожистая кутикула, развитая ярусность кроны
Липа мелколистная	30-35	8-9,5	26-30	Мягкое опушение жилок с нижней стороны, высокая теневыносливость
Вяз мелколистный	25-30	7,5-9	32-38	Жестокая шершавая поверхность, высокая густота ветвления
Ясень зеленый	24-28	7-8,5	15-19	Сложноперистые гладкие листья, ажурная светопроницаемая крона

Древесная порода	Выделение кислорода одним деревом (кг/вег. период)	Чистая продукция кислорода насаждением, (Т/Га*год)	Масса задерживаемой пыли за сезон (кг/дерево)	Характер поверхности листового/хвойного аппарата
Сосна обыкновенная	20-24	6,5-7,5	12-16	Узкая хвоя, восковой налет, круглогодичное функционирование
Ель европейская	18-22	6-7	16-20	Густая теневая хвоя, многоярусное ветвление до земли

Лидером по абсолютным объемам генерации кислорода является тополь бальзамический (и другие гибридные тополя). Одно взрослое дерево тополя за теплый сезон продуцирует объем кислорода, достаточный для дыхания 3–4 взрослых людей в течение года (около 45 кг O_2). Это обусловлено колоссальным приростом вегетативной биомассы, высокой удельной поверхностью листьев и максимальной фотосинтетической активностью хлоропластов светового типа.

Возрастная динамика кислородообразования характеризуется куполообразной кривой. Молодые посадки (до 10 лет) отличаются высокой интенсивностью фотосинтеза на единицу массы листа, однако общая масса листового полога невелика, поэтому суммарная продукция насаждения ограничена. Пик кислородопродуцирующей способности насаждений приходится на период максимального прироста биомассы — в возрасте от 20 до 45 лет у быстрорастущих пород (тополь, береза, ива) и от 35 до 70 лет у медленнорастущих пород (дуб, липа, ель). В перестойных и стареющих древостоях интенсивность фотосинтеза затухает, а доля кислорода, расходуемого на эндогенное дыхание стволовой древесины и разложение опада сапротрофными микроорганизмами, резко возрастает, в результате чего нетто-выход кислорода приближается к нулю.

2.4. Газоустойчивость древесных пород в условиях агропромышленного загрязнения

Способность древесных растений не только улавливать токсиканты, но и длительно сохранять жизнеспособность, темпы роста и декоративность в условиях хронического химического стресса определяется их экологическим свойством — газоустойчивостью.

В физиологии растений газоустойчивость подразделяют на два взаимосвязанных уровня:

1. Анатомо-морфологическая (пассивная) устойчивость. Обусловлена структурными барьерами, препятствующими проникновению газов вглубь листа: толстым слоем кутикулы и воска, погруженными устьицами, наличием плотного войлочного опушения, а также способностью замыкающих клеток быстро закрывать устьичные щели при появлении токсических концентраций газов в воздухе.

2. Физиолого-биохимическая (активная) устойчивость. Обеспечивается метаболической лабильностью цитоплазмы: высокой емкостью ферментных антиоксидантных систем (супероксиддисмутазы, каталазы, аскорбатпероксидазы), нейтрализующих токсичные активные формы кислорода (O_2^-, H_2O_2, OH^-), высокой буферностью клеточного сока (сопротивляемостью

подкислению или подщелачиванию) и способностью быстро синтезировать защитные белки теплового и химического шока.

В зависимости от степени толерантности к комплексу агропромышленных поллютантов (смесь пыли, аммиака, оксидов серы, азота и продуктов сгорания солярки) лесообразующие породы разделяют на три основные категории:

1. Высокоустойчивые породы. Растения, способные без видимых признаков поражения (хлорозов, краевых ожогов, дефолиации) произрастать в непосредственной близости от источников эмиссии (на границе санитарно-защитных зон птицефабрик, свинокомплексов, тракторных станов):

1. Тополь черный (осокорь), тополь канадский, тополь бальзамический. Обладают мощной способностью к регенерации листового аппарата и высокой активностью нитрат- и сульфатредуктазных комплексов.

2. Вяз мелколистный (приземистый) и вяз гладкий. Исключительно засухоустойчивы, легко переносят сильное запыление и осаждение аммонийных солей на кроне.

3. Клен ясенелистный (американский). Характеризуется экстремальной экологической пластичностью, мощной корневой системой и устойчивостью к широкому спектру газообразных соединений.

4. Робиния псевдоакация (белая акация). Являясь бобовым растением с клубеньковыми азотфиксирующими бактериями, обладает высокой толерантностью к соединениям азота и щелочным аэрозолям.

5. Лох узколистный и лох серебристый. Отличаются войлочным защитным покровом листьев, нечувствительны к суховеям, пыльным бурям и закислению среды.

6. Береза повислая. Проявляет высокую устойчивость к выхлопным газам двигателей внутреннего сгорания и аммиаку.

2. Среднеустойчивые породы. Породы, успешно выполняющие средозащитные функции при умеренном уровне техногенного загрязнения, но проявляющие угнетение прироста и краевые краевые некрозы листьев при залповых аварийных выбросах:

1. Липа мелколистная. Высокоэффективный биофильтр, однако чувствительна к сильному засолению почвы и длительному запылению пор устьиц.

2. Дуб черешчатый. Долговечная порода с высокой поглотительной способностью, но в молодом возрасте чувствительна к кислым газам (SO_2).

3. Ясень обыкновенный и ясень ланцетный. Хорошо переносят загрязнение воздуха, но требовательны к плодородию и влажности почвы.

4. Лиственница сибирская. Единственная из хвойных пород, проявляющая высокую газоустойчивость в летний период благодаря ежегодному сбрасыванию хвои осенью, что исключает кумулятивное накопление серы и тяжелых металлов.

3. Чувствительные (неустойчивые) породы. Виды, быстро деградирующие в условиях постоянного газопылевого шлейфа объектов АПК:

1. Сосна обыкновенная и ель европейская. Вечнозеленая хвоя аккумулирует загрязнители годами. Под воздействием диоксида серы и аммиака происходит химическая деградация эпикутикулярного воска, закупорка устьиц и хлороз хвои с последующим усыханием верхушечных побегов уже при концентрациях SO_2 более 0,05 мг/м^3.

2. Клен остролистный и каштан конский. Чувствительны к озону, фтористым соединениям и запылению, реагируют преждевременным пожелтением и летним опадением листвы.

Следовательно, при проектировании экологических барьеров в системе агропромышленного комплекса видовой состав древесных пород должен подбираться дифференцированно, с

безусловным доминированием высокоустойчивых и среднеустойчивых лиственных пород в зонах максимальной концентрации токсикантов.

Поглощение газообразных загрязнителей и генерация молекулярного кислорода древесными породами определяются динамикой устьичной проводимости и биохимической активностью ферментных систем хлоропластов. Устьичный аппарат выступает главным регулирующим барьером транспирации и газообмена.

Лиственные древесные породы обладают высокой селективной способностью к ассимиляции специфических агрополлютантов: аммиак (NH_3) и оксиды азота (NO_x) метаболизируются через глутаминсинтетазный путь в органические азотистые соединения, диоксид серы (SO_2) включается в сульфатный фонд клетки, а минеральная и зерновая пыль механически улавливается микроструктурами эпидермиса (трихомами, восками).

Интенсивность продуцирования кислорода прямо пропорциональна величине чистой первичной продукции биомассы. Абсолютным лидером по объемам генерации чистого O_2 (до 15 т/(га·год)) и скорости утилизации CO_2 является тополь бальзамический, превосходящий хвойные и медленнорастущие широколиственные породы в 1,5–2 раза.

По шкале газоустойчивости к агропромышленным выбросам доминируют тополь бальзамический, вяз мелколистный, робиния псевдоакация, лох узколистный и береза повислая. Вечнозеленые хвойные породы (сосна обыкновенная, ель европейская) проявляют высокую чувствительность к кислым газам и аммиаку из-за многолетнего срока жизни хвои и не могут использоваться в качестве монокультур в ближней зоне эмиссии объектов АПК.

ГЛАВА 3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ И РАЗМЕЩЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ НАСАЖДЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИЯХ АПК

3.1. Роль полезащитных лесных полос в очищении воздуха и стабилизации микроклимата полей

Полезащитные лесные полосы являются базовым звеном пространственной организации адаптивно-ландшафтного земледелия. Располагаясь по границам севооборотных массивов, они формируют замкнутую систему взаимосвязанных защитных кулис, которая кардинально преобразует приземный слой тропосферы, модифицирует ветровой режим и выступает распределенным биоинженерным фильтром для агрогенных загрязнителей.

Аэродинамические эффекты и конструкции лесных полос. Средообразующее воздействие лесных полос базируется на изменении динамики ветрового потока. При встрече с древесным барьером воздушная масса разделяется на два потока: один огибает насаждение сверху, а второй фильтруется сквозь кроны деревьев и кустарников, испытывая значительное аэродинамическое сопротивление. В зависимости от степени сомкнутости крон и наличия просветов в вертикальном профиле выделяют три основные аэродинамические конструкции лесных полос:

1. Непродуваемая (плотная) конструкция. Характеризуется практически полным отсутствием просветов по всей высоте профиля, где плотность полога превышает восемьдесят пять — девяносто процентов. Ветровой поток почти целиком переваливает через верхний ярус крон, в результате чего непосредственно за полосой образуется зона глубокого затишья с возникновением мощных возвратных турбулентных вихрей. В зимний период у таких полос формируются массивные сугробы шириной до двадцати метров, а центральная часть поля остается оголенной. Пылезадерживающая функция такой полосы высока вблизи опушки, однако общий радиус ее защитного действия невелик.

2. Продуваемая конструкция. Имеет плотный полог в верхней части кроны и крупные сквозные просветы, превышающие шестьдесят процентов, в приземном ярусе стволов, что достигается отсутствием кустарникового подлеска. Воздушный поток у поверхности земли сжимается и ускоряется, проходя сквозь стволы, а затем плавно расширяется над полем. Такая конструкция наиболее эффективна для снегораспределения в степной зоне, так как снежный покров выдувается ровным шлейфом на межполосное поле на расстояние до тридцати — сорока высот насаждения.

3. Ажурная (ажурно-продуваемая) конструкция. Отличается равномерным распределением небольших сквозных просветов в пределах двадцати пяти — тридцати пяти процентов по всей вертикальной плоскости посадки. С точки зрения комплексного экологического эффекта это наиболее совершенное инженерно-биологическое решение. Ветровой поток разбивается пологом на множество мелких струй, теряя кинетическую энергию без образования деструктивных вихрей и обеспечивая объемную диффузную сепарацию переносимых аэрозолей.

Таблица 3.1. Сравнительная характеристика аэродинамических конструкций лесополос и их средообразующей эффективности

Конструкция лесной полосы	Доля просветов по ярусам, % (вершина / ствол	Зона эффективного снижения скорости ветра	Характер снегоотложения на прилегающем поле	Эффективность осаждения почвенной пыли и пестицидов
Плотная (непродуваемая)	< 10 / < 10	До 15-20 Н (резкий спад)	Неравномерное, локальное сугробы высотой до 2-3 м	Высокая у опушки, слабая в глубине межполостного поля
Продуваемая	< 15 / 60	До 30-35 Н (плавный спад)	Равномерный шлейф по всей длине поля	Умеренная (пыль частично проносится сквозь нижний ярус)
Ажурная	25-35 / 25-35	До 25-30 Н (максимальный суммарный охват)	Однородный слой толщиной 30-50 см	Максимальная (объёмная диффузная спиральная аэрозоль)

Очищение воздуха от пыли и пестицидных аэрозолей. В периоды интенсивных полевых работ и засух открытые пахотные массивы подвержены ветровой эрозии. Защитные полосы ажурной конструкции снижают скорость ветра в приземном слое ниже порога ветроустойчивости почвы (до значений менее четырех — пяти метров в секунду), предотвращая отрыв пылеватых частиц гумуса.

Если же пыльная буря или шлейф дефляции зародились на удаленном незащищенном массиве, лесная полоса работает как объемный механический осадитель. За счет резкого падения скорости потока при входе в опушку тяжелые фракции минеральной пыли оседают на наветренном крае. Более тонкие взвешенные фракции задерживаются шероховатой поверхностью листьев и побегов. Научные данные показывают, что система взаимосвязанных лесополос задерживает до шестидесятипяти — восьмидесяти процентов транзитной пыли, снижая общую запыленность воздуха над полями в два с половиной — четыре раза.

Аналогичный механизм обеспечивает перехват пестицидных аэрозолей при химической обработке сельхозугодий. Древесный полог эффективно улавливает капли препаратов, сносимые боковым ветром, защищая соседние севообороты, водоемы и пастбища.

Оптимизация локального микроклимата. Снижение ветрового напора существенно улучшает гидротермический режим агробиоценоза:

1. Снижение непродуктивного испарения. Турбулентный диффузионный влагообмен между почвой и атмосферой замедляется, что сокращает непроизводительную потерю почвенной влаги на пятнадцать — двадцать пять процентов.

2. Повышение влажности воздуха. Относительная влажность воздуха в межполосном пространстве в дневные часы на пять — двенадцать процентов выше, чем на открытых участках, что смягчает воздействие засух и суховеев.

3. Сглаживание температурных экстремумов. В дневные часы температура приземного воздуха под защитой полос ниже на полтора — два с половиной градуса Цельсия, а в ночные часы, благодаря снижению радиационного выхолаживания, на один — два градуса выше.

4. Экономия влаги растениями. Сельскохозяйственные культуры расходуют на двадцать — тридцать процентов меньше влаги на единицу формируемого сухого вещества, что стабилизирует урожайность зерновых культур, обеспечивая стабильную прибавку в пределах от двух с половиной до пяти центнеров с гектара.

3.2. Зелёные санитарно-защитные зоны вокруг объектов животноводства и перерабатывающих предприятий

Животноводческие комплексы промышленного типа (свинокомплексы, бройлерные и яичные птицефабрики, откормочные комплексы крупного рогатого скота), навозохранилища и предприятия первичной переработки сырья выступают эпицентрами концентрированного выделения дурнопахнущих соединений, токсичных газов и микробиологических аэрозолей. Формирование вокруг них многофункциональных зеленых санитарно-защитных зон представляет собой обязательное природоохранное требование, обеспечивающее экологическую безопасность прилегающих сельских территорий и населенных пунктов.

Механизмы биофильтрации и нейтрализации газовых факелов. В условиях открытого пространства приземный факел выбросов от вентиляционных шахт ферм распространяется по направлению господствующих ветров на расстояние до трех — пяти километров.

Рационально спроектированная древесно-кустарниковая зона выступает в качестве динамического фильтрационного барьера, трансформирующего загрязненный поток по мере его продвижения сквозь насаждение.

Процесс очистки воздуха строится на поэтапном преодолении структурных компонентов зеленого пояса. На первом этапе наветренная опушка, сформированная из плотного кустарникового яруса, встречает загрязненный поток, резко гасит его начальную приземную скорость и механически задерживает тяжелые взвешенные частицы пыли, пуха и технологических аэрозолей.

Далее газовоздушная масса проникает в центральный массив, состоящий из высокорослых древесных пород. Здесь происходят ключевые физико-химические и аэродинамические процессы. Плотная фронтальная стена крон отклоняет основной факел выбросов в верхние слои атмосферы, где повышенная скорость ветра способствует его быстрому турбулентному перемешиванию и рассеиванию до безопасных концентраций.

Одновременно листовой аппарат активно абсорбирует газообразный аммиак и сероводород через устьичные щели, нейтрализуя их внутриклеточными буферными системами и включая в естественный метаболизм. Выделяемые деревьями эфирные масла, терпены и летучие альдегиды вступают в окислительно-восстановительные реакции с молекулами одорантов (скатолом, индолом, низкомолекулярными жирными кислотами), разрушая их функциональные группы и ликвидируя стойкий навозный запах. Кроме того, фитонцидные выделения растений подавляют жизнедеятельность патогенных бактерий и спор, снижая микробиологическую загрязненность воздуха на семьдесят — восемьдесят пять процентов.

На завершающем этапе профилированная подветренная опушка осуществляет финишное осветление воздушного потока, обогащая выходящие воздушные массы влагой, легкими аэроионами и свободным фотосинтетическим кислородом, направляемым в сторону прилегающих жилых зон.

Пространственная структура и параметры защитных поясов. Для гарантированной локализации технологических выбросов животноводческих объектов санитарно-защитная зона должна иметь научно обоснованную пространственную структуру:

1. Ширина санитарно-защитной полосы. Зависит от мощности предприятия. Для комплексов крупного рогатого скота ширина озелененного пояса составляет не менее трехсот метров, для крупных свинокомплексов и птицефабрик — от пятисот до одной тысячи метров. При этом непосредственно древесно-кустарниковые насаждения должны занимать не менее сорока — шестидесяти процентов всей площади нормативной зоны.

2. Многоярусное профилирование. Посадки проектируются в три — пять параллельных полос шириной по пятнадцать — двадцать метров каждая, разделенных межполосными разрывами в двадцать — тридцать метров для обеспечения свободной аэрации. Приземный наветренный ярус формируется из плотных кустарников, задерживающих аммиак и пыль; второй и третий ярусы формируются из быстрорастущих пород первой величины с ажурной кроной (тополей, ив, берез), осуществляющих высотный перехват газов; тыловой ярус составляется из долговечных широколиственных и фитонцидных пород (дуба, липы, лиственницы).

3.3. Рекомендации по подбору ассортимента древесных пород для экосистем АПК

Успешное функционирование искусственных лесных насаждений в аграрном секторе определяется соответствием биоэкологических характеристик древесных видов условиям локального экотопа и характеру антропогенного воздействия. Насаждения должны сочетать высокую газо- и пылепоглотительную емкость, устойчивость к засухе, долговечность и способность к вегетативному возобновлению.

Принципы формирования породного состава. При проектировании лесомелиоративных объектов на землях АПК рекомендуется руководствоваться следующими научно обоснованными принципами:

1. Ярусность и комплементарность. Формирование смешанных насаждений с участием главной (каркасной), сопутствующей пород и кустарникового подлеска. Монокультуры неустойчивы к вспышкам вредителей и не создают необходимой вертикальной плотности биофильтра.

2. Фитопатологическая безопасность для агрокультур. Недопустимо высаживать породы, являющиеся промежуточными хозяевами опасных возбудителей болезней сельскохозяйственных культур (например, барбарис обыкновенный служит резерватом линейной ржавчины злаков, а крушина ломкая — овсяной ржавчины).

3. Устойчивость к специфическим поллютантам. Для санитарных зон ферм подбираются виды с высокой толерантностью к соединениям азота и аммиаку; для полей зернового производства — ветроустойчивые и долговечные породы.

4. Сниженная корневая конкуренция. На границах пахотных земель главные породы должны иметь стержневую или глубокую якорную корневую систему, не перехватывающую влагу и элементы питания у культурных растений в верхнем слое почвы.

Таблица 3.2. Рекомендуемый ассортимент древесных и кустарниковых пород для различных функциональных зон АПК

Функциональная зона	Главные (каркасные) породы	Сопутствующие породы	Кустарниковый подлесок	Светозащитное назначение комплекса
Полезащитные полосы (пашня)	Дуб черешчатый, лиственница сибирская	Береза повислая, липа мелколистная, ясень ланцетный	Смородина золотистая, акация желтая, кизильник блестящий	Ветрозащита, задержание снега, предотвращение дефляции, осаждение пестицидов
СЗЗ свинокомплексов и птицефабрик	Тополь бальзамический, тополь черный, ива белая	Ольха черная береза повислая, вяз мелколистный	Бузина черная, лох узколистный, свидина белая, аморфа полукустарниковая	Поглощение NH_3, H_{25}, дезодорация воздуха от одорантов
СЗЗ элеваторов и зернотоков	Вязь мелколистный, тополь канадский	Клен ясенелистный, клен остролистный	Сирень обыкновенная, бирючина обыкновенная, боярышник	Механическое осаждение зерновой и минеральной пыли, экранирование шума
Прифермерские зеленые полосы (КРС)	Липа мелколистная, береза повислая, дуб черешчатый	Рябина обыкновенная, черемуха обыкновенная	Калина обыкновенная, лещина, спирея средняя	Санация воздуха фитонцидами, кислородообразование, снижение запыленности

Характеристика ключевых перспективных фитомелиорантов:

1. Тополь бальзамический (Populus balsamifera) и гибридные тополя. Незаменимы для ближней зоны санитарных фильтров. Обладают рекордной скоростью роста (до полутора — двух метров в год), непревзойденной продукцией кислорода (до пятнадцати тонн на гектар) и мощной транспирацией, способствующей снижению уровня грунтовых вод вблизи навозных лагун. Клейкие смолистые выделения листьев интенсивно сорбируют пылевые частицы и связывают молекулы запахов. Рекомендуется использовать исключительно мужские клоны, не образующие пуха.

2. Дуб черешчатый (Quercus robur). Основа долговечных полезащитных систем лесостепной и степной зон со сроком эффективной службы более восьмидесяти — ста лет. Глубокая стержневая корневая система исключает иссушение пахотного слоя на прилегающих посевах. Плотный полог кроны обеспечивает стабильный аэродинамический барьер и долгосрочное депонирование атмосферного углерода.

3. Вяз мелколистный (Ulmus pumila). Обладает исключительной засухо- и солеустойчивостью. Мелкие, жесткие, шершавые листья эффективно задерживают минеральную почвенную пыль (до тридцати пяти — тридцати восьми килограммов на взрослое дерево за сезон), что делает его незаменимым видом для засушливых районов каштановых и светло-каштановых почв.

4. Робиния псевдоакация (Robinia pseudoacacia). Быстрорастущая бобовая порода, устойчивая к аммиачным шлейфам животноводческих комплексов. Фиксирует атмосферный азот, обогащает почву, выдерживает жесткие суховеи и проявляет толерантность к токсичным выхлопам машинно-тракторного парка.

5. Смородина золотистая (Ribes aureum) и Карагана древовидная (Caragana arborescens). Оптимальные кустарники для наветренных опушек. Они не поражаются вредителями зерновых культур, создают густой приземный аэродинамический экран, задерживают мелкую пыль и способствуют формированию благоприятных условий для гнездования полезных птиц и хищных насекомых-энтомофагов, регулирующих численность вредителей полей.

Полезащитные лесные полосы выступают важнейшим фактором экологической оптимизации агроландшафтов. Выбор ажурной и ажурно-продуваемой конструкций обеспечивает рассеивание кинетической энергии ветра на дистанции до тридцати высот насаждения, предотвращает дефляцию плодородного слоя почвы, снижает непродуктивное испарение влаги на пятнадцать — двадцать пять процентов и задерживает до восьмидесяти процентов транзитной пыли и пестицидных аэрозолей.

Санитарно-защитные зоны животноводческих комплексов и перерабатывающих производств функционируют как комплексные биогеохимические фильтры. Они отклоняют газовый факел в верхние слои атмосферы, поглощают токсичные аммиак и сероводород, нейтрализуют дурнопахнущие органические одоранты фитонцидными терпенами и уничтожают до восьмидесяти пяти процентов патогенных бактерий и спор в воздухе.

Эффективность санитарно-защитных насаждений вокруг объектов животноводства достигается за счет создания многоярусных кулисных систем шириной от трехсот до тысячи метров, в которых наветренный край формируется из пылеулавливающих кустарников, центральный ярус — из быстрорастущих пород-детоксикаторов (тополей, ив, вязов), а тыловой пояс — из фитонцидных долговечных древостоев.

Разработанный дифференцированный ассортимент древесных пород базируется на принципах высокой газоустойчивости, фитопатологической безопасности по отношению к агрокультурам и отсутствия корневой конкуренции на пашне. Ведущими породами для агроэкосистем признаны тополь бальзамический (биофильтрация и кислородообразование), дуб черешчатый (долговечность и микроклимат полей), вяз мелколистный (пылезадержание) и робиния псевдоакация (азотоустойчивость).

ВЫВОДЫ

На основе проведенного комплексного эколого-биологического и агролесомелиоративного анализа средообразующих, газозащитных и кислородопродуцирующих функций древесных насаждений в агропромышленном комплексе сформулированы следующие выводы:

Трансформация агроэкосистем и эколого-стабилизирующая роль лесных насаждений. Современные агроэкосистемы являются метаболически незамкнутыми, антропогенно зависимыми комплексами с предельно низким внутренним биологическим разнообразием. Интенсификация полеводства, эксплуатация тяжелого дизельного машинно-тракторного парка и функционирование промышленных комплексов животноводства формируют мощные потоки специфических поллютантов (аммиак, сероводород, оксиды углерода и азота, сернистый газ, взвешенные минеральные и зерновые частицы, пестицидные аэрозоли). Защитные лесные насаждения выступают структурным ядром экологического каркаса агроландшафта, компенсируя антропогенную дестабилизацию и выполняя функцию автотрофного биоинженерного фильтра непрерывного действия.

Физиолого-биохимические механизмы детоксикации воздуха. Газопоглотительная емкость древесных пород определяется динамикой устьичной проводимости и биохимической пластичностью мезофилла листа. Древесные растения проявляют селективную метаболическую активность по отношению к агрогенным токсикантам: аммиак (NH_3) и оксиды азота (NO_x) утилизируются через ферментные системы глутаминсинтетазы и глутаматсинтазы в органический фонд аминокислот; сернистый газ (SO_2) метаболизируется в сульфаты клетки; а взвешенные пылевые частицы фракций PM_{10} и $PM_{2,5}$ механически сорбируются кутикулярными структурами (трихомами, восками, смолистыми экссудатами).

Кислородопродуцирующий и углерододепонирующий потенциал. Интенсивность эмиссии свободного фотосинтетического кислорода прямо пропорциональна величине чистой первичной продукции биомассы. Абсолютным лидером среди изученных таксонов является тополь бальзамический (Populus balsamifera) и его гибриды, продуцирующие до 15 тонн чистого кислорода на гектар в год и депонирующие до 16 тонн диоксида углерода. Зрелые лиственные насаждения превосходят хвойные монокультуры по валовому выходу кислорода в 1,5–2 раза в течение вегетационного периода.

Дифференциация древесных пород по газоустойчивости. В условиях поликомпонентного агропромышленного загрязнения наивысшую устойчивость и средозащитную жизнеспособность проявляют лиственные виды: тополь бальзамический, тополь черный, вяз мелколистный, робиния псевдоакация, береза повислая и лох узколистный. Вечнозеленые хвойные породы (сосна обыкновенная, ель европейская) характеризуются кумулятивной чувствительностью хвои к кислым газам и аммиаку, в связи с чем их применение в ближней зоне влияния животноводческих комплексов и тракторных станов экологически нецелесообразно.

Оптимизация конструкций и пространственного размещения насаждений. Максимальная эколого-мелиоративная эффективность полезащитных полос достигается при формировании ажурной и ажурно-продуваемой конструкций с равномерной вертикальной сквозистостью полога 25–35%.

Такие параметры обеспечивают гашение кинетической энергии ветра на дистанции до 30 высот насаждения (30H), снижают непродуктивное испарение влаги на 15–25%, предотвращают ветровую эрозию почв и улавливают до 80% транзитной пыли. В санитарно-защитных зонах животноводческих комплексов необходима организация многоярусных кулисных посадок шириной 300–1000 м, где кустарниковый наветренный ярус задерживает приземные аэрозоли,

быстрорастущий каркас осуществляет высотное турбулентное рассеивание и поглощение газов, а древесный полог обеспечивает фитонцидную санацию воздуха от патогенной микрофлоры на 70–85%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной научно-исследовательской работе решена актуальная эколого-хозяйственная задача: исследованы теоретические и практические аспекты средообразующей, газопоглотительной и кислородопродуцирующей роли лесных насаждений в техногенно трансформированных экосистемах агропромышленного комплекса.

Сельскохозяйственное производство на современном этапе сопряжено со значительной газопылевой нагрузкой на компоненты биосферы. Локальные концентрации токсичных соединений азота, серы, взвешенных частиц и высокомолекулярных пахучих органических веществ вокруг животноводческих ферм, птицефабрик, навозохранилищ и пахотных массивов требуют внедрения надежных, экономически целесообразных природоохранных технологий. Искусственные лесные насаждения представляют собой единственную самовосстанавливающуюся биоинженерную систему, способную выполнять многовекторную экологическую стабилизацию агроэкосистем.

Выдвинутая во введении научная гипотеза полностью подтвердилась: научно обоснованное проектирование многоярусных защитных полос и санитарно-защитных зон, сформированных из быстрорастущих пород с мощной ассимиляционной поверхностью и биохимически устойчивых к соединениям азота видов, обеспечивает кратное возрастание газоочистной емкости насаждений, подавление неприятных запахов, снижение запыленности приземного слоя атмосферы и насыщение агроландшафтов фотосинтетическим кислородом.

Практическая значимость выполненного исследования заключается в том, что разработанные рекомендации по породам-фиторемедиантам и конструктивным параметрам насаждений могут быть непосредственно интегрированы в:

• проекты землеустройства и адаптивно-ландшафтного обустройства сельскохозяйственных предприятий;

• нормативную документацию по расчету и озеленению санитарно-защитных зон животноводческих комплексов, комбикормовых заводов и элеваторов;

• программы лесоводственного ухода за деградирующими полезащитными полосами с целью перевода их структуры в ажурно-продуваемое состояние.

Дальнейшее развитие темы видится в математическом моделировании переноса и осаждения мелкодисперсных аэрозолей ($PM_{2.5}$) в кронах древесных растений с применением методов вычислительной гидродинамики (CFD), а также в селекции устойчивых клонов тополей и вязов, адаптированных к условиям меняющегося климата засушливых регионов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Российская Федерация. Законы. Об охране окружающей среды: Федеральный закон № 7-ФЗ: принят Государственной Думой 21 декабря 2001 года: одобрен Советом Федерации 26 декабря 2001 года. – Москва: Кремль, 2002.

2. ГОСТ Р 59057-2020. Охрана окружающей среды. Земледелие.

Термины и определения : национальный стандарт Российской Федерации : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 6 октября 2020 г. № 752-ст. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 16 с.

3. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов: санитарно-эпидемиологические правила и нормативы: утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 25 сентября 2007 г. № 74. – Москва: Минздрав России, 2008. – 48 с.

4. Баранов, А. В. Санитарно-защитные зоны предприятий агропромышленного комплекса: экология и проектирование / А. В. Баранов, М. С. Соколова. – Санкт-Петербург: Лань, 2021. - 192 с.

5. Высоцкий, Г. Н. Защитное лесоразведение : избранные труды / Г. Н. Высоцкий. – Москва: Издательство Академии наук СССР, 1962. – 498 с.

6. Даутов, Х. Г. Газоустойчивость древесных пород в условиях техногенного загрязнения / Х. Г. Даутов. – Казань: Издательство Казанского университета, 2018. – 164 с.

7. Докучаев, В. В. Наши степи прежде и теперь / В. В. Докучаев. – Москва ; Ленинград : Сельхозгиз, 1936. – 128 с.

8. Каверин, В. С. Фитомелиорация агроландшафтов: теория и практика / В. С. Каверин, А. И. Беляев. – Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН, 2020. – 280 с.

9. Кулагин, Ю. З. Древесные растения и промышленная среда / Ю. З. Кулагин. – Москва: Наука, 1974. – 126 с.

10. Кулик, К. Н. Агролесомелиоративное картографирование и фитоэкологическая оценка агроландшафтов / К. Н. Кулик. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 2004. – 248 с. – Текст: непосредственный.

11. Николаевский, В. С. Биологические основы газоустойчивости растений / В. С. Николаевский. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1979. – 280 с.

12. Павловский, Е. С. Экологические и социально-экономические аспекты защитного лесоразведения / Е. С. Павловский. – Москва : Агропромиздат, 1991. – 184 с.

13. Рулев, А. С. Ландшафтно-географический подход в агролесомелиорации / А. С. Рулев. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 2007. – 160 с.

14. Смирнов, В. А. Поглощение токсичных газов древесными растениями в санитарно-защитных зонах животноводческих комплексов / В. А. Смирнов, Е. И. Григорьева // Агрохимия и экология. – 2022. – № 4. – С. 54–61.

15. Тарчевский, И. А. Основы фотосинтеза : учебное пособие / И. А. Тарчевский. – Москва: Высшая школа, 1977. – 256 с.

16. Царев, А. П. Сортоведение и селекция тополей / А. П. Царев. – Воронеж: Издательство ВГУ, 1985. – 152 с.

17. Чернышенко, О. В. Поглотительная способность древесных пород по отношению к техногенным газам / О. В. Чернышенко // Лесной вестник. – 2019. – Т. 23, № 2. – С. 45–52. – Текст : непосредственный.

18. Чибилёв, А. А. Экологическая оптимизация степных ландшафтов / А. А. Чибилёв. – Екатеринбург: УрО РАН, 1992. – 172 с.