

БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО МОЛОКА-СЫРЬЯ

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

Александр Юрьевич Просеков, д-р техн. наук, д-р биол. наук, академик РАН, профессор

E-mail: rector@kemsu.ru

Владимир Александрович Плешков, канд. с.-х. наук, доцент

E-mail: 6110699@mail.ru

Оксана Васильевна Козлова, д-р техн. наук, доцент, директор технологического института пищевой промышленности

E-mail: ms.okvk@mail.ru

Кемеровский государственный университет, г. Кемерово

Производство высококачественного молока-сырья, отвечающего жестким требованиям безопасности и экономической эффективности, является критическим фактором конкурентоспособности молочной отрасли. Целью настоящего обзора является комплексная систематизация современных биотехнологических решений, формирующих новую парадигму прецизионного управления качеством молока на уровне его первичного производства. Рассмотрены четыре взаимосвязанных технологических модуля, охватывающих весь производственный цикл: 1) генетические и репродуктивные технологии (геномная селекция по локусам *CSN3*, *DGAT1*, *BoLA-DRB3*; комплекс *OPU-IVP-T3* с преимплантационной диагностикой), позволяющие целенаправленно формировать и быстро тиражировать генотипы животных с заданными признаками продуктивности, состава молока и устойчивости к заболеваниям; 2) биотехнологии управления кормлением и микробиомом, включающие прецизионную модуляцию рубцовой ферментации пробиотиками и ферментами, а также применение микробиологических заквасок и адсорбентов при заготовке кормов для программирования питательности рациона и минимизации рисков химической контаминации (микотоксины); 3) биологические методы контроля здоровья вымени и микробиологической чистоты сырья, предлагающие альтернативу антибиотикам на основе пробиотиков, бактериофагов, иммуномодуляторов и ферментов, а также технологии биологического кондиционирования оборудования; 4) биосенсорика и цифровые платформы (сенсоры состава, соматических клеток, патогенов, ингибирующих веществ; концепция «цифрового двойника» стада), обеспечивающие переход от эпизодического лабораторного контроля к непрерывному предиктивному мониторингу. Показано, что синергетическая интеграция этих решений в единую систему позволяет кардинально снизить зависимость качества сырья от эмпирических факторов, обеспечивая его стабильность и предсказуемость. Делается вывод о том, что биотехнологическая трансформация является экономически оправданной стратегией, ведущей не только к гарантированному соответствию сырья нормативным требованиям, но и к получению продукта с воспроизводимыми функционально-технологическими свойствами, что создает основу для глубокой переработки, импортозамещения и укрепления экспортного потенциала отечественной молочной отрасли.

Ключевые слова: молоко-сырье, качество молока, биотехнологии, геномная селекция, микробиом, мастит, пробиотики, бактериофаги, биосенсоры, цифровизация

Для цитирования: Просеков, А. Ю. Биотехнологические решения в производстве высококачественного молока-сырья /

А. Ю. Просеков, В. А. Плешков, О. В. Козлова // Молочная промышленность. 2026. № 1. С. 10–27. <https://doi.org/10.21603/1019-8946-2026-1-74>

ВВЕДЕНИЕ

Производство молока-сырья, отвечающего растущим требованиям безопасности, технологической эффективности и экономической целесообразности, является стратегической задачей для устойчивого развития молочной отрасли. Жесткие нормативы, установленные ГОСТ Р 52054-2003 «Молоко коровье сырое. Технические условия» и Техническим регламентом Таможенного союза ТР ТС 033/2013 «О безопасности молока и молочной продукции», формируют не только барьеры безопасности, но и четкие технологические вызовы. Каждый ключевой параметр молока – содержание белка и жира, уровень соматических клеток (СК), микробиологическая чистота, отсутствие ингибирующих веществ (антибиотики, микотоксины) – имеет глубокое научное и экономическое обоснование.

Так, увеличение массовой доли белка на 0,1 % может давать прирост выхода сыра на 1–1,5 %, а молоко с повышенным уровнем СК (> 500 тыс./см³) имеет пониженную термоустойчивость, выход сыра, произведенного из такого молока, снижается на 10–15 %. Несоблюдение норм ведет к прямым финансовым потерям и рискам для здоровья потребителей [1–3].

Традиционные методы управления продуктивностью и здоровьем стада, основанные на фенотипической селекции, валовом нормировании рационов и реактивной антибиотикотерапии, достигают своего предела. Они не обеспечивают необходимой скорости генетического прогресса, прецизионного контроля состава молока и превентивного управления сложными биологическими системами животного [4, 5].

В этой связи биотехнологии, основанные на глубоком понимании молекулярных и генетических механизмов, становятся основным драйвером инноваций, предлагая инструменты для управления качеством сырья на всех этапах – от генетического потенциала до готового продукта.

Целью настоящего обзора является систематизация современных биотехнологических решений, направленных на управление ключевыми параметрами качества и безопасности молока-сырья на уровне его производства, и обоснование необходимости их интеграции в единую систему.

В качестве таких инструментов в современной практике выделяются четыре взаимосвязанных направления биотехнологий: 1) генетические и репродуктивные технологии, позволяющие целенаправленно формировать наследственный фундамент высококачественного молока-сырья; 2) технологии управления микробиомом животного и кормовой базы для программирования состава молока; 3) биотехнологии управления здоровьем стада и безопасности сырья; 4) биосенсорика и цифровые платформы для прецизионного мониторинга. Рассмотрение этих направлений и составляет основу настоящего обзора.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБЗОРА

Генетические и репродуктивные технологии в формировании качества молока-сырья

Качество молока-сырья, его состав и технологические свойства в значительной степени детерминированы наследственностью. Традиционная селекция, основанная на оценке фенотипических признаков (удой, содержание жира и белка у потомства), сталкивается с фундаментальными ограничениями: длительностью генерационного интервала, косвенностью отбора и невозможностью целенаправленного управления моногенными признаками. Генетические и репродуктивные биотехнологии преодолевают эти барьеры, обеспечивая переход к прецизионному управлению наследственным потенциалом стада.

Современная генетика предоставляет инструменты для прямого чтения наследственной информации и отбора животных по желательным вариантам генов (аллелям), минуя длительное ожидание проявления признаков у потомства. Этот подход позволяет целенаправленно формировать стадо, продуцирующее молоко с заданными технологическими параметрами.

Например, полиморфизм генов казеинового кластера (*CSN1S1*, *CSN2*, *CSN3*) напрямую определяет сыропригодность молока. Наибольшее практическое значение имеет каппа-казеин (*CSN3*). Наличие у животного аллеля В ассоциировано с рядом технологических преимуществ: повышение содержания казеина, уменьшение размера мицелл, формирование плотного и эластичного сычужного сгустка. Конечный эффект: увеличение выхода сыра на 8–12 % по сравнению с молоком от животных с генотипом АА. Аналогичный интерес представляют аллели гена бета-казеина (*CSN2*), в частности вариант А2, связанный с улучшенными технологическими свойствами [6, 7].

Ген *DGAT1* (диацилглицерол-ацилтрансфераза 1) является ключевым количественным локусом, контролирующим синтез молочного жира. Аллельный вариант *K232A* оказывает выраженный эффект на жирномолочность. Животные, несущие аллель К, характеризуются значимо более высоким содержанием жира в молоке и измененным профилем жирных кислот. Отбор по этому гену позволяет повышать энергетическую ценность сырья [8].

Помимо генов, напрямую влияющих на состав, критически важны маркеры, определяющие здоровье животного, которое является основой для реализации генетического потенциала. Ярким примером служит ген *BoLA-DRB3* (*major histocompatibility complex, class II, DR Beta 3*), играющий ключевую роль в иммунном ответе.

Ген *BoLA-DRB3* кодирует молекулы главного комплекса гистосовместимости II класса, которые презентуют антигены патогенов клеткам иммунной системы. Определенные аллели (варианты) этого гена ассоциированы с повышенной устойчивостью или восприимчивостью к инфекционным заболеваниям, в частности к маститу. Исследования показывают, что наличие определенных аллелей *BoLA-DRB3*, например *DRB3.2 23*, коррелирует со снижением числа случаев мастита и более низкими показателями соматических клеток (СК) в молоке [9, 10]. Низкий уровень СК (< 200 тыс./см³) гарантирует сохранность нативного состава белков и высокую термостойкость молока. В практическом применении ДНК-тестирование на аллели гена *BoLA-DRB3* позволяет выявлять животных с генетически обусловленной высокой устойчивостью к маститу. Интеграция этого маркера в программы селекции наряду с отбором по генам продуктивности создает

сбалансированное стадо, способное стабильно производить молоко высокого технологического класса с минимальными потерями от заболеваний.

Ключевым фактором для развития молочной промышленности является геномная селекция, выступающая в роли интеграционной платформы. Геномная селекция представляет собой качественный скачок, позволяющий комплексно оценивать тысячи генетических маркеров, включая вышеупомянутые гены. Технология основана на определении геномной племенной ценности по результатам анализа десятков тысяч однонуклеотидных полиморфизмов (*SNP*), равномерно распределенных по всему геному. Статистические модели, обученные на референтной популяции, предсказывают племенную ценность и потенциал продуктивности молодого животного сразу после получения образца ДНК.

Преимуществами использования таких биотехнологий является сокращение генерационного интервала: оценка бычков и телочек в возрасте нескольких месяцев сокращает интервал селекции с 5–6 до 2–3 лет [11], позволяет одновременно и с высокой точно-

стью оценивать генетический потенциал по разнообразным признакам: содержание белка (через *CSN3*), жира (через *DGAT1*), устойчивость к маститу (через *BoLA-DRB3* и другие иммунные *SNP*) [9], а также ускоряется общий генетический прогресс и снижаются затраты на содержание неперспективного молодняка, что показывает положительный экономический эффект.

Таким образом, современное ДНК-тестирование и геномная селекция трансформируют племенную работу, позволяя целенаправленно формировать стадо, которое не только обладает высоким продуктивным потенциалом, но и генетически устойчиво к заболеваниям, что в совокупности гарантирует производство молока-сырья со стабильно высокими технологическими и санитарными показателями.

Если геномная селекция указывает, каких животных следует размножать для улучшения качества молока, то современные репродуктивные биотехнологии дают ответ на вопрос, как сделать это максимально быстро, массово и целенаправленно. Они являются критически важным инструментом практической реализации генетических программ, радикально сокращая время между выявлением ценного генотипа и его распространением в стаде.

Технологический комплекс OPU-IVP-ТЭ представляет собой последовательность высокотехнологичных процедур, позволяющих в десятки раз увеличить репродуктивный выход от одной элитной коровы-донора по сравнению с естественным осеменением или даже стандартным переносом эмбрионов.

Технология включает в себя аспирацию ооцитов (OPU – Ovum Pick-Up) – малоинвазивную процедуру, выполняемую под ультразвуковым контролем. С помощью специальной иглы, вводимой трансвагинально, из фолликулов яичников живого животного-донора аспирируются (отсасываются) незрелые яйцеклетки (ооциты). Процедуру можно повторять с интервалом в 1–2 недели, получая за один раз в среднем 8–15 ооцитов от одной коровы [12].

Следующим этапом является IVP (*In Vitro Production* – производство *in vitro*), где полученные ооциты дозревают в специальной культуральной среде, после чего оплодотворяются отобранной спермой быка-улучшателя. Далее эмбрионы культивируют в лабораторных инкубаторах в течение 6–7 дней до стадии бластоцисты, пригодной для переноса



Источник изображения: freerik.com

или криоконсервации [13]. Затем проводят трансплантацию эмбрионов. Жизнеспособные эмбрионы переносятся (трансплантируются) в матку синхронизированным по половому циклу реципиентам – менее ценным в племенном отношении, но здоровым коровам. Реципиенты вынашивают и рожают генетически чужеродного теленка [14].

Истинная мощь технологии раскрывается при ее интеграции с методами генетического анализа, создавая замкнутый цикл ускоренного генетического улучшения.

Перед трансплантацией у развившегося эмбриона (на стадии бластоцисты) можно безопасно отобрать несколько клеток трофэктодермы (будущей плаценты) для проведения ДНК-анализа. Преимплантационная генетическая диагностика эмбрионов позволяет отбирать эмбрионы по целевым аллелям. Например, проверить наличие у эмбриона желательных вариантов генов – аллеля *B* гена *CSN3* для гарантированной высокой сыропригодности будущего молока или благоприятных аллелей гена *BoLA-DRB3* для устойчивости к маститу [15], контролировать наследственные аномалии для исключения эмбрионов, несущих летальные рецессивные мутации (например, *CVM*, *BLAD*), и определять пол при необходимости отбирать эмбрионы нужного пола (например, только женские для молочного стада).

Таким образом формируется высокоэффективная цепочка биотехнологических подходов, включающая в себя геномный отбор доноров (для *OPU* отбираются коровы с максимально высоким геномным индексом племенной ценности и оптимальным генотипом по ключевым локусам); геномный отбор быков-производителей (для оплодотворения *in vitro* используется сперма быков, также прошедших жесткий геномный отбор); проверку и отбор эмбрионов с подтвержденным «идеальным» генотипом для получения высококачественного сырья с программируемыми параметрами; трансплантацию только отобранных эмбрионов реципиентам.

Такие подходы имеют ярко выраженный количественный и экономический эффект. Традиционный метод получения потомства от одной коровы ограничен одним теленком в год. Комплекс *OPU-IVP-ТЭ* позволяет увеличить этот показатель до 30–50 и более генетически ценных телят ежегодно от одного донора [12, 16]. Это обеспечивает экс-

поненциальное ускорение генетического прогресса. Хозяйство может за 3–4 года не просто улучшить, а кардинально обновить генетику ядра стада, массово внедряя в него целевые гены.

Отечественные исследования и практика подтверждают высокую результативность этих методов. Работы по трансплантации эмбрионов, в том числе полученных *in vitro*, демонстрируют значительное повышение продуктивного потенциала потомства и улучшение качественных показателей молока в реципиентных стадах [16, 17]. Развитие национальных лабораторий и сервисов в области репродуктивных биотехнологий делает эти инструменты все более доступными для племенных и товарных хозяйств России.

Репродуктивные биотехнологии (*OPU-IVP-ТЭ*) в связке с преимплантационной генетической диагностикой трансформируют селекцию из медленного, статистического процесса в управляемую, высокоскоростную «индустрию» по производству желательных генотипов. Они являются незаменимым звеном в системе биотехнологического управления, обеспечивая быструю материализацию генетического потенциала в виде поголовья, гарантированно производящего молоко-сырье высшего технологического класса [18].

Технологии управления микробиомом животного и кормовой базой для программирования состава молока

Рубец жвачных животных представляет собой сложнейшую динамическую экосистему, где сообщество бактерий, архей, простейших и грибов осуществляет ферментацию корма. Состав и метаболическая активность этого симбиотического микробиома напрямую определяют эффективность конверсии питательных веществ, здоровье животного и, как следствие, количественные и качественные показатели молока. Традиционное кормление, ориентированное на валовые показатели рациона, не позволяет целенаправленно влиять на этот консорциум. Современные биотехнологии предлагают инструменты для его прецизионной модуляции с целью программирования состава молока-сырья.

Один из возможных биотехнологических приемов заключается в применении пробиотиков для стабилизации ферментации и улучшения продуктивности. Пробиотики являются живыми микроорганизмами, которые при введении в адекватных количествах

приносят пользу здоровью хозяина. В рубце они действуют не как постоянные колонизаторы, а как метаболические модераторы. Например, штаммы дрожжевых пробиотиков (*Saccharomyces cerevisiae*, Sc 47) потребляют остаточный кислород, создавая строго анаэробные условия, благоприятные для целлюлолитических бактерий. Они также поставляют метаболиты (витамины группы В, органические кислоты), стимулирующие рост бактерий, утилизирующих молочную кислоту (*Megasphaera elsdenii*, *Selenomonas ruminantium*). Это предотвращает накопление лактата и стабилизирует pH рубца, снижая риск ацидоза [19, 20]. Применение дрожжевых пробиотиков достоверно повышает суточный удой в среднем на 1,2–1,5 кг/гол. и имеет тенденцию к увеличению содержания жира и белка в молоке [19]. Стабильная ферментация способствует синтезу ацетата – основного предшественника молочного жира.

Также при производстве молока успешно применяют бактериальные пробиотики, например *Bacillus subtilis*, механизм действия которых основан на том, что споры *B. subtilis* проявляют активность в рубце, продуцируя широкий спектр гидролитических ферментов (протеазы, амилазы, целлюлазы), которые дополняют работу микробного консорциума. Они также могут синтезировать антимикробные вещества, подавляющие рост патогенов и поддерживающие здоровый баланс микрофлоры [21].

Исследование на лактирующих коровах [22] показало, что добавление *Bacillus subtilis* nTMM увеличивало переваримость сухого вещества и нейтрально-детергентной клетчатки. Это привело к повышению удоя на 4,7 % и значительному росту содержания белка в молоке (на 7,4 %) по сравнению с контрольной группой, что авторы связывают с улучшением синтеза микробного белка в рубце и общего протеинового обмена.

Успешно используют и экзогенные ферментные препараты для повышения доступности питательных веществ. Ферментные препараты действуют как катализаторы, дополняющие и усиливающие активность собственных энзимов рубцовой микробиоты, особенно при скармливании кормов с высоким содержанием трудноусвояемых структурных углеводов. Ферменты целлюлазы и ксиланазы (гемицеллюлазы) гидролизуют β -1,4-гликозидные связи в клеточных стенках растений, разрушая матрикс целлюлозы и гемицеллюлозы. Это делает энергию структурных углеводов более доступной

для рубцовой микрофлоры. Применение фибролитических ферментов повышало усвояемость нейтрально-детергентной клетчатки в среднем на 6,8 % и увеличивало суточный удой на 1,1 кг/гол. [23]. При этом наблюдалась тенденция к росту содержания жира и белка в молоке, что объясняется улучшением энергетического статуса коровы [24].

Ферменты амилазы, расщепляющие крахмал, помогают оптимизировать его ферментацию в рубце при кормлении большими количествами концентратов (кукуруза, ячмень). Это предотвращает избыточное накопление молочной кислоты и резкое падение pH. Исследование К. А. Juckem et al. [25] продемонстрировало, что добавление энзимов с высокой долей крахмала в рацион коров привело к более стабильным показателям pH рубца, увеличению потребления сухого вещества и повышению выхода молочного белка.

Биотехнологические методы позволяют управлять здоровьем рубца для профилактики ацидоза и стабилизации состава молока. Субклинический ацидоз – бич современного высокопродуктивного скотоводства, возникающий при нарушении баланса между легкоферментируемыми углеводами и физически эффективной клетчаткой в рационе. Он приводит к хроническому воспалению, ламиниту, выбросам эндотоксинов и, что критично для качества молока, к резким колебаниям содержания жира [26].

При падении pH рубца ниже 5,8 погибает популяция целлюлолитических бактерий и простейших, ответственных за производство ацетата. Одновременно активируется путь синтеза транс-жирных кислот, которые напрямую ингибируют синтез жира в молочной железе. Это приводит к синдрому низкого жира в молоке [26, 27].

Целенаправленная модуляция рубцового микробиома через пробиотики, ферменты и управление ферментацией представляет собой переход от кормления животного к прецизионному кормлению его симбиотической микрофлоры. Это высокоэффективный биотехнологический путь для повышения конверсии корма и продуктивности, управления биохимическими путями синтеза предшественников молочного жира (ацетат) и белка (микробный белок). Такие подходы обеспечивают стабильность технологически важных показателей молока-сырья, в первую очередь содержания жира, исключая его сезонные колебания и провалы, связанные с кормлением.

Биотехнологии заготовки кормов для программирования качества и безопасности молока-сырья в современных условиях имеют значительный арсенал. Качество молока-сырья в большей степени зависит от качества кормовой базы. Современные биотехнологии заготовки кормов перешли от простой консервации к целенаправленному управлению микробиологическими и биохимическими процессами силосования и сенажирования. Это позволяет не только сохранить, но и улучшить питательную ценность корма, напрямую влияя на состав молока и минимизируя риски его химической контаминации. Для направленной ферментации применяют бактериальные закваски (инокулянты). Успех силосования зависит от скорости подкисления среды, что подавляет развитие нежелательной микрофлоры. Естественная эпифитная микрофлора растений часто не обеспечивает необходимой скорости ферментации. Штаммы молочнокислых бактерий быстро и эффективно сбрасывают водорастворимые углеводы (глюкозу, фруктозу) почти исключительно в молочную кислоту. Это вызывает резкое и глубокое снижение pH (до 4,0 и ниже), что является оптимальным для консервации. Быстрое подкисление минимизирует потери сухого вещества и питательной ценности за счет подавления активности нежелательных микроорганизмов: клостридий (вызывающих маслянокислое брожение и распад белка), энтеробактерий и дрожжей [28].

Исследование X. Yan et al. [29] показало, что применение гомоферментативных инокулянтов может снижать потери протеина в силосе на 30–50 % по сравнению с необработанным контролем. Выявлено позитивное влияние на количество и качество получаемого молока, поскольку стабильный, высокопитательный силос с предсказуемым составом обеспечивает постоянство рациона. Это прямой путь к стабильности показателей молока. Отмечается тенденция к увеличению потребления сухого вещества и повышению удоя при использовании таких заквасок [30].

Гетероферментативные молочнокислые бактерии *Lactobacillus buchneri* наряду с молочной кислотой производят значительные количества уксусной кислоты и 1,2-пропандиола. Уксусная кислота является мощным фунгицидом и ингибитором дрожжей. Ключевая роль их применения заключается в повышении аэробной стабильности силоса после вскрытия траншеи. При доступе кислорода дрожжи начинают утилизировать молочную кислоту, вызывая нагрев и порчу корма. *L. buchneri* подавляет этот

процесс. Исследования подтверждают, что обработка силоса *L. buchneri* может увеличивать время до начала аэробной порчи в 2–3 раза [28, 30].

Предотвращение вторичной ферментации и роста плесеней в корме исключает потери питательной ценности рациона и предупреждает риск попадания в корм микотоксинов, продуцируемых плесневыми грибами (роды *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*), которые могут трансформироваться в токсичные метаболиты в молоке (например, афлатоксин M1).

Современные инокулянты часто комбинируют с ферментами (целлюлазы, гемицеллюлазы, эстеразы) для улучшения доступности клетчатки. Ферменты гидролизуют структурные полисахариды клеточных стенок растений (целлюлозу, гемицеллюлозу, пектины) до простых сахаров (глюкоза, ксилоза, арабиноза) уже на этапе заготовки. Полученные сахара служат дополнительным субстратом для молочнокислых бактерий, ускоряя процесс ферментации, а частичное разрушение клеточных стенок повышает переваримость клетчатки в рубце

Источники изображений: freepik.com



животного на 5–15 %, что ведет к увеличению доступной энергии. Повышение энергетической плотности рациона положительно сказывается на продуктивности и может способствовать улучшению синтеза молочных компонентов, особенно у высокопродуктивных коров в раннюю лактацию.

Один из главных факторов риска для безопасности и качества молока является заражение кормов микотоксинами. Биотехнологии предлагают подходы для управления этим риском на этапе заготовки и скармливания. Перспективна биологическая детоксикация (биотрансформация), механизм действия которой основан на использовании специфических микроорганизмов (бактерии, дрожжи, грибы) или выделенных из них ферментов, способных модифицировать молекулу микотоксина, превращая ее в нетоксичное соединение. Например, *Eubacterium* sp. и некоторые штаммы *Lactobacillus* могут трансформировать дезоксиниваленол (DON, vomитоксин) в его дезэпоксилированную форму (DOM-1), которая в 50–100 раз менее токсична. Исследование R. Kosicki et al. [31] указывает на потенциал микробных консорциумов для детоксикации широкого спектра микотоксинов в кормовом сырье. Также практикуется применение сорбционной терапии, механизм действия которой заключается в том, что минеральные или органические сорбенты, не всасываясь в ЖКТ, связывают молекулы микотоксинов за счет ионообменных, хелатных или гидрофобных взаимодействий, выводя их с калом.

Выделяют неорганические и органические типы сорбентов. К неорганическим относятся алюмосиликаты (бентониты, цеолиты, гидратированные натрий-кальций-алюмосиликаты). Они осо-

бенно эффективны против полярных токсинов, таких как афлатоксины. Исследования *in vivo* показывают, что добавка алюмосиликатов в корм, загрязненный афлатоксином В1, может снижать уровень афлатоксина М1 в молоке на 50–80 %.

К органическим относятся дрожжевые клеточные стенки (глюкоманнан-содержащие продукты), эфиры этерифицированной глюкоманновой кислоты (ЭГМК), хитозан. Они обладают более широким спектром действия, связывая как полярные, так и неполярные токсины (зеараленон, охратоксин). Методы сорбционной терапии оказывают благоприятное влияние на молоко-сырье. Установлено снижение перехода микотоксинов из корма в молоко, что является строгим требованием Техрегламента ТР ТС 033/2013 (предел по афлатоксину М1 – 0,5 мкг/кг). Это предотвращает браковку партий сырья и защищает здоровье потребителей.

Таким образом, биотехнологии заготовки кормов, основанные на применении специализированных инокулянтов, ферментов и детоксикантов, позволяют перейти от кустарного консервирования к производству корма как стратегического сырья с заданными свойствами (табл. 1). Это служит базой для формирования стабильного рациона, обеспечивающего предсказуемый состав молока. Одновременно с этим минимизируются риски микотоксикозов, что гарантирует безопасность сырья и повышает общую рентабельность животноводства за счет сокращения потерь кормов и их более высокой питательной ценности [32, 33].

Таблица 1. Сравнительная характеристика биотехнологических подходов к заготовке кормов

Цель	Решение	Примеры	Эффект	Влияние на качество молока-сырья	Источник литературы
Первичная ферментация	Гомоферментативные инокулянты	<i>Lactobacillus plantarum</i> , <i>Pediococcus acidilactici</i>	Быстрое снижение pH	Минимизация потерь питательных веществ. Обеспечение стабильности состава молока (жир, белок)	[19, 28, 29, 32]
Аэробная стабильность	Гетероферментативные инокулянты	<i>Lactobacillus buchneri</i>	Подавление дрожжей и плесеней после вскрытия траншеи	Снижение содержания афлатоксина М1. Рост продуктивности и потенциальное улучшение молочных компонентов	[19, 28, 30, 32]
Переваримость клетчатки	Ферментные добавки	Целлюлазы, ксиланазы	Гидролиз клеточных стенок	Повышение доступности энергии	[20–25]
Микотоксины в корме	Микробные детоксиканты	<i>Eubacterium</i> sp., <i>Trichosporon mycotoxinivorans</i>	Биотрансформация токсинов в нетоксичные формы	Снижение риска контаминации молока микотоксинами	[26–31]
Микотоксины в ЖКТ	Сорбенты	Глинные минералы, дрожжевые стенки	Связывание и выведение токсинов из организма	Доказанное снижение перехода афлатоксина В1 в М1 в молоке.	[31, 33, 34]

Биотехнологии управления

здоровьем стада и безопасности сыра

Контроль соматических клеток и профилактика мастита являются биологической альтернативой антибиотикам [34]. Высокий уровень соматических клеток (СК) в молоке (> 200 тыс./мл) является прямым следствием воспаления вымени (мастит) и служит главным индикатором ухудшения технологических свойств сыра. Традиционная терапия антибиотиками создает риски остатков в молоке и способствует росту резистентности [35]. Современные биотехнологии предлагают превентивные и целевые решения, основанные на принципах биоконтроля и модуляции иммунитета.

Перспективно формирование защитного микробиома для вымени, где механизм действия основан на конкурентном исключении. Исследования показывают, что специально отобранные штаммы лактобацилл (например, *Lactobacillus casei*, *L. perolens*, *L. plantarum*) при регулярном нанесении на кожу сосков и сосковый канал колонизируют эти поверхности. Пробиотики занимают рецепторы, блокируя прикрепление патогенов (*Staphylococcus aureus*, *Streptococcus agalactiae*), таким образом происходит конкуренция за адгезию. Штаммы секретируют природные антимикробные пептиды (например, низин, педиоцин), напрямую подавляющие рост конкурентов. Продукция органических кислот (молочной, уксусной) снижает локальный pH, угнетая развитие многих условно-патогенных микроорганизмов [36].

Обработка сосков суспензией *L. perolens* после доея приводила к значимому снижению числа новых интрамаммарных инфекций, вызванных стафилококками и стрептококками. Регулярное применение пробиотиков для вымени может снижать уровень СК на 15–30 %, эффективно предотвращая субклинические формы мастита. Важным направлением является выделение аутохтонных (местных) штаммов, максимально адаптированных к микробиому конкретного стада. Метод является исключительно профилактическим, безопасным и способствует формированию устойчивого микробиологического барьера, сокращая необходимость в терапевтических вмешательствах [37, 38].

Современные биотехнологии предлагают бактериофаговую терапию, основанную на принципе высоко-специфичного точечного воздействия. Бактериофаги (фаги) относятся к вирусам, избирательно поражающим бактерии. Литические фаги прикрепляются

к рецепторам на клеточной стенке конкретного вида или даже штамма бактерии, вводят свой геном и используют ресурсы клетки для репликации, что в конечном итоге приводит к ее лизису (разрушению) [39]. Высокая специфичность обуславливает механизм воздействия, фаг, активный против *S. aureus*, не повредит ни полезной микрофлоре, ни клеткам животного. Фаги размножаются только в присутствии бактерии-хозяина, что обеспечивает локальную высокую концентрацию. Механизм действия отличен от антибиотиков, поэтому фаги эффективны против мультирезистентных штаммов [40].

В работе Н. Р. Pereira et al. [41] показана высокая эффективность фаговых коктейлей *in vitro* и в экспериментальных моделях мастита против *S. aureus* и *E. coli*. Более ранние исследования, например, В. N. Gonal et al. [42], продемонстрировали, что введение фагового препарата при экспериментальном стафилококковом мастите у мышей приводило к значительному снижению бактериальной нагрузки и воспаления, сопоставимому с действием антибиотика, но без негативных последствий для микробиома.

Фаговая терапия рассматривается как перспективная альтернатива антибиотикам для лечения клинических маститов, особенно вызванных резистентными штаммами. Ключевой задачей является разработка стабильных лекарственных форм и широкого спектра препаратов для покрытия разнообразия патогенов. Для России актуально создание национальных коллекций фагов против циркулирующих местных штаммов.

Также особое внимание в биотехнологических методах следует уделить иммуномодуляторам природного происхождения. Эти вещества не являются пробиотиками или антимикробными средствами в прямом смысле, а работают за счет активации или дополнения естественных иммунных механизмов вымени.

Так, фермент лизоцим способен разрушать пептидогликановый слой клеточной стенки грамположительных бактерий (основных возбудителей мастита). Лактоферрин является мультифункциональным белком, связывающим железо (лишая его патогенов), и обладает прямой бактерицидной активностью за счет повреждения мембран микробных клеток, а также модулирует воспалительный ответ.

Антимикробные пептиды (дефензины и кателицидины), продуцируемые клетками иммунной системы, разрушают мембраны патогенов. Исследование P. L. Ruegg подчеркивает роль естественных иммунных пептидов в защите вымени [43]. Наружное применение мази с рекомбинантным лизоцимом приводило к снижению бактериальной обсемененности кожи сосков и статистически значимому уменьшению уровня СК в молоке [44]. Эти вещества биоразлагаемы, не способствуют резистентности и не требуют периода браковки молока. Иммуномодуляторы идеально подходят для рутинной профилактической обработки сосков (как пост-диппинг), особенно в периоды высокого риска (запуск, раздой). Они укрепляют естественный барьер, делая его менее уязвимым для инфекции.

Максимальная эффективность достигается при комбинации методов. Например, регулярная профилактика с помощью пробиотических или иммуномодулирующих дипов создает базовую защиту, а при возникновении инфекции, вызванной резистентным штаммом, применяется целевая фаговая терапия.

Экономический эффект складывается из снижения потерь молока (до 15 % при субклиническом мастите), сокращения затрат на лечение и браковку молока из-за антибиотиков и повышения сортности и цены сырья за счет стабильно низкого уровня СК (< 200 тыс./мл), что критически важно для сыропригодности и термоустойчивости молока.

В таблице 2 представлена сравнительная характеристика биотехнологических методов и их влияние на состав и качество молока-сырья.

Биотехнологические методы активно применяют для снижения микробиологической контаминации сырья. Обеспечение низкой бактериальной обсемененности молока-сырья выходит за рамки стандартных гигиенических процедур (мойки и дезинфекции). Психротрофные бактерии (*Pseudomonas* spp., *Bacillus cereus*), способные формировать биопленки и продуцировать термостабильные ферменты, представляют особую угрозу. Современные биотехнологии предлагают проактивные методы управления микробными сообществами на самом оборудовании, предотвращая реконтаминацию молока после его первичной санации [45].

Метод биологического кондиционирования (биопротекция) оборудования основан на принципе

конкурентного исключения. После стандартной химической мойки и дезинфекции внутренние поверхности доильных установок, трубопроводов и танков обрабатываются суспензией специально отобранных штаммов молочнокислых бактерий.

Механизм действия основан на том, что штаммы-пробиотики (например, *Lactobacillus casei*, *Lactococcus lactis*, *Leuconostoc mesenteroides*) способны адгезироваться на материалах оборудования (резина, нержавеющая сталь), формируя первичную, полезную биопленку. Эта резидентная биопленка занимает экологическую нишу, конкурируя с патогенными и психротрофными бактериями за пространство и питательные вещества (остатки органики после мойки). Пробиотики активно продуцируют молочную кислоту и бактериоцины (природные антимикробные пептиды), создавая локально кислую и бактериостатическую среду, подавляющую развитие постоянной микрофлоры.

Регулярное (еженедельное) ополаскивание доильной системы суспензией *Lactobacillus casei* привело к снижению общей бактериальной обсемененности (КМАФАнМ) в выдоенном молоке на 10–15 %, значительному подавлению популяции психротрофных бактерий (на 1–2 логарифма), которые являются главными продуцентами термостабильных липаз и протеаз, и снижению уровня бактерий группы кишечных палочек (БГКП) [46].

Метод позволяет создать устойчивый «биологический барьер» на оборудовании, который работает в промежутках между мойками. Это особенно критично в труднодоступных для химической санации местах (уплотнения, клапаны). В результате хозяйство стабильно получает сырье, соответствующее нормативам высшего сорта по КМАФАнМ ($\leq 1 \times 10^5$ КОЕ/см³, согласно ТР ТС 033/2013).

Для повышения качества и безопасности молока следует проводить целенаправленную борьбу с патогенными биопленками ферментативными методами. Биопленки, формируемые патогенами (например, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*), представляют серьезную проблему. Их внеклеточный полимерный матрикс, состоящий из экзополисахаридов, ДНК, белков и липидов, надежно защищает клетки от действия стандартных моющих и дезинфицирующих средств [47].

Механизм действия ферментных препаратов основан на том, что вместо прямого уничтожения клеточных ферменты избирательно разрушают каркас биопленки, делая ее уязвимой. Например, ДНКазы (нуклеазы) гидролизуют внеклеточную ДНК (eDNA),

которая служит структурным «клеем» и каркасом для многих бактериальных биопленок, особенно стафилококковых. Протеазы (белковые ферменты) расщепляют белковые компоненты матрикса и поверхностные адгезины, с помощью

Таблица 2. Сравнительная характеристика методов

Категория	Примеры	Механизм действия в рубце / организме	Результат	Источник литературы
Пробиотики дрожжевые	Штаммы <i>Saccharomyces cerevisiae</i> (напр., Sc 47)	Потребляют остаточный O_2 , создают анаэробные условия. Стимулируют рост бактерий, утилизирующих молочную кислоту. Поставляют витамины группы В и органические кислоты. Стабилизируют pH рубца, предотвращая ацидоз	Достоверное увеличение суточного удоя (в среднем на 1,2–1,5 кг/гол.). Тенденция к росту содержания жира и белка. Стабилизация синтеза ацетата, предшественника молочного жира	[19, 20]
Пробиотики бактериальные	Споры <i>Bacillus subtilis</i> (напр., штамм nTТМ)	Продуцируют широкий спектр гидролитических ферментов (протеазы, амилазы, целлюлазы), дополняя работу микробиоты. Синтезируют антимикробные вещества, поддерживая баланс микрофлоры	Повышение переваримости сухого вещества и нейтрально-детергентной клетчатки. Увеличение удоя (на 4,7 % в исследовании) и значительный рост содержания белка в молоке (на 7,4 %). Улучшение синтеза микробного белка в рубце	[21, 22, 37]
Ферментные препараты (фибролитические)	Целлюлазы, ксиланазы (гемицеллюлазы)	Гидролизуют β -1,4-гликозидные связи в клеточных стенках растений. Разрушают матрикс целлюлозы и гемицеллюлозы, повышая доступность энергии структурных углеводов для рубцовой микрофлоры	Повышение усвояемости нейтрально-детергентной клетчатки (в среднем на 6,8 %). Увеличение суточного удоя (в среднем на 1,1 кг/гол.). Тенденция к росту содержания жира и белка за счет улучшения энергетического статуса коровы	[23–25]
Ферментные препараты (амилолитические)	Амилазы	Оптимизируют ферментацию крахмала в рубце при кормлении большими количествами концентратов. Предотвращают избыточное накопление молочной кислоты и резкое падение pH	Поддержание стабильного pH рубца. Повышение потребления сухого вещества и выход молочного белка. Предотвращение колебания в составе молока	[25, 32, 37]
Буферные добавки	Бикарбонат натрия (сода), оксид магния, сесквикарбонат натрия	Прямая химическая нейтрализация избытка летучих жирных кислот в рубце. Поддержание pH в оптимальном диапазоне (6,0–6,4)	Предотвращение синдрома низкого жира в молоке. Стабилизация и повышение жирности молока на 0,2–0,5 %. Обеспечение стабильности синтеза ацетата	[26, 27, 30]
Физически эффективная клетчатка (ПЭК)	Длинноволокнистое сено, солома	Стимулирует процесс жвачки и слюноотделения. Слюна является естественным буфером (содержит бикарбонаты и фосфаты). Обеспечивает необходимую структурность рациона	Фундаментальная основа для предотвращения ацидоза. Косвенное обеспечение стабильности всех показателей молока, особенно жира, за счет поддержания здоровья рубца и постоянства рациона	[26–28]
Фитогенные (растительные) добавки	Экстракты, содержащие сапонины (напр., юкка), эфирные масла, танины	Модулируют микробную ферментацию: могут подавлять протозойную популяцию или грамположительные бактерии, продуцирующие молочную кислоту. Некоторые обладают антиоксидантным и противовоспалительным действием	Поддержание стабильного pH рубца как превентивная мера. Улучшение конверсии корма. Влияние на состав молока (жир, белок) варьируется в зависимости от типа и дозы добавки	[26, 32]
Ионофоры*	Моненсин, лазалоцид	Селективно изменяют транспорт ионов через мембраны бактерий. Подавляют грамположительные бактерии, продуцирующие водород и лактат, перераспределяя метаболические потоки в пользу пропионовой кислоты	Повышение общей энергетической эффективности корма за счет снижения потерь на метаногенез. Опосредованное поддержание продуктивности и стабильности состава молока	[26, 28, 32]

Примечание: * – применение строго регламентировано.

которых бактерии прикрепляются к поверхности. Диспергирующие ферменты (полисахаридазы) разрушают экзополисахаридную основу матрикса (например, альгиназу против *P. aeruginosa*) [48].

Исследование J. Moreno et al. [48] указывает на ключевую роль биопленок в персистенции *S. aureus* в вымени и на оборудовании. Работа Y. N. V. Sabino et al. [49] показала, что предварительная обработка поверхностей, покрытых биопленкой, коктейлем из ДНКазы и протеазы повышала эффективность последующей стандартной дезинфекции хлорсодержащими средствами на 99,9 % по сравнению с обработкой только дезинфектантом. Ферменты не убивают бактерии напрямую, но лишают их защиты, после чего стандартные санитарные процедуры становятся высокоэффективными.

Периодическая (например, раз в 2–4 недели) ферментная «шоковая» обработка молокопроводящих систем (циркуляция раствора ферментов) позволяет радикально снизить резидентную бионагрузку оборудования, предотвращая хроническую реконтаминацию молока. Это прямой путь к достижению и поддержанию жестких нормативов по БГКП (не допускаются в 0,01 см³ для высшего сорта).

Максимальная эффективность достигается при последовательном применении обоих методов: стандартная мойка / дезинфекция + биологическое кондиционирование создают базовую защиту. Периодическая ферментная обработка ликвидирует устойчивые очаги патогенов. Эта ком-

бинация обеспечивает производство сырья, не только соответствующего нормативам, но и обладающего повышенной технологической устойчивостью (отсутствие термостабильных ферментов), что критически важно для переработки на продукты с длительным сроком хранения.

Биосенсорика и цифровые инструменты для прецизионного контроля качества молока-сырья

Переход к прецизионному управлению качеством молока невозможен без систем оперативной обратной связи. Биосенсорика и цифровые технологии обеспечивают переход от эпизодического лабораторного анализа к непрерывному, встраиваемому мониторингу, позволяя не фиксировать брак, а прогнозировать и предотвращать его.

Биосенсоры – аналитические устройства, объединяющие биологический распознающий элемент и физический преобразователь. Их миниатюризация и автоматизация сделали возможным анализ непосредственно на ферме или даже в процессе доения [50].

Применяют биосенсоры для определения ингибирующих веществ (антибиотики, микотоксины). Наибольшее распространение получили иммуносенсоры. Они используют высокоспецифичные антитела, иммобилизованные на поверхности чипа. При связывании с мишенью (например, молекулой бета-лактамного антибиотика) изменяются электрохимические или оптические свойства системы, что регистрируется прибором. Для афлатоксина М1 применяют аналогичные сенсоры или латеральные потоковые иммунохроматографические тест-полоски с оптическим считывателем [51].

Исследование M. Han et al. [52] описывает разработку портативного электрохимического иммуносенсора на основе графеновых наноструктур для одновременного определения пенициллина-G и афлатоксина М1. Прибор показал пределы обнаружения 0,1 нг/мл для пенициллина и 0,05 нг/мл для афлатоксина М1, что ниже установленных в ЕС максимально допустимых уровней, и время анализа менее 15 мин.

Такие системы позволяют проводить 100 % скрининг поступающего молока от каждой коровы или каждой партии на приемном пункте за считанные минуты. Это полностью исключает риск смешивания контаминированного сырья с общим



Источник изображения: freerik.com

объемом, предотвращая огромные экономические потери от утилизации всей партии и обеспечивая строгое соблюдение ТР ТС 033/2013.

Помимо дорогостоящих стационарных флуоресцентных анализаторов разрабатываются и внедряются портативные решения – биосенсоры для подсчета соматических клеток (СК) и детекции патогенов. Например, импедансная проточная цитометрия регистрирует изменение электрического сопротивления при прохождении клетки через микроотверстие, позволяя подсчитывать и сортировать клетки по размеру. Оптические in-line сенсоры, установленные на доильной линии, используют методы лазерной дифракции или флуоресценции (после автоматического окрашивания ДНК-меткой) для подсчета СК в реальном времени [53]. ПЦР-биосенсоры в реальном времени, где применяются миниатюрные системы для экспресс-диагностики конкретных патогенов мастита (*S. aureus*, *E. coli*) прямо из пробы молока за 40–60 мин.

С. J. Rutten et al. [54] в обзоре сенсоров для молочных ферм приводят данные, что современные сенсоры СК обладают точностью ($R^2 > 0,85$), сопоставимой с эталонными методами. Их интеграция в систему управления доильным роботом позволяет автоматически отделять молоко от коров с пороговым уровнем СК (> 250 тыс./мл) уже в процессе доения.

Использование таких технологий позволяет оперативно выявлять субклинический мастит на самой ранней стадии. Это позволяет немедленно изолировать животное, начать целевую терапию и предотвратить ухудшение качества всего удоя.

Биосенсоры применяют также и для анализа базового состава молока (жир, белок, мочевины, лактоза). Золотым стандартом стала миниатюризированная инфракрасная (ИК) спектроскопия в ближнем диапазоне. Современные компактные анализаторы, использующие такие технологии (микроэлектромеханические системы), могут быть встроены в доильные станции или проточные линии. Исследование показало, что анализ биосенсором в диапазоне 1100–2400 нм позволяет с высокой точностью определять многокомпонентный состав молока в режиме реального времени, а мониторинг уровня мочевины в молоке является точным индикатором белково-энергетического баланса в рационе [55, 56].

Данные с анализаторов являются основой для прецизионного кормления. Система может автоматически корректировать состав кормосмеси для каждой коровы или группы в зависимости от текущих показателей молока, что напрямую влияет на стабилизацию содержания жира и белка, а также на эффективность использования корма.

Отдельные потоки данных от сенсоров обретают максимальную ценность при интеграции в единую систему. Концепция «цифрового двойника» стада представляет собой его виртуальную динамическую копию, которая непрерывно обновляется в реальном времени данными из физического мира и использует алгоритмы для симуляции, анализа и прогнозирования. Цифровой двойник объединяет многомерные данные, включая генетические (геномная оценка племенной ценности, генотипы по ключевым генам (*CSN3*, *DGAT1*, *BoLA-DRB3*)), физиологические в реальном времени (активность, время жвачки (датчики в ошейнике или в рубце), температура тела, пульс, данные с датчиков pH рубца), продукционные (удой, состав молока, данные о доении от роботов), кормовые и экологические (состав и количество раздаваемого корма, данные метеостанций) [57].

На этой основе система реализует предиктивную аналитику здоровья. Модели на основе машинного обучения анализируют комплекс отклонений. Например, снижение активности и жвачки + небольшой рост СК + изменение электропроводности молока. Это позволяет спрогнозировать риск клинического мастита за 24–48 ч до появления видимых симптомов, как показано в работе А. Н. Stygar et al. [58]. Система может симулировать, как изменение доли крахмала или защищенного жира в рационе конкретной группы повлияет на профиль жирных кислот и выход сыра через 7–10 дней, позволяя технологу принимать обоснованные решения. Интеграция данных об активности и прогестероне позволит точно определить оптимальный момент осеменения.

Внедрение цифрового двойника трансформирует управление стадом из реактивного в проактивное и предиктивное. Например, получив от системы предупреждение о высоком риске кетоза у коровы № 245 через 5 дней после отела, специалист может заранее назначить ей пропионат-содержащую добавку. Это обеспечивает беспрецедентную стабильность качества сырья, минимизирует потери от болезней и максимизирует эффективность использования ресурсов, переводя производство молока в категорию управляемой высокотехнологичной отрасли.

Внедрение биотехнологических решений следует рассматривать не как часть операционных расходов, а как стратегическую инвестицию в основное производственное звено – качество сырья. Экономическая целесообразность определяется прямым и быстрым возвратом средств по нескольким ключевым каналам.

Экономический эффект складывается из трех основных источников, каждый из которых поддается количественной оценке.

1. Надбавка за сортность и гарантированное качество. Биотехнологии (контроль мастита, управление микробиомом, кормовые программы) позволяют стабильно производить молоко, соответствующее параметрам высшего сорта по ГОСТ Р 52054-2003: СК < 400 тыс./см³, КМАФАнМ < 100 тыс. КОЕ/см³. Дифференциация закупочных цен – стандартная практика. Переработчики готовы платить больше на 1–3 руб./кг за сырье высшего сорта, которое гарантирует предсказуемый технологический процесс и высокий выход продукции. Примером расчета может послужить следующее. Для хозяйства с удоем 8000 кг молока на корову в год дополнительный доход только от надбавки в 1,5 руб./кг составит 12 000 руб./гол. в год. Для стада в 100 коров – 1,2 млн руб. ежегодно.

2. Увеличение выхода готовой продукции, что очень важно для переработчика и производителя. Это наиболее значимый, хотя и косвенный, источник экономии и дохода, который часто конвертируется в доплату поставщику. Например, молоко от коров с генотипом CSN3 BB обеспечивает увеличение выхода сыра на 8–12 % по сравнению с генотипом AA за счет лучшего сычужного свертывания и отделения сыворотки. Снижение уровня соматических клеток с 500 тыс./см³ до 200 тыс./см³ может повысить выход сыра на 3–5 % за счет уменьшения потерь белка и казеина в сыворотку [6, 8]. Для сыродельного завода, перерабатывающего 100 т молока в сутки со средним выходом 10 %, рост выхода всего на 1 % означает дополнительно 1 т сыра ежедневно. Даже часть этой маржи, заложенная в виде долгосрочной надбавки к цене на сырье, делает инвестиции поставщика в генетику и здоровье стада экономически оправданными.

3. Снижение прямых убытков и операционных затрат. Биотехнологии предотвращают значительные скрытые потери, которые часто не учитываются в полном объеме. Потери от мастита включают в себя снижение удоя, затраты на лечение и браковку коров, а также потери от браковки сырья. Субклинический мастит (СК > 500 тыс./см³)



снижает продуктивность на 5–15 %. Для коровы с потенциалом 9000 кг/год потери составляют 450–1350 кг, что в денежном выражении (при цене 35 руб./кг) равно 15 750 – 47 250 руб./гол. в год. Один случай клинического мастита обходится производителю в среднем в 10–15 тыс. руб., с учетом ветеринарных услуг, препаратов и выбраковки молока [9]. Обнаружение остатков антибиотиков или афлатоксина М1 сверх нормы ведет к утилизации всей партии. Потеря 1 т молока стоимостью 40 000 руб. означает полную потерю выручки при понесенных затратах на производство. Профилактика мастита с помощью пробиотиков для вымени или фагов сокращает частоту случаев на 40–60 %.

Инвестиции в биотехнологии, биосенсоры и биодетоксиканты кормов страхуют от этих катастрофических рисков. На примере расчет, рассмотрим потенциальное включение минимального пакета биотехнологических решений в молочное предприятие. Для типичного хозяйства на 100 коров с удоем 8000 кг инвестиции в стартовый пакет биотехнологий (пробиотики кормовые и для вымени, экспресс-тесты, частичное геномное тестирование) могут составить 500–700 тыс. руб. в год. При консервативной оценке эффекта (надбавка за сорт + снижение потерь от мастита) годовая экономия / допдоход может превысить 1,5 млн руб.

Таким образом, окупаемость операционных затрат наступает в течение первых 3–6 месяцев. Капитальные вложения в геномную селекцию и репродуктивные технологии окупаются в течение 2–3 лактаций за счет продажи племенного молодняка и долгосрочного роста продуктивности и качества стада.

Стратегические направления развития биотехнологий в молочном скотоводстве Российской Федерации должны основываться на систематизации усилий. Для системного прорыва необходима консолидация усилий науки, бизнеса и государства в рамках национальной стратегии. Необходимо направить усилия на импортозамещение и разработку отечественных биопрепаратов, заниматься разработкой пробиотических препаратов для рубца, оптимизированных под силос из кукурузы или бобовых, характерных для отечественной кормовой базы; организовать создание линеек препаратов на основе фагов против наиболее распространенных в РФ генотипов *Staphylococcus aureus*

и *Streptococcus agalactiae*, а также производство силосных заквасок, эффективных в различных природно-климатических условиях нашей страны.

Поскольку эффективность пробиотиков, фагов и заквасок максимальна при их адаптации к местным условиям, то необходимо создание Национального банка штаммов микроорганизмов сельскохозяйственных животных РФ. Приоритетом будет являться выделение и изучение аутохтонных штаммов лактобацилл, пропионовокислых бактерий и бактериофагов, отобранных от здоровых высокопродуктивных животных в разных регионах страны [59].

Помимо этого необходим переход от торговли отдельными добавками к оказанию технологических услуг, а также разработка индивидуальных технологических карт для хозяйства на основе глубокого аудита (анализ генетики стада, кормовой базы, истории заболеваний, качества молока).

Примером такой программы может служить следующее. Для хозяйства-поставщика сыропригодного молока программа может включать: 1) геномный отбор коров-доноров по аллелю *CSN3 B* [7, 9]; 2) применение пробиотиков для рубца, направленных на синтез микробного белка [14]; 3) использование заквасок для силосования бобовых трав [17, 18]; 4) профилактическую обработку вымени пробиотическим дипом [20]; 5) мониторинг уровня мочевины в молоке [27].

Бизнес-моделью может послужить оплата за результат, когда поставщик технологий заинтересован в достижении конкретных показателей (повышение сортности молока, снижение СК), а его вознаграждение зависит от полученного хозяйством экономического эффекта.

Также одним из драйверов перехода молочной отрасли на биотехнологии может послужить модернизация стандартизации или введение технологических сортов молока. Действующие ГОСТ и ТР ТС направляют в основном нормы безопасности и общих физико-химических показателей. Для стимулирования производства сырья для глубокой переработки необходимы новые стандарты. Например, введение в ГОСТ Р 52054-2003 «Молоко натуральное коровье – сырье. Технические условия» градации «Премиум» или «Технологический» сорт с нормированием функционально-технологических свойств –

термоустойчивость (по алкогольной пробе с 75–80 % этанолом), сыропригодность (время сычужного свертывания, прочность сгустка); биохимических и генетических маркеров – содержание каппа-казеина, наличие благоприятных аллелей генов (*CSN3 B*, *CSN2 A2*); предельно низкого уровня СК (< 250 тыс./см³) [60–62].

Это будет способствовать созданию прозрачного рыночного механизма, где цена объективно отражает технологическую ценность сырья для конкретной переработки (сыроделие, производство детского питания, УВТ-продуктов). В свою очередь, это создаст мощные прямые экономические стимулы для производителей инвестировать в современные биотехнологии.

В таблице 3 представлены биотехнологические решения для управления ключевыми параметрами качества молока-сырья.

ВЫВОДЫ

Биотехнологическая трансформация молочной промышленности экономически неизбежна. Современные биотехнологические решения представляют собой не набор разрозненных приемов, а взаимосвязанную систему, целенаправленно воздействующую на всю цепочку производства. Интеграция геномной селекции, репродуктивных технологий, управления микробиомом, биологической защиты здоровья и цифрового мониторинга создает синергетический эффект, переводя

Таблица 3. Биотехнологические решения для управления ключевыми параметрами качества молока-сырья

Проблема	Биотехнологический инструмент	Механизм воздействия	Ожидаемый технологический и экономический эффект	Источник литературы
Низкое содержание / неоптимальный состав белка (сыропригодность)	Геномная селекция по генам казеинов (<i>CSN2</i> , <i>CSN3</i>)	Целенаправленный отбор животных с благоприятными аллелями (напр., <i>CSN3 B</i>)	Увеличение выхода сыра на 8–10 %, улучшение структуры сгустка. Повышение закупочной цены молока	[6, 7, 61]
	Модуляция рубцового микробиома пробиотиками (<i>S. cerevisiae</i>) и ферментами	Повышение синтеза микробного белка в рубце, улучшение протеинового питания животного	Рост надоев и потенциальное увеличение содержания белка в молоке	[19, 20, 22, 24]
Нестабильность / низкое содержание жира	Селекция по гену <i>DGAT1</i>	Отбор аллелей, ассоциированных с высокой жирномолочностью	Повышение выхода масла, увеличение энергетической ценности сырья	[8]
	Применение пробиотиков и управление рубцовым ферментным профилем	Стабилизация синтеза ацетата – основного предшественника молочного жира	Стабилизация процента жира, предотвращение его провалов	[19, 20, 26, 27]
Высокий уровень соматических клеток (мастит)	Пробиотики для вымени (лактобациллы)	Конкурентное исключение патогенов, формирование защитного барьера на коже вымени	Профилактика субклинического мастита, снижение содержания соматических клеток на 15–30 %. Снижение затрат на лечение	[36–38, 43]
	Бактериофаговая терапия	Избирательный лизис патогенных бактерий (<i>S. aureus</i> и др.)	Лечение мастита, вызванного резистентными штаммами, отсутствие остатков антибиотиков в молоке	[39–41, 44]
Высокая бактериальная обсемененность, порча сырья	Биологическое кондиционирование доильного оборудования	Создание конкурирующей биопленки из полезных МКБ на поверхностях	Снижение КМАФАнМ на 10–15 %, подавление психротрофов	[46]
	Силосные закваски (гомо- и гетероферментативные МКБ)	Направленная ферментация, быстрое подкисление, повышение аэробной стабильности корма	Получение качественного корма, снижение риска вторичной микробиологической порчи молока	[28–30, 32]
Наличие ингибирующих веществ (антибиотики, афлатоксин М1)	Иммуносенсоры для экспресс-анализа	Оперативный (5–15 мин) контроль при приемке сырья или на ферме	Недопущение браковки всей партии, быстрая идентификация источника проблемы	[51, 52]
	Биодетоксиканты кормов (сорбенты, микробные консорциумы)	Связывание или разрушение микотоксинов в ЖКТ животного	Снижение перехода афлатоксина В1 в молоко, обеспечение безопасности	[31, 33]

производство молока-сырья из области традиционных методов в область управляемой высокотехнологичной отрасли.

Дальнейший прогресс зависит от консолидации усилий науки, бизнеса и государства в рамках единой стратегии, направленной на создание отечественных биопрепаратов, разработку

персонализированных технологических решений и гармонизацию стандартов с учетом реальных технологических потребностей переработки. Именно такой подход позволит гарантированно обеспечить глубокую переработку безопасным сырьем с предсказуемыми и высокими функциональными свойствами, что является залогом конкурентоспособности всей молочной отрасли. ■

Поступила в редакцию: 15.11.2025
Принята в печать: 15.01.2026

PREMIUM-GRADE RAW MILK: BIOTECHNOLOGICAL SOLUTIONS

Aleksandr Yu. Prosekov, Vladimir A. Pleshkov, Oksana V. Kozlova

Kemerovo State University, Kemerovo

REVIEW ARTICLE

To maintain market competitiveness, raw milk production must reconcile rigorous safety protocols with operational efficiency. This review provides a comprehensive taxonomy of biotechnological solutions that support the precision-driven optimization of milk quality at the point of origin. Milk production cycle consists of four interconnected technological modules. 1) Modern genetic and reproductive technologies include genomic selection for loci CSN3, DGAT1, BoLA-DRB3, as well as the OPU-IVP-TE complex with preimplantation diagnosis. They enable the targeted development and rapid dissemination of superior genotypes characterized by enhanced productivity, optimized milk composition, and robust disease resistance. 2) Nutritional biotechnology and microbiome engineering facilitate the precision modulation of ruminal fermentation through the strategic application of probiotics and enzymes. In addition, microbial inoculants and adsorbents in feed storage make it possible to plan nutritional value of animal diet and minimize chemical contamination (mycotoxins). 3) Biological methods aimed at udder health control and microbiological purity of raw materials. Probiotics, bacteriophages, immunomodulators, and enzymes offer a safe alternative to antibiotics. This group also includes technologies for biological conditioning of equipment. 4) Biosensorics and digital platforms provide continuous predictive monitoring, e.g., in-line sensors for composition, somatic cell count, pathogens, inhibitory substances; the digital twin herd, etc. Implemented as an integrated, synergistic framework, these solutions mitigate the impact of empirical variables on raw milk quality, ensuring a more consistent and predictable production profile. Biotechnologies are an economically justified strategy that guarantees compliance of raw materials with regulatory standards by providing raw milk with reproducible functional and technological properties. They facilitate deep processing and encourage import substitution, thus strengthening the export potential of the domestic dairy industry.

Keywords: raw milk, milk quality, biotechnology, genomic selection, microbiome, mastitis, probiotics, bacteriophages, biosensors, digitalization

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gonçalves, J. L.** Pathogen effects on milk yield and composition in chronic subclinical mastitis in dairy cows / J. L. Gonçalves [et al.] // *Veterinary Journal*. 2020. Vol. 262. Article number 105473. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2020.105473>
2. **Gai, N.** Effect of protein genotypes on physicochemical properties and protein functionality of bovine milk: A review / N. Gai [et al.] // *Foods*. 2021. Vol. 10(10). Article number 2409. <https://doi.org/10.3390/foods10102409>
3. **Лоретц, О. Г.** Технологические свойства молока в зависимости от сезона года / О. Г. Лоретц, О. В. Горелик, О. П. Неверова // *БИО*. 2019. № 1(220). С. 8–11. <https://elibrary.ru/qrioya>
4. **Pegolo, S.** Associations between differential somatic cell count and milk yield, quality, and technological characteristics in Holstein cows / S. Pegolo [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2021. Vol. 104(4). P. 4822–4836. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19084>
5. **Карпеня, М. М.** Влияние содержания соматических клеток и бактериальной обсемененности молока-сырья на структуру его переработки / М. М. Карпеня [и др.] // *Ученые записки учреждения образования Витебская ордена Знак почета государственная академия ветеринарной медицины*. 2017. Т. 53, № 4. С. 114–117. <https://elibrary.ru/ymqvvd>
6. **Гаджиев, З. К.** Полиморфизм гена CSN2 (бета-казеин) у коров молочного направления продуктивности / З. К. Гаджиев [и др.] // *Известия Горского государственного аграрного университета*. 2025. Т. 62, № 2. С. 31–38. https://doi.org/10.54258/20701047.2025_62_2_31; <https://elibrary.ru/dewews>
7. **Amalfitano, N.** Role of CSN2, CSN3, and BLG genes and the polygenic background in the cattle milk protein profile / N. Amalfitano [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2022. Vol. 105(7). P. 6001–6020. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21421>
8. **Mahmoudi, P.** Strong evidence for association between K232A polymorphism of the DGAT1 gene and milk fat and protein contents: A meta-analysis / P. Mahmoudi, A. Rashidi // *Journal of Dairy Science*. 2023. Vol. 106(4). P. 2573–2587. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22315>
9. **Andrade, T. E. G.** The DRB3 gene of the bovine major histocompatibility complex: discovery, diversity and distribution of alleles in commercial breeds of cattle and applications for development of vaccines / T. E. G. Andrade [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2024. Vol. 107(12). P. 11324–11341. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24628>
10. **Tizard, I. R.** Chapter 9 – BoLA: the bovine major histocompatibility complex // *The Immunology of the Domestic Ruminants*. Ed. by I. R. Tizard. – Academic Press, 2025. – P. 157–173. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-33572-3.00009-6>
11. **Doublet, A. C.** The impact of genomic selection on genetic diversity and genetic gain in three French dairy cattle breeds / A. C. Doublet [et al.] // *Genetics, Selection, Evolution*. 2019. Vol. 51. Article number 52. <https://doi.org/10.1186/s12711-019-0495-1>
12. **Salek, F.** Factors affecting the success of ovum pick-up, in vitro production and cryopreservation of embryos in cattle / F. Salek [et al.] // *Animals*. 2025. Vol. 15(3). Article number 344. <https://doi.org/10.3390/ani15030344>
13. **Mapletoft, R. J.** History and perspectives on bovine embryo transfer / R. J. Mapletoft // *Animal Reproduction*. 2018. Vol. 10(3). P. 168–173.

14. **Funnell, B.** Disease risk of in vitro produced embryos: A review of current commercial practices in the context of international trade with emphasis on bovine embryos / B. Funnell [et al.] // *Theriogenology*. 2024. Vol. 230. P. 212–219. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2024.09.019>
15. **Pacheco, H. A.** Invited review: Phenotyping strategies and genetic background of dairy cattle behavior in intensive production systems—From trait definition to genomic selection / H. A. Pacheco [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2025. Vol. 108(1). P. 6–32. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-24953>
16. **Кнуров, Д. А.** Перспективы развития скотоводства путем трансплантации эмбрионов / Д. А. Кнуров, А. В. Игнатьев, Д. В. Иванова // *Эффективное животноводство*. 2023. № 5(187). С. 22–23. <https://elibrary.ru/cyjmix>
17. **Мадисон, В. В.** Эмбриотрансфер на производстве: I. Юбилей и статистика / В. В. Мадисон, Л. В. Мадисон // *Вестник Чувашского государственного аграрного университета*. 2025. № 1(32). С. 118–126. <https://doi.org/10.48612/vch/13a3-4kb2-8uza>; <https://elibrary.ru/qzcktd>
18. **Iamartino, D.** FECUND EU-Project: Optimisation of early reproductive success in dairy cattle through the definition of new trait and improved reproductive biotechnology // *Animal Reproduction Science*. 2014. Vol. 149(1–2). P. 100. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2014.06.015>
19. **Amin, A. B.** Influence of yeast on rumen fermentation, growth performance and quality of products in ruminants: A review / A. B. Amin, S. Mao // *Animal Nutrition*. 2021. Vol. 7(1). – P. 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2020.10.005>
20. **Yang, J.** Understanding the differences in rumen bacteria and their impact on dairy cows' production performance: A review / J. Yang [et al.] // *Animal Nutrition*. 2025. Vol. 22. P. 259–279. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2025.04.006>
21. **By, W. C.** Bacillus subtilis co-transfected with a lysine-rich and a methionine-rich protein gene and its effect on cow milk production / W. C. By [et al.] // *Journal of Northeast Agricultural University (English Edition)*. 2016. Vol. 23(4). P. 47–54. [https://doi.org/10.1016/S1006-8104\(17\)30006-5](https://doi.org/10.1016/S1006-8104(17)30006-5)
22. **Sun, P.** Effects of Bacillus subtilis natto on milk production, rumen fermentation and ruminal microbiome of dairy cows / P. Sun, J. Q. Wang, L. F. Deng // *Animal*. 2013. Vol. 7(2). P. 216–222. <https://doi.org/10.1017/S1751731112001188>
23. **Martinez, O. A.** Effects of feeding a fibrolytic enzyme to Holstein dairy cows on milk production and reproduction / O. A. Martinez [et al.] // *Applied Animal Science*. 2023. Vol. 39(5). P. 306–316. <https://doi.org/10.15232/aas.2023-02386>
24. **Yang, J.** Lactational performance, feeding behavior, ruminal fermentation and nutrient digestibility in dairy cows fed whole-plant faba bean silage-based diet with fibrolytic enzyme / J. Yang [et al.] // *Animal*. 2022. Vol. 16(9). Article number 100606. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100606>
25. **Juckem, K. A.** Effect of dietary starch concentration and direct-fed microbial supplementation on lactation performance, total-tract nutrient digestibility, and enteric methane emissions by dairy cows / K. A. Juckem [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2025. Vol. 108(11). P. 12257–12274. <https://doi.org/10.3168/jds.2025-26694>
26. **McGuffey, R. K.** A 100-Year Review: Metabolic modifiers in dairy cattle nutrition // *Journal of Dairy Science*. 2017. Vol. 100, № 12. P. 10113–10142. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12987>
27. **Elmhadi, M. E.** Subacute ruminal acidosis in dairy herds: Microbiological and nutritional causes, consequences, and prevention strategies / M. E. Elmhadi [et al.] // *Animal Nutrition*. 2022. Vol. 10. P. 148–155. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2021.12.008>
28. **Бикчантаев, И. Т.** Эффективность новых штаммов молочнокислых бактерий и B. licheniformis в консервировании кукурузы / И. Т. Бикчантаев, Д. М. Афордоаны // *Аграрный научный журнал*. 2022. № 4. С. 53–56. <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i4pp53-56>; <https://elibrary.ru/wgklbd>
29. **Yan, X.** High-moisture alfalfa silage fermentation: a comparative study on the impact of additives including formic acid, Lactobacillus plantarum, cinnamon essential oil, and wood vinegar / X. Yan [et al.] // *Microbiology Spectrum*. 2025. Vol. 13(9). P. e00003-25. <https://doi.org/10.1128/spectrum.00003-25>; <https://elibrary.ru/etyrzy>
30. **Muck, R. E.** Silage review: Recent advances and future uses of silage additives / R. E. Muck [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2018. Vol. 101(5). P. 3980–4000. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13839>
31. **Kosicki, R.** Multiannual mycotoxin survey in feed materials and feedingstuffs / R. Kosicki [et al.] // *Animal Feed Science and Technology*. 2016. Vol. 215. P. 165–180. <https://doi.org/10.1016/j.anifeeds.2016.03.012>
32. **Oliveira, A. S.** Meta-analysis of effects of inoculation with homofermentative and facultative heterofermentative lactic acid bacteria on silage fermentation, aerobic stability, and the performance of dairy cows / A. S. Oliveira [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2017. Vol. 100(6). P. 4587–4603. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11815>
33. **Akinmoladun, O. F.** Multiple Mycotoxin Contamination in Livestock Feed: Implications for Animal Health, Productivity, and Food Safety / O. F. Akinmoladun [et al.] // *Toxins*. 2025. Vol. 17(8). Article number 365. <https://doi.org/10.3390/toxins17080365>
34. **Костомахин, Н.** Контроль молока-сырья на содержание антибиотиков / Н. Костомахин, В. Остроухова, Т. Ананьева // *Ветеринария сельскохозяйственных животных*. 2024. № 9(222). С. 44–48. <https://elibrary.ru/jmyjat>
35. **Андреева, А. А.** Этиология и эпизоотология мастита коров (аналитический обзор) / А. А. Андреева [и др.] // *Ветеринария сегодня*. 2024. Т. 13, № 1. С. 27–35. <https://doi.org/10.29326/2304-196X-2024-13-1-27-35>; <https://elibrary.ru/myqkgf>
36. **Ruiz-Romero, R. A.** The role of non-aureus Staphylococcus in small ruminant mastitis: A systemic review on etiological agents, risk factors, virulence determinants, and novel treatments / R. A. Ruiz-Romero, N. Ghavipanje, E. Vargas-Bello-Perez // *Small Ruminant Research*. 2025. Vol. 245. Article number 107475. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2025.107475>
37. **Ma, Y.** Anti-Inflammatory potential of lactic acid bacteria for dairy cows during the periparturient period / Y. Ma [et al.] // *Animal Feed Science and Technology*. 2025. Vol. 321. Article number 116234. <https://doi.org/10.1016/j.anifeeds.2025.116234>
38. **Tilocca, B.** Milk microbiota: Characterization methods and role in cheese production / B. Tilocca [et al.] // *Journal of Proteomics*. 2020. Vol. 210. Article number 103534. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2019.103534>
39. **Ngassam-Tchamba, C.** In vitro and in vivo assessment of phage therapy against Staphylococcus aureus causing bovine mastitis / C. Ngassam-Tchamba [et al.] // *Journal of Global Antimicrobial Resistance*. 2020. Vol. 22. P. 762–770. <https://doi.org/10.1016/j.jgar.2020.06.020>
40. **Guo, M.** Development and mouse model evaluation of a new phage cocktail intended as an alternative to antibiotics for treatment of Staphylococcus aureus-induced bovine mastitis / M. Guo [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2024. Vol. 107(8). P. 5974–5987. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-24540>
41. **Pereira, H. P.** Evaluation and characterization of lytic phages and their recombinant endolysins for control of Staphylococcus aureus aiming to mitigate bovine mastitis / H. P. Pereira [et al.] // *Microbial Pathogenesis*. 2025. Vol. 199. Article number 107188. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2024.107188>
42. **Gonal, B. N.** Epidemiology, antimicrobial resistance, economic burden, and management approaches for staphylococcus aureus-associated bovine mastitis: a systematic review / B. N. Gonal [et al.] // *Animals and Zoonoses*. 2025. (In press). <https://doi.org/10.1016/j.azn.2025.12.001>
43. **Ruegg, P. L.** A 100-Year Review: Mastitis detection, management, and prevention / P. L. Ruegg // *Journal of Dairy Science*. 2017. Vol. 100(12). P. 10381–10397. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13023>
44. **Zduńczyk, S.** Bacteriophages and associated endolysins in therapy and prevention of mastitis and metritis in cows: Current knowledge / S. Zduńczyk, T. Janowski // *Animal Reproduction Science*. 2020. Vol. 218. Article number 106504. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2020.106504>
45. **Marković, K. G.** Biofilms in dairy products: safety hazard or beneficial asset? / K. G. Marković, M. Ž. Grujović, O. D. Stefanović // *International Dairy Journal*. 2025. Vol. 171. Article number 106381. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2025.106381>
46. **Desmousseaux, C.** Biofilm Formation in Dairy: A Food Safety Concern—Biofilms in the milking machine, from laboratory scale to on-farm results / C. Desmousseaux [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2025. Vol. 108(8). P. 8120–8140. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25352>
47. **Meireles, A.** The current knowledge on the application of anti-biofilm enzymes in the food industry / A. Meireles [et al.] // *Food Research International*. 2016. Vol. 86. P. 140–146. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.06.006>

48. **Moreno, J.** Comprehensive analysis of antimicrobial resistance, biofilm formation and virulence factors of staphylococci isolated from bovine mastitis / J. Moreno [et al.] // Heliyon. 2025. Vol. 11(4). Article number e42749. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42749>
49. **Sabino, Y. N. V.** Exopolysaccharides produced by *Bacillus* spp. inhibit biofilm formation by *Staphylococcus aureus* strains associated with bovine mastitis / Y. N. V. Sabino [et al.] // International Journal of Biological Macromolecules. 2023. Vol. 253. Article number 126689. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126689>
50. **Sharma, V.** Technological revolutions in smart farming: Current trends, challenges & future directions / V. Sharma, A. K. Tripathi, H. Mittal // Computers and Electronics in Agriculture. 2022. Vol. 201. Article number 107217. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107217>
51. **Гулий, О. И.** Биосенсорные системы для определения антибиотиков / О. И. Гулий [и др.] // Биофизика. 2021. Т. 66, № 4. С. 657–667. <https://doi.org/10.31857/S0006302921040050>; <https://elibrary.ru/unlghn>
52. **Han, M.** An octuplex lateral flow immunoassay for rapid detection of antibiotic residues, aflatoxin M1 and melamine in milk / M. Han [et al.] // Sensors and Actuators B: Chemical. 2019. Vol. 292. P. 94–104. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.04.019>
53. **Islam, M. H.** Agriculture 4.0 adoption challenges in the emerging economies: Implications for smart farming and sustainability / Md. H. Islam [et al.] // Journal of Economy and Technology. 2024. Vol. 2. P. 278–295. <https://doi.org/10.1016/j.ject.2024.09.002>
54. **Rutten, C. J.** Invited review: Sensors to support health management on dairy farms / C. J. Rutten [et al.] // Journal of Dairy Science. 2013. Vol. 96(4). P. 1928–1952. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6107>
55. **Liang, Q.** Detection of water adulteration levels in milk using near-infrared spectroscopy combined with chemometrics / Q. Liang [et al.] // Journal of Dairy Science. 2025. Vol. 108(7). P. 6852–6866. <https://doi.org/10.3168/jds.2025-26631>
56. **Xu, R.** Recent advancements in chemometrics based non-destructive analytical techniques for rapid detection of adulterants in milk and dairy products – A review / R. Xu [et al.] // Food Control. 2025. Vol. 174. Article number 111247. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111247>
57. **Billah, M.** Review: Genomic selection in the era of phenotyping based on digital images / M. Billah [et al.] // Animal. 2025. Vol. 19. Article number 101486. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2025.101486>
58. **Stygar, A. H.** Measuring dairy cow welfare with real-time sensor-based data and farm records: a concept study / A. H. Stygar [et al.] // Animal. 2023. Vol. 17(12). Article number 101023. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.101023>
59. **Суховольский, О.** Биотехнология в животноводстве / О. Суховольский // Ветеринария сельскохозяйственных животных. 2020. № 5. С. 3–8. <https://elibrary.ru/vdcdeo>
60. **Мордвинова, В. А.** Развитие системы стандартизации РФ в области сыроделия / В. А. Мордвинова, Н. Н. Оносовская // Сыроделие и маслоделие. 2020. № 1. С. 10–12. <https://doi.org/10.31515/2073-4018-2020-1-10-12>; <https://elibrary.ru/xbrwjs>
61. **Илларионова, Е. Е.** Ассоциация полиморфизмов в биокластере генов казеина и сывороточных белков с технологическими свойствами молочного сырья / Е. Е. Илларионова [и др.] // Молочная промышленность. 2021. № 3. С. 60–62. <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2021-03-60-62>; <https://elibrary.ru/qdervg>
62. **Асафов, В. А.** Новые технологии и качество молочных продуктов / В. А. Асафов, В. Д. Харитонов // Молочная промышленность. 2018. № 10. С. 39–41. <https://elibrary.ru/yamkvv>

КОМИТЕКС
www.komitex.ru

ПРОИЗВОДСТВО НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ
И СИНТЕТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

- Молочные фильтры различных типоразмеров
- Полотна для фильтрации молока и иных пищевых жидкостей
- Полотна для обтирания вымени КРС

167000, г. Сыктывкар,
ул. 2-ая Промышленная, 10
тел.: +7(8212)286-514, 286-547,
факс.: +7(8212)286-560
market@komitex.ru, www.komitex.ru

РЕКЛАМА