

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ
Школа бакалавриата

ОТЧЕТ

По проекту
«Разработка цифрового двойника агрофермерского комплекса»
по дисциплине «Проектный практикум»

Заказчик: Шестеров Михаил Андреевич

Куратор: Дербенева В. В.

Доцент, Менеджер по проектам

Студенты команды «Команда»

Мухаметзянов Т. Р. РИ-320933

Токтомурастов Б. З. РИ-320936

Паладий К. Г. РИ-320947

Потемкин С. А. РИ-320942

Омаров И. Р. РИ-320932

Екатеринбург, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Основная часть	5
2 Анализ	6
3 Гипотезы.....	7
3.1 Ситуация	7
3.2 Проблема.....	7
3.3 Гипотеза	7
4 Прогнозирование молочной продуктивности на основе надоев и событий	10
4.1 Компьютерная модель прогнозирования производства молока на ферме и индивидуальных удоев коров	10
4.1.1 Техническая реализуемость	10
4.1.2 Экономическая целесообразность.....	11
4.1.3 Масштабируемость	11
4.1.4 Учёт факторов влияния	12
4.1.5 Заключение	12
4.2 Экспресс-методика создания цифрового двойника прогнозирования объемов производства молока дойным стадом сельхозорганизации	13
4.2.1 Суть исследования	13
4.2.2 Используемые расчетные модели	13
4.2.3 Техническая реализуемость	15
4.2.4 Экономическая целесообразность.....	15
4.2.5 Масштабируемость	15
4.2.6 Заключение	16
4.3 Итог по двум моделям	16
5 Работа с данными заказчика	17
5.1 Расчета суточного пика продуктивности коровы.....	17
5.2 Расчет суточного удоя коровы в зависимости от номера лактации, месяца отела и дня лактации.....	18

5.3	Расчета месяца отела в зоотехнически оптимальные сроки после	
	предыдущего отела	18
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	20
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	21

ВВЕДЕНИЕ

Внедрение цифровых технологий в производственные модели – ключевой элемент оптимизации современного бизнеса. В ходе работы участники должны были научиться анализировать данные, проектировать и прототипировать сервисы, а также предложить гипотезы для улучшения системы агрофермы.

Целью проекта было получение практических навыков по разработке цифрового двойника предприятия на примере агрофермы для оптимизации бизнес-процессов.

До недавних пор автоматизация сельского хозяйства в России ограничивалась преимущественно использованием простейших программ для учета финансов и работы с клиентами. Однако в последние годы происходит трансформация: хозяйства начали активно использовать цифровые технологии как для мониторинга сельскохозяйственных культур, домашнего скота и различных элементов сельскохозяйственного процесса, так и для организации бизнес-процессов.

Предлагаемое решение должно было решить проблемы автоматизации сельского хозяйства для агрофермы.

Ожидаемые результаты можно разделить на:

- минимальный: прохождение образовательных материалов и выполнение базовых заданий по аналитике данных,
- базовый: реализация учебных проектов с использованием изученных инструментов,
- оптимальный: участие в проекте цифровой модели агрофермерского комплекса ООО “Уралгипромез-Инжиниринг”.

1 Основная часть

До первой встречи с заказчиком была поставлена задача погрузиться в предметную область. В частности, необходимо было сформировать базу знаний и выстроить онтологию в области животноводства, провести аналитику в рамках изученного фреймворка системной инженерии Domain-Driven Design, а также провести анализ, выявить тренды и интересные решения в этой сфере.

В ходе работы каждый участник на основе проведенного анализа и составленной онтологии погрузился в тему и проанализировал существующие модели прогнозирования производства молока. В результате выбранная модель была применена к данным заказчика.

2 Анализ

Было выявлено два ключевых тренда:

1. Большое количество решений используют IoT. Компании, выдвинувшие используемые в большей части мира технологии - Allflex, DeLaval
2. AI-прогнозирование. Ранняя диагностика болезней (Connecterra) и оптимальные рационы Cainthus

Отечественный АПК оказался не в тройке лидеров по числу используемых решений в сфере цифровизации, однако вошел в десятку наравне с Китаем (см. рисунок 1)

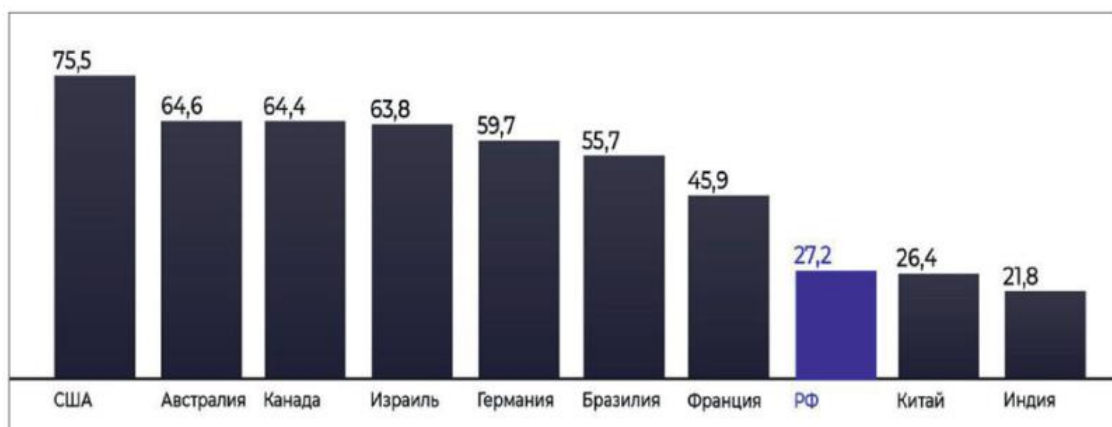


Рисунок 1 – Уровень цифровизации АПК в разных странах

3 Гипотезы

Сформулировано несколько гипотез для общего списка с дальнейшим выбором для проработки и реализации.

Рассмотрим одну из гипотез:

3.1 Ситуация

Современные фермы сталкиваются с необходимостью повышения продуктивности и снижения затрат при одновременном обеспечении высокого уровня благополучия животных

3.2 Проблема

Отсутствие систем объединяющей данные о здоровье, кормлении, разведении и оборудовании, затрудняет принятие оперативных решений.

3.3 Гипотеза

Внедрение цифрового двойника фермы и интеграции AIoT, позволит: мониторить состояние животных в режиме реального времени – что значительно ускорит отслеживание болезней каждого животного, а также предсказывать и предотвращать заболевания – что поможет избежать понижения надоя, уменьшит расходы на лечение, может спасти целое пастбище от заражения. Датчики цифрового двойника могут выявлять шаблоны, которые человек не способен заметить, до явных проявлений болезни. Внедрение поможет избежать уменьшения надоя или недобора веса у мясных пород. Также может снизить затраты на корм, корректируя рацион под каждое животное.

Была описана схема предметной области вместе с предложенной моделью (см. рисунок 2).

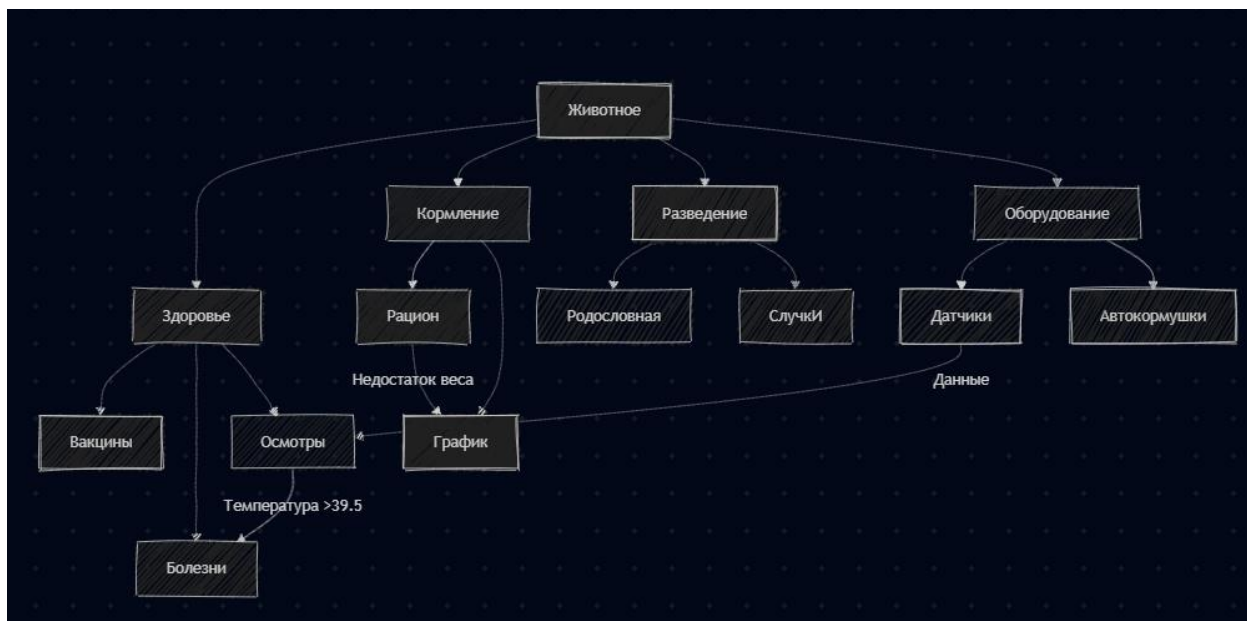


Рисунок 2 – Модель в предметной области

Гипотезы были приведены к формату «Дерево развития гипотез (см. рисунки 3, 4 и 5).



Рисунок 3 – Описание блоков в формате «Дерево развития гипотез»

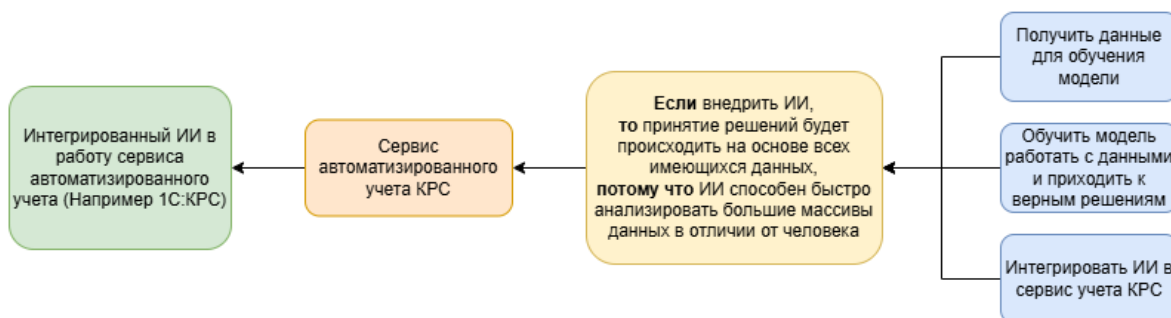


Рисунок 4 – Пример оформленной гипотезы

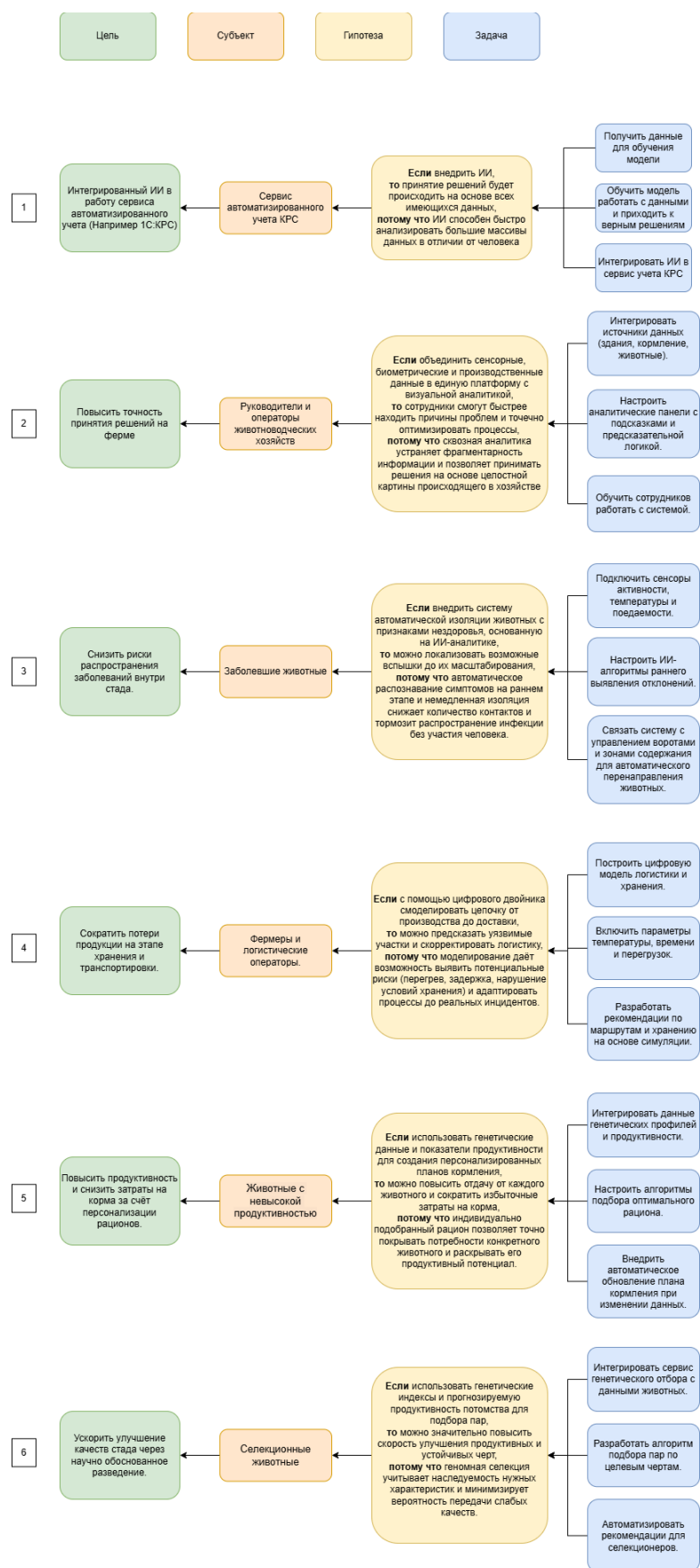


Рисунок 5 – Часть гипотез от нашей команды

4 Прогнозирование молочной продуктивности на основе надоев и событий

Было изучено несколько моделей и методик прогнозирования молочной продуктивности. За основу были взяты две модели.

4.1 Компьютерная модель прогнозирования производства молока на ферме и индивидуальных удоев коров

Был проведен анализ разработанной компьютерной модели из Азово-Черноморской агроинженерной академии.

4.1.1 Техническая реализуемость

Модель реализована в среде Visual Studio 2010 на языке C# с использованием платформы .NET Framework 4 и базы данных Microsoft Access. Это обеспечивает:

- Гибкость и доступность: Использование распространённых технологий упрощает внедрение модели на фермах различного масштаба;
- Интеграция с базами данных: Технология ADO.NET позволяет эффективно управлять данными и масштабировать систему;
- Интерфейс: Модель имеет интуитивно понятный интерфейс с возможностью ввода данных и вывода результатов в таблицах и графиках.

Однако, для современных условий может потребоваться переход на более актуальные технологии (например, .NET Core, SQLite или облачные решения), чтобы обеспечить лучшую производительность и поддержку.

- Обновление технологий: Переход на .NET Core или *.NET 6+* обеспечит кроссплатформенность;
- Замена СУБД: Microsoft Access ограничен в производительности при больших объёмах данных. Альтернативы – SQLite (для небольших ферм) или PostgreSQL (для крупных хозяйств);

- API и облачные решения: Добавление REST API позволит интегрировать модель с другими сельскохозяйственными системами.

4.1.2 Экономическая целесообразность

Сюда можно отнести:

- Затраты на внедрение: Использование бесплатных или недорогих инструментов (например, SQLite вместо Access) снижает затраты;
- Эффективность: Модель позволяет оптимизировать производство молока, прогнозируя удои и планируя ресурсы, что может привести к снижению издержек и увеличению прибыли;
- Окупаемость: для крупных ферм и комплексов внедрение такой модели может быстро окупиться за счёт повышения точности планирования;
- Снижение трудозатрат: Автоматизация расчётов сокращает время на рутинные операции;
- Анализ рентабельности: Модель можно дополнить модулем оценки стоимости кормов, электроэнергии и труда, чтобы вычислять себестоимость литра молока для каждой коровы;
- Государственные субсидии: В некоторых странах фермеры получают гранты на цифровизацию – внедрение такой модели может помочь в получении финансирования.

4.1.3 Масштабируемость

Для данной модели актуальны:

- База данных: Текущая реализация на основе Access может стать узким местом при увеличении объёма данных. Переход на SQL-сервер (например, MySQL или PostgreSQL) улучшит масштабируемость;
- Алгоритмы: Модель использует полиномиальные уравнения для расчёта удоев, что может быть ресурсоёмким при большом количестве животных. Оптимизация алгоритмов или

использование машинного обучения может повысить эффективность;

- Микросервисная архитектура: Разделение системы на модули (учёт животных, прогнозирование, аналитика) упростит масштабирование;
- Интеграция с ERP-системами: например, с 1С:Предприятие для автоматического учёта молока и финансов.

4.1.4 Учёт факторов влияния

Модель учитывает:

- Физиологию животных: Возраст, лактации, сервис-периоды, сухостойные периоды;
- Генетические факторы: Наследственные особенности через коэффициенты изменения удоев;
- Временные факторы: Сезонность и даты отёлов.

Но, почвенные и природно-климатические условия явно не включены в эту модель. Их учёт потребует расширения исходных данных и корректировки алгоритмов, например добавления коэффициентов, зависящих от температуры, влажности и качества кормов.

Перспективы развития модели:

- Использование датчиков для сбора данных о состоянии животных и условиях содержания в реальном времени;
- Для более точного прогнозирования на основе исторических данных и выявления скрытых закономерностей;
- Учёт климатических данных и качества кормов;
- Модуль анализа экономической эффективности;
- Разработка веб-версии для удалённого доступа и коллективной работы.

4.1.5 Заключение

Данная модель является технически реализуемой, экономически целесообразной и масштабируемой, но для наших требований нуждается в доработке для учёта всех ключевых факторов, особенно природно-климатических условий. Её развитие в направлении симулятора с использованием современных технологий (машинное обучение, IoT) позволит значительно повысить точность прогнозов и эффективность управления молочным производством. В общем предложенная модель – хорошая основа, но требует доработок для соответствия современным стандартам, хотя бы:

- Технологическое обновление (переход на актуальные языки и СУБД)
- Расширение функционала (учёт климата, кормов, здоровья животных)
- Интеграция с другими системами (ERP, IoT, веб приложения)

4.2 Экспресс-методика создания цифрового двойника прогнозирования объемов производства молока дойным стадом сельхозорганизации

Вторая работы уже из Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси. Они показались наиболее интересными и простыми в реализации.

4.2.1 Суть исследования

На основе предоставленных материалов разработана модель цифрового двойника дойного стада, представляющая собой систему прогнозирования молочной продуктивности коров на основе ряда параметров: номера отёла, месяца отёла, дня лактации и среднего удоя. В модели применены регрессионные зависимости, позволяющие вычислять суточный пик продуктивности, суточный удой, среднегодовую продуктивность и оптимальный месяц следующего отёла. Все расчеты выполнены в Excel и опираются как на фактические данные, так и на аппроксимированные значения.

4.2.2 Используемые расчетные модели

Таблица 1 – блок-программа расчета суточного пика продуктивности коровы

	А	В
1	Номер лактации (1...4)	1
2	Месяц отела (1...12)	12
3	День лактации после отела	147
4	Среднесуточный удой, л	29,62
5	Суточный пик продуктивности (СПП), л	$=8,775019-4,05526*B1+0,311796*B2+0,024362*B3+1,350132*B4$
6	Месяц лактации	$=B3/30,4$

Таблица 2 – блок-программа расчета суточного удоя коровы в зависимости от номера лактации, месяца отела и дня лактации

	А	В
1	Суточный удой в среднем за лактацию по стаду, л	31
2	Номер лактации (1...4)	1
3	Месяц отела (1...12)	12
4	День лактации после отела	257
5	Среднесуточный удой, л	$=B1/22,94*(31,4640432-0,59952499*B20,406732404*B3-0,027362475*B4)$
6	Месяц лактации	$=B4/30,4$

Таблица 3 – блок-программа расчета среднегодового удоя от коровы в зависимости от номера отела и месяца лактации

	А	В
1	Фактический среднегодовой удой на корову по стаду, л	11321
2	Номер отела	2
3	Месяц отела	1
4	Среднегодовой удой от коровы, л	$=B1/7112*(8396,77-185,824*B2)+(ЕСЛИ(B2=1;-126,094*B3;ЕСЛИ(B2=2;-126,122*B3;ЕСЛИ(B2=3;-126,122*B3;ЕСЛИ(B2=4;226,112*B3))))))$

Таблица 4 – блок-программа расчета месяца отела в зоотехнически оптимальные сроки после предыдущего отела (продолжительность лактации 310 дней)

	А	В
1	Месяц 1 отела (1...12)	1
2	Месяц 2 отела	=ЕСЛИ(В1=1;12;В1+11-12)
3	Месяц 3 отела	=ЕСЛИ(В2=1;12;В2+11-12)
4	Месяц 4 отела	=ЕСЛИ(В3=1;12;В3+11-12)

4.2.3 Техническая реализуемость

С точки зрения технической реализуемости проект абсолютно выполним. Все расчеты уже реализованы в Excel и могут быть без труда перенесены в специализированные программы учёта или даже в простое мобильное приложение. Требуются только базовые данные, которые уже собираются на каждой ферме: номер отёла, дата отёла, удои. Внедрение не требует специфического оборудования или инфраструктурных изменений — это преимущество для любых хозяйств, в том числе малых.

4.2.4 Экономическая целесообразность

С экономической точки зрения использование цифрового двойника оправдано. Даже незначительное повышение точности прогноза удоя позволяет эффективнее управлять стадом, предотвращать преждевременную выбраковку, планировать отёлы и, как следствие, увеличивать прибыль. Учитывая, что модель проста в реализации и не требует затрат на дорогое программное или аппаратное обеспечение, экономическая целесообразность находится на высоком уровне.

4.2.5 Масштабируемость

С точки зрения масштабируемости проект может быть реализован как в небольших фермерских хозяйствах, так и в крупных агрохолдингах. Его можно внедрить в рамках одной фермы и впоследствии расширить на другие. Модель легко адаптируется к другим регионам и породам при наличии локальных данных. Более того, она может быть интегрирована в

существующие цифровые платформы агробизнеса и системы управления производством.

4.2.6 Заключение

Таким образом, модель цифрового двойника стада, основанная на расчетных и статистических данных, является технически реализуемой, экономически обоснованной и высоко масштабируемой системой управления молочной продуктивностью. Она способна дать хозяйству реальный эффект за счёт рационального планирования и анализа стада без необходимости значительных инвестиций или сложной подготовки персонала.

4.3 Итог по двум моделям

Обе модели показали достаточно интересными в реализации, однако изучив данные от заказчика мы остановились на прогнозировании объемов производства молока дойным стадом сельхозорганизации. Для данной методики у нас были все исходные данные и результат работы можно было сравнить с уже имеющимися моделями у заказчика.

5 Работа с данными заказчика

Имелись данные по надоям, а именно средний удой по каждому месяцу для каждой коровы, а также журнал событий (см. рисунки 6 и 7).

Дата — Год								
Дата — Месяц		Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль
Ферма	Номер жи	Среднее з	Среднее з	Среднее з	Среднее з	Среднее з	Среднее з	Среднее з
Бородули	10	43	38	43	32	36	35	28
	1000		30	30	38	33	33	32
	10000		24	21				
	10002		32				36	
	1002	39	37	38	34	35	31	32
	1006	47	42	40	39	32	32	21
	1008		24	36	34	36	43	29
	1010	40	37	40	39	43	33	25
	1012	37	51	30	37	37	32	29
	1014		38	30	31	30	33	24
	1016							20

Рисунок 6 – Надои по КД

Дата события	Код собы	Событие	Примечание	Репродуктивный код	Дни доен	Номер лактации	Номер животного	Дата рождения
31.12.2024	7	ЯЛОВ	КРОВИТ	Осемененная	87	3	456	27.02.2020
31.12.2024	7	ЯЛОВ	КРОВИТ	Стельная	256	1	1620	15.02.2022
31.12.2024	7	ЯЛОВ	КРОВИТ	Стельная	163	1	1906	25.06.2022
31.12.2024	9	ПЕРЕВОД	F054T057	Телка	204	0	3340	10.06.2024
31.12.2024	9	ПЕРЕВОД	F054T057	Телка	202	0	3350	12.06.2024
31.12.2024	9	ПЕРЕВОД	F054T057	Телка	195	0	3360	19.06.2024
31.12.2024	9	ПЕРЕВОД	F054T057	Телка	183	0	3376	01.07.2024

Рисунок 7 – Журнал событий

Для расчетов была взята информация о суточном удое каждой из коров стада, порядковый день лактации, месяц отела и номер отела.

Расчеты каждой блок-программы проводились независимо друг от друга, чтобы в результате были получены расчеты отдельно с возможностью индивидуальной проверки точности каждого блока.

5.1 Расчета суточного пика продуктивности коровы

Для расчета использовались номер животного, номер лактации, месяц отела и день лактации. Далее по формулам из блок-программ получались суточный пик продуктивности и месяц лактации (см. рисунок 8).

Номер	Номер лактации (1...4)	Месяц отела (1...12)	День лактации после отела	Среднесуточный удой, л	СПП (формула)	Месяц лактации
2	4	05.09.2024	20	32.88	40.23972316	1
6	3	08.01.2024	238	26.1	40.4520042	8
8	2	25.09.2023	184	22.83	38.77678456	7
10	3	17.11.2023	390	32.04	52.17481228	13
14	4	05.09.2024	61	33.1	41.5355942	3

Рисунок 8 – Суточный пик продуктивности

Если брать для расчета СПП максимальное значение среди средних надоев за месяц, то наш результат имеет незначительное отклонение в большую сторону. Это соответствует действительности и подтверждает действенность методики.

5.2 Расчет суточного удоя коровы в зависимости от номера лактации, месяца отела и дня лактации

Для расчета использовались номер животного, номер лактации, месяц отела и день лактации. Далее по формулам из блок-программ получались среднесуточный удой и месяц лактации (см. рисунок 9).

Номер животного	Суточный удой в среднем за лактацию по стаду, л	Номер лактации (1...4)	Месяц отела (1...12)	День лактации после отела	Среднесуточный удой, л	Месяц лактации
2	28	4	9	20	29.9	1.0
6	28	3	1	238	27.4	8.0
8	28	2	9	184	26.0	7.0
10	28	3	11	390	17.5	13.0
14	28	4	9	61	28.6	3.0
20	28	3	12	258	21.3	9.0

Рисунок 9 – Суточный удой коровы в зависимости от номера лактации, месяца отела и дня лактации

5.3 Расчет среднегодового удоя от коровы в зависимости от номера отела и месяца лактации

Для расчета использовались номер животного, номер лактации, месяц отела и день лактации. Далее по формулам из блок-программ получали среднегодовой удой от коровы (см. рисунок 10). Ранее по исходным данным рассчитывали фактический среднегодовой удой на корову по стаду.

Номер	Фактический среднегодовой удой на корову по стаду (2023), л	Фактический среднегодовой удой на корову по стаду (2024), л	Номер отела	Месяц отела	Месяц отела	Среднесуточный удой от коровы	Среднегодовой удой от коровы (2023), л
2	10640.00	6353.6	4	05.09.2024	9	32.88	13485.09
6	5320.00	2614.4	3	08.01.2024	1	26.1	5737.92
8	7174.40	1155.2	2	25.09.2023	9	22.83	6960.44
10	9819.20	9363.2	3	17.11.2023	11	32.04	9436.01
14	7934.40	2128	4	05.09.2024	9	33.1	10573.5

Рисунок 10 – Среднегодовой удой от коровы в зависимости от номера отела и месяца лактации

5.4 Расчет месяца отела в зоотехнически оптимальные сроки после предыдущего отела

Для расчета использовались номер животного и месяц отела. Формула была достаточно простой поэтому мы не стали расширять до девяти как на нашей ферме и оставили в пределах четырех как на ферме из примера. Далее по

формулам из блок-программ получался месяц отела в зоотехнически оптимальные сроки (см. рисунок 11).

Номер животного	1 отел	1 отел месяц	2 отел месяц	3 отел месяц	4 отел месяц
2	01.08.2023	8	7	6	5
6	08.01.2024	1	12	11	10
8	25.09.2023	9	8	7	6
10	17.11.2023	11	10	9	8
14	21.09.2023	9	8	7	6
20	28.12.2023	12	11	10	9
22	27.08.2023	8	7	6	5
24	26.09.2023	9	8	7	6
28	26.04.2023	4	3	2	1

Рисунок 11 – Месяц отела в зоотехнически оптимальные сроки после предыдущего отела

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проделанную работу считаем можно оценить на оптимальных уровень выполнения проекта. Надеемся, что какие-нибудь из блок-программ будут полезными для заказчика проявят себя лучше применяемых на данный момент.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Draw.io - обзор бесплатного сервиса для рисования схем и графиков: сайт – URL: <https://blog.skillfactory.ru/draw-io/> (дата обращения: 12.05.2025)
2. DDD простыми словами: сайт – URL: <https://habr.com/ru/articles/809831/> (дата обращения: 20.04.2025)
3. Allflex Livestock Intelligence: сайт – URL: <https://www.allflex.co.nz/> (дата обращения: 20.05.2025)
4. Доильное оборудование DeLaval: сайт – URL: <https://www.delaval.com/ru> (дата обращения: 20.05.2025)
5. Connecterra умная платформа для анализа данных на фермах: сайт – URL: <https://www.connecterra.ai/> (дата обращения: 20.05.2025)
6. Cainthus: новое видение для животных, фермеров и производства продуктов питания: сайт – URL: <https://cainthuspreview.squarespace.com/> (дата обращения: 20.05.2025)
7. Экспресс-методика создания цифрового двойника прогнозирования объемов производства молока дойным стадом сельхозорганизации: сайт – URL: <https://repo.vsavm.by/bitstream/123456789/16612/1/k-2021-17-2-316-322.pdf> (дата обращения: 10.06.2025)
8. Модель прогнозирования удоев при различной кратности доения: сайт – URL: <https://www.agrimachinery.net/sbornik/2017/2/36.MODEL%20PREDICTION%20OF%20MILK%20YIELD%20AT%20DIFFERENT%20MULTIPLICITY%20OF%20MILKING.pdf> (дата обращения: 10.06.2025)
9. Компьютерная модель производства молока на ферме и индивидуальных удоев коров: сайт – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompyuternaya-model-prognozirovaniya-proizvodstva-moloka-na-ferme-i-individualnyh-udoev-korov/viewer> (дата обращения: 10.06.2025)
10. 1С: Цифровое животноводство. Оперативный учет и управление производством. КРС: сайт – URL: <https://1concept.ru/operativnyy-uchet-na->

<fermakh-krs?yclid=8820954757461180415> (дата обращения: 20.05.2025)

11. Livestock Breed Ontology (LBO): сайт – URL: <https://github.com/AnimalGenome/livestock-breed-ontology> (дата обращения: 20.04.2025)